



BERICHT

WIEN, MAI/2026

ITA-2026-02

WWW.OEAW.AC.AT/ITA

FORESIGHT UND TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG: MONITORING VON ZUKUNFTSTHEMEN FÜR DAS ÖSTERREICHISCHE PARLAMENT

MAI 2026

FORESIGHT UND TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG: MONITORING VON ZUKUNFTSTHEMEN FÜR DAS ÖSTERREICHISCHE PARLAMENT

MAI 2026

Institut für Technikfolgen-Abschätzung (ITA)
der Österreichischen Akademie der Wissenschaften

In Kooperation mit:

Institut für Technikfolgenabschätzung und Systemanalyse (ITAS)
am Karlsruher Institut für Technologie

Projektleitung *Michael Nentwich*
Autorinnen/ *Fabian Fischer [FF] (ITA)*
Autoren *Philipp Frey [PF] (ITAS)*
Niklas Gudowsky-Blatakes [NG] (ITA)
Christoph Kehl [CK] (ITAS)
Harald König (HK) (ITAS)
Bettina-Johanna Krings [BK] (ITAS)
Dana Mahr [DM] (ITAS)
Michael Nentwich [MN] (ITA)
Anna Pauls [PA] (ITA)
Bernhard Resch [BR] (ITA)
Pauline Rioussel [PR] (ITAS)
Jean Schmitt [JS] (ITA)
Nora Weinberger [NW] (ITAS)

Bericht im Auftrag des österreichischen Parlaments
Wien, Mai/2026

IMPRESSUM

Medieninhaber:

Österreichische Akademie der Wissenschaften
Juristische Person öffentlichen Rechts (BGBl 569/1921 idF BGBl I 31/2018)
Dr. Ignaz Seipel-Platz 2, A-1010 Wien

Herausgeber:

Institut für Technikfolgen-Abschätzung (ITA)
Bäckerstraße 13, A-1010 Wien
www.oeaw.ac.at/ita

Die ITA-Projektberichte erscheinen unregelmäßig und dienen der Veröffentlichung der Forschungsergebnisse des Instituts für Technikfolgen-Abschätzung.

Die Berichte erscheinen in geringer Auflage im Druck und werden über das Internetportal „epub.oeaw“ der Öffentlichkeit zur Verfügung gestellt:

epub.oeaw.ac.at/ita/ita-projektberichte

Umschlagbild: © Parlamentsdirektion/Bildagentur Zolles KG/Martin Steiger

Bericht Nr.: ITA-2026-02 (Wien, Mai/2026)

ISSN: 1819-1320

ISSN-online: 1818-6556

epub.oeaw.ac.at/ita/ita-projektberichte/ITA-2026-02.pdf

parlament.gv.at/fachinfos/rlw/zukunftsthemen



Dieser Bericht unterliegt der Creative Commons Attribution 4.0 International License:
creativecommons.org/licenses/by/4.0/

INHALT

	ZUSAMMENFASSUNG	6
1	EINLEITUNG	9
1.1	VORGANGSWEISE	10
1.2	RELEVANZKRITERIEN	11
1.3	BASISQUELLEN FÜR DIESE BERICHTSVERSION	12
2	AKTUELLE SOZIO-TECHNISCHE ENTWICKLUNGEN	14
	QUANTENSENSOREN	15
	HERAUSFORDERUNG DEMENZ	21
	BIOPESTIZIDE	27
	KI UND ARBEITSMARKT: DESKILLING UND BERUFSEINSTIEG	33
	NEUE TECHNOLOGIEN GEGEN CHRONISCHE SCHMERZEN	39
	ÜBERFÜLLTER ORBIT	45
	INTELLIGENTE SOZIALE AGENTEN GEGEN EINSAMKEIT? (AKTUALISIERT)	51
	PHAGEN ZUR THERAPIE UND BIOKONTROLLE (AKTUALISIERT)	57
	SELF-DRIVING-LABS (AKTUALISIERT)	63
	TEXTIL-RECYCLING (AKTUALISIERT)	69
	GRÜNER BETON (AKTUALISIERT)	75
	DIGITALE ZWILLINGE IM GESUNDHEITSWESEN (AKTUALISIERT)	81
	KÜNSTLICHE GEBÄRMUTTERSYSTEME UND SYNTHETISCHE EMBRYONEN (AKTUALISIERT)	87
	MEDIKAMENTE GEGEN ÜBERGEWICHT (AKTUALISIERT)	93
	GENERATIVE KI UND DEMOKRATIE (AKTUALISIERT)	99
	GROSSWÄRMEPUMPEN (AKTUALISIERT)	105
	UMWELTWIRKUNGEN DER RAUMFAHRT (AKTUALISIERT)	111
	DÜRRERESILIENZ (AKTUALISIERT)	117
3	AKTUELLE EPTA-STUDIEN	123

ZUSAMMENFASSUNG

Für diesen Bericht wurden folgende sechs neue sozio-technische Themen als besonders relevant für Österreich und das österreichische Parlament identifiziert:

Quantensensoren nutzen Quantenphänomene zur Messung von Schwerkraft, Magnetfeldern und Beschleunigung. Da Quantenzustände extrem empfindlich gegenüber Änderungen ihrer Umwelt sind, führt das zu deutlich präziseren Messergebnissen. Quantensensoren können damit genauere Navigation ohne Satelliten, die Erkundung des Erdreichs ohne Bohrungen und die Beobachtung kleinster Bewegungen in Zellen ermöglichen. Wer diese Fähigkeiten nutzen kann, könnte gegenüber anderen Akteuren einen signifikanten Vorteil haben, den sogenannten „Quantum Advantage“. Dadurch gewinnen Quantensensoren an geopolitischer und militärischer Brisanz. Quantensensoren könnten neue Formen der Überwachung ermöglichen. Da Quantensensoren große Vorteile, aber auch große Nachteile mit sich bringen können, besteht Bedarf an guter Begleitung und gesellschaftlicher Debatte. Da die Technologien weiter fortgeschritten sind als Quantencomputer und Quantenkommunikation, wäre dafür jetzt ein guter Zeitpunkt.

Quantensensoren

Demenz ist ein Sammelbegriff für verschiedene Erkrankungen, die das Gedächtnis, das Denkvermögen und die Fähigkeit zur Bewältigung alltäglicher Aufgaben beeinträchtigen. Österreichweit sind heute etwa 170.000 Menschen von Demenz betroffen und aufgrund der demographischen Entwicklung wird bis 2050 mit einem Anstieg auf etwa 230.000 Erkrankte gerechnet. Neue technisch-pharmakologische Entwicklungen versprechen Verbesserungen, etwa bei der Risikoeinschätzung und (Früh-)Diagnose mit Hilfe von Blutbiomarkern, künstlicher Intelligenz oder Smartphonedaten. Auch sind neue Medikamente auf Basis von monoklonalen Antikörpern in der EU zugelassen. Deren Wirksamkeit, sowie damit verbundene gesundheitspolitische Weichenstellungen stehen in der Kritik, weil sie nur für wenige Erkrankte in einer sehr frühen Phase anwendbar sind, den Verlauf bestenfalls um 30 % verlangsamen können und teuer sind.

Herausforderung Demenz

Der großflächige Einsatz synthetischer Pestizide hat in den vergangenen Jahrzehnten Ernteverluste durch Schädlinge deutlich reduziert. Gleichzeitig führte er jedoch zu erheblichen Umweltschäden, zum Verlust von Biodiversität und zu gesundheitlichen Belastungen für die Bevölkerung. Daher werden sichere und nachhaltige Alternativen dringend benötigt. Dazu zählen Biopestizide, die auf natürlichen Substanzen aus Tieren, Pflanzen, Mikroorganismen oder Mineralien basieren. Sie wirken in der Regel gezielter gegen Schädlinge und weisen eine geringere Toxizität für Nichtzieloorganismen sowie eine bessere Abbaubarkeit auf. Kurz- bis mittelfristig können Biopestizide synthetische Pestizide nicht vollständig ersetzen. Sie sind im Rahmen des *integrierten Pflanzenschutzes* in Kombination mit anderen Maßnahmen anzuwenden, etwa mechanischen Verfahren, dem Einsatz resistenter Sorten sowie dem Schutz und der Förderung von Nützlingen. Zentrale Herausforderungen liegen in der Entwicklung sicherer und nachhaltiger Biopestizide.

Biopestizide

Spätestens seit der rasanten Verbreitung generativer Künstlicher Intelligenz (KI) – sind die Arbeitsmarkteffekte des technologischen Wandels Gegenstand gesellschaftlicher Debatten. Zwar unterliegen wissenschaftliche Prognosen methodischen Unsicherheiten, aktuell werden jedoch Risiken insbesondere im Bereich der (qualifizierten) Dienstleistungsarbeit konstatiert (z. B. Deskilling). Außerdem könnte der vermehrte Einsatz von KI-Systemen Berufseinsteigenden den Karrierestart erschweren und Frauen überproportional betreffen. Übereinstimmung gibt es im Rahmen dieser Debatten, dass die tiefgreifenden Transformationen in Wirtschaft und Gesellschaft gestaltet werden müssen. Der Schwerpunkt liegt hier in gezielten qualifizierungs-, verteilungs- und sozialpolitischen Maßnahmen, um negativen Beschäftigungseffekten entgegenzuwirken und den digitalen Wandel sozialverträglich zu gestalten.

*KI und Arbeitsmarkt:
Deskilling und
Berufseinstieg*

Chronischer Schmerz ist ein weitverbreitetes Problem mit erheblichen gesellschaftlichen Folgen. Klassische Schmerztherapien umfassen medikamentöse und physikalische Verfahren, ergänzt durch psychotherapeutische und Lebensstil-Interventionen. Immer mehr rücken jedoch neue technologische Lösungsansätze in den Fokus. Diese reichen von neurotechnologischen Verfahren über Immersions-Technologien wie virtuelle Realität (VR) bis hin zu digitalen Selbstmanagement-Tools. In ersten Studien zeigen viele dieser Technologien vielversprechende Wirkungen. Dennoch ist die Erfolgsbilanz nicht einheitlich. Zudem stellen sich Fragen der Zugänglichkeit und der Integration in die Routineversorgung. Aus Sicht der Technikfolgenabschätzung bestehen Chancen für individuellere Therapien und eine Entlastung von Fachkräften, aber auch das Risiko verschärfter Ungleichheit und höherer Belastung durch Selbstverantwortung. Deshalb braucht es klare Qualitätsstandards, gerechte Zugangsregelungen und begleitende Evaluationen.

*Neue Technologien
gegen chronische
Schmerzen*

Die starke Zunahme an Satelliten sorgt zunehmend für Probleme im am meisten genutzte Bereich der Erdumlaufbahn. Er ist bereits fast zu voll mit Satelliten und Weltraummüll, und eine problemlose Nutzung wird immer schwieriger. Durch weitere Innovationen, etwa Sonnenstrom aus dem All, wird sich das Problem verschärfen. Die Überfüllung führt schon jetzt zu schädlicher Lichtverschmutzung und kostspieligen Ausweichmanövern. Asteroideneinschläge auch fern der Erde und Cyberangriffe könnten zu einer Kettenreaktion von Kollisionen führen. Diese könnten den Ausfall wichtiger Beobachtungs- und Steuersysteme zur Folge haben. Die beginnende Nutzung sehr niedriger Umlaufbahnen ist mit weniger Weltraumschrott verbunden, löst aber nicht die grundlegende Problematik. Eine umfassende internationale Zusammenarbeit und Regulierung, insbesondere auch der kommerziellen Akteure, ist dringlich.

Überfüllter Orbit

Gemäß der rollierenden 18-monatigen Aktualisierung wurden folgende zwölf sozio-technischen Themen aus den Berichten von Mai 2023 und November 2024 auf Überarbeitungsbedarf geprüft und entsprechend aktualisiert:

Aktualisierungen

- Intelligente Soziale Agenten gegen Einsamkeit?
- Phagen zur Therapie und Biokontrolle
- Self-Driving-Labs
- Textil-Recycling
- Grüner Beton
- Digitale Zwillinge im Gesundheitswesen
- Künstliche Gebärmuttersysteme und synthetische Embryonen

- Medikamente gegen Übergewicht
- Generative KI und Demokratie
- Großwärmepumpen
- Umweltwirkungen der Raumfahrt
- Dürre-resilienz

Darüber hinaus ergab die Analyse der Berichte, die von Mitgliedsinstitutionen des Netzwerks der Europäischen Parlamentarischen Technikfolgenabschätzungseinrichtungen (EPTA) seit November 2025 fertiggestellt wurden, dass folgende Themen für das österreichische Parlament besonders interessant erscheinen:

- Gesichtserkennung in der Polizeiarbeit
- Deepfakes: Rechtliche und gesellschaftliche Herausforderungen und Potenziale von Deepfakes
- Robotik im Zeitalter der KI
- Wiederverwertung & Entsorgung von Rotorblättern aus Windenergieanlagen
- Energiespeicher der nächsten Generation: Natrium-Ionen-Batterien im Fokus
- Was sind Datenzentren und wie nachhaltig sind sie?
- Quantentechnologien: Können sie Europas Dekarbonisierung vorantreiben?
- In Richtung verantwortungsvoller Biotech-Politik – Zuhören, Antworten und Zusammenarbeiten für sichere und verantwortungsvolle Biotechnologie
- Biologische Sicherheit und Biosicherheit: Ein Vergleich zwischen den USA und ausgewählten G20-Mitgliedstaaten
- Betrug und unrechtmäßige Zahlungen: Datenqualität und qualifizierte Fachkräfte sind entscheidend für die Nutzung der Vorteile KI
- Zellbasierte Landwirtschaft: Fleisch, Milch und Eier ohne Tiere
- Superintelligenz, Macht und Menschenrechte

*Aktuelle Studien
anderer
parlamentarischer
TA-Einrichtungen*

Zu all diesen Themen liegen aktuelle Endberichte von TA-Einrichtungen aus Deutschland, EU, Japan, Niederlanden, Norwegen, UK und den USA vor.

1 EINLEITUNG

Ein kontinuierliches Monitoring aktueller oder sich für die Zukunft abzeichnender internationaler wissenschaftlicher und technologischer Entwicklungen im gesellschaftlichen Kontext (sozio-technische Trends) ist die Grundlage, um zentrale Zukunftsthemen für die österreichische Politik zu identifizieren. In so einem Verfahren werden zudem wichtige wissenschaftlich-technische Treiber für Veränderungen sichtbar, die dem Parlament bei frühzeitiger Berücksichtigung erweiterte Handlungs- und Gestaltungsmöglichkeiten eröffnen. Ein Monitoring ist damit zugleich die Grundlage für vertiefende Studien im Bereich Foresight und Technikfolgenabschätzung (FTA). Auf dieser Basis wird es für die Politik möglich, später aufkommende, spezifische und tagesaktuell drängende Fragen in breiteren Zukunftsthemen zu verorten und die jeweilige Relevanz schneller und vorausschauend zu beurteilen. Die Ergebnisse des Monitorings unterstützen damit nicht nur eine vorausschauende FTI-Politik, sondern dienen mit ihrer TA-Komponente auch der Maximierung positiver und zugleich der Minimierung möglicher negativer Technikfolgen und sind damit auch für andere Politikfelder hochrelevant. Die potenziellen Anwendungsfelder von Zukunftstechnologien sind mit hohen Erwartungen und vielfältigen Versprechen verbunden. Während der Umsetzung zeigt sich aber oft, dass mit diesen Technologien auch Effekte einhergehen, die zunächst nicht augenscheinlich sind. Demgegenüber setzt die Foresight-Komponente auf die Gestaltbarkeit von Innovationen: Werden die Potenziale von Zukunftstechnologien frühzeitig in ihrer Bandbreite analysiert, eröffnen sich Gestaltungsspielräume für nachhaltige Innovationspfade.

Eine verantwortungsvolle und zukunftsorientierte Technikentwicklung legt insbesondere den Fokus auf zwei Dimensionen, die beide mit Foresight und TA bearbeitbar sind:

- zum einen auf den Handlungsspielraum und die Bedingungen, unter denen aus wissenschaftlich-technischen Potenzialen tatsächlich wirtschaftlich und gesellschaftlich relevante Innovationen werden;
- zum anderen auf die möglichen Folgen sozio-technischer Entwicklungen in Hinblick auf Gesundheit, Umwelt, Wirtschaft, Recht und Gesellschaft.

*Identifikation
zentraler
Zukunftsthemen für die
österreichische Politik*

*Unterstützung der
FTI-Politik und
Umgang mit
Technikfolgen
(Chancen und Risiken)*

*Zwei Dimensionen
verantwortungsvoller
und
zukunftsorientierter
Technikentwicklung*

1.1 VORGANGSWEISE

Der Monitoring-Prozess wird in den folgenden Schritten durchgeführt:

1. *Quellenauswertung*: Es werden einerseits Datenbanken in den Bereichen TA, Foresight, Zukunftsforschung, Wissenschafts- und Technikforschung sowie weitere einschlägige Quellen nach den üblichen wissenschaftlichen Standards qualitativ ausgewertet (siehe Abschnitt 1.2). Andererseits kommen auch datenbasierte Tools zur Trendsuche in großen Dokumentenbeständen (insb. RS-Lynx und TIM/EU) zur Anwendung. Zwischenergebnis ist jeweils eine Liste sozio-technischer Entwicklungen, die international auf der Agenda stehen oder gerade neu Beachtung finden.
2. *Themenselektion*:
 - a. *Basisanalyse*: Die Einträge in der Liste aus Schritt 1 werden in einem interdisziplinären, internationalen und interinstitutionellen Team (bestehend aus Wissenschaftler:innen des ITA-ÖAW) und des ITAS-KIT) analysiert und bewertet. Aus TA-Perspektive ist es besonders relevant, jene Themen zu identifizieren, die politischen Handlungsbedarf nach sich ziehen könnten. Das betrifft insbesondere sozio-technische Entwicklungen, die potenziell problematische Auswirkungen auf Gesundheit, Umwelt, Wirtschaft, Recht oder Gesellschaft haben, aber auch solche, deren Förderung zu positiven gesellschaftlichen Effekten führen können. Zwischenergebnis ist eine reduzierte Liste, die den nächsten Schritten unterworfen wird.
 - b. *Auswertung der parlamentarischen Agenda*: Beobachtung und Auswertung der bereits akkordierten und absehbaren Agenda des Parlaments für die folgenden 6–18 Monate.
 - c. *Relevanzprüfung*: Vor dem Hintergrund der mittelfristigen parlamentarischen Agenda (Schritt b) sowie unter Anwendung weiterer Kriterien, insb. Österreichbezug (siehe dazu Abschnitt 1.2), werden die identifizierten Themen einer Prüfung unterzogen, ob und in welcher Weise diese für das Parlament in absehbarer Zeit relevant werden könnten.
 - d. *Festlegung der zu bearbeitenden Themen*: Zwischenergebnis von Schritt c ist eine weiter eingeschränkte Liste von relevanten sozio-technischen Entwicklungen, die potenziell in den Monitoringbericht aufgenommen werden könnten. In einem interdisziplinären Workshop mit den im Prozess beteiligten Expert:innen wird die Liste multiperspektivisch bewertet, wobei hohe Relevanz und thematische Vielfalt des Monitoringberichts eine Rolle spielen. Insgesamt werden sechs Themen ausgewählt. Dabei spielt folgendes eine Rolle: die hohe Relevanz (Österreich & Parlament); der vorläufig festgestellte potenzielle Handlungsbedarf; inwieweit das Thema bereits untersucht scheint; ob die Entwicklungen als realistisch einzuschätzen sind; Vorhandensein bzw. Beginn einer wissenschaftlichen oder öffentlich Debatten dazu.
3. *Recherche und Vertiefung*: Die Auswahl der Themen hat auf Basis einer vorläufigen Recherche stattgefunden. Im nächsten Schritt werden alle ausgewählten Themen vertiefend recherchiert.
4. *Finalisierung aller Teile des Monitoringberichts* in redaktioneller und formaler Hinsicht.

Quellenauswertung

Themenselektion

1.2 RELEVANZKRITERIEN

Ziel des Monitorings ist es, den österreichischen Abgeordneten einen Überblick über relevante wissenschaftliche und technische sowie damit verbundene gesellschaftliche Entwicklungen zu geben. Relevanz ist zentral und wird folgendermaßen präzisiert:

1. *Inhaltliche Relevanz:* Zentral sind die Zukunftsorientierung und damit die Antizipation von Entwicklungen, die das Potenzial haben, die gesellschaftliche Entwicklung zukünftig maßgeblich zu beeinflussen. Insbesondere sind jene Technologiefelder für das Monitoring ausschlaggebend, die Beiträge zur Lösung großer und komplexer gesellschaftlicher Herausforderungen bieten. Eine als relevant einzuschätzende Entwicklung verweist auf eine Technologie, deren Entwicklungsoptionen einen mittleren Zeithorizont von ungefähr einem Jahrzehnt haben (kürzer oder länger je nach Feld). Grundlagenforschung wird dann berücksichtigt, wenn sich ein kurz- bis mittelfristiger parlamentarischer Handlungsbedarf abzeichnet. Technologie wird hier in einem umfassenden Sinne verstanden, bezieht sich also auch auf neue Anwendungen bestehender Technologien sowie Dienstleistungsinnovationen und beinhaltet die Dimension „sozialer“ Innovationen, die möglicherweise sogar bewusst auf weniger Technologie oder Alternativen dazu setzen. Diese Präzisierung bezieht sich auch auf die mit diesen wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen verbundenen gesellschaftlichen Entwicklungen. Fokus ist damit der Zusammenhang zwischen einerseits gesellschaftlichen, andererseits wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen. Beide sind wechselseitig voneinander abhängig: Wissenschaftliche und technische Entwicklungen bestimmen gesellschaftliche Entwicklungen entscheidend mit, so wie gesellschaftliche die wissenschaftlichen und technischen Entwicklungen.
2. *Österreichbezug:* Das zweite Auswahlkriterium ist angesichts des Adressaten österreichisches Parlament, ein spezifischer Bezug zu Österreich. Entweder kann ein Thema relevant sein, weil es an spezifische Kompetenzen in Österreichs F&E-Landschaft und Wirtschaft anknüpft, oder es kann ein konkreter Handlungsbedarf in Österreich aufgrund der hiesigen Gegebenheiten (sozial, wirtschaftlich, geographisch, gesellschaftlich) absehbar sein.
3. *Parlamentsarbeit:* Drittens geht es darum, jene Entwicklungen aufzuzeigen, die für die Arbeit des Parlaments direkt relevant sind oder zukünftig von besonders hoher Relevanz sein werden, vor allem im Hinblick auf dessen Zuständigkeiten. Es werden insbesondere auch jene Entwicklungen bevorzugt in den Blick genommen, die politikfeldübergreifend sind, also konkret mehrere Ausschüsse bzw. das Parlament insgesamt betreffen. Neben den Themen, die auf der kurz- und mittelfristigen Agenda des Parlaments stehen, werden außerdem Themen als besonders relevant eingestuft, bei denen sich bereits in absehbarer Zukunft konkreter politischer Handlungsbedarf abzeichnet, der aber von anderen Akteuren (Verwaltung, Sozialpartner, Zivilgesellschaft) nicht bzw. noch nicht wahrgenommen wurde.

Inhaltliche Relevanz

Österreichbezug

Parlamentsbezug

1.3 BASISQUELLEN FÜR DIESE BERICHTSVERSION

Aus dieser Bestimmung der parlamentarischen Relevanz ergeben sich die in das Monitoring einzubeziehenden Quellen und die bei der Analyse anzuwendenden Methoden. Mit den zur Verfügung stehenden Ressourcen ist eine Primärerhebung zukünftiger wissenschaftlicher und technischer Entwicklungen (Patentanalyse, bibliographische Methoden, breit angelegte Befragungen von Schlüsselakteuren etc.) nicht realisierbar. Daher wird eine Sekundärauswertung bislang verstreuter, einschlägiger Quellen vorgenommen. Ausgehend von den oben erfolgten inhaltlichen Präzisierungen des Gegenstandes werden daher folgende Quellen in die Auswertung einbezogen:

Sekundärauswertung

- A. *Auswahl wissenschaftlicher Fachzeitschriften*, insbesondere: Research Policy; Technological Forecasting and Social Change; Futures; foresight; Zeitschrift für Zukunftsforschung; proZukunft; European Journal of Futures Research; Futures Research Quarterly; World Futures Review; TATuP – Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis; Nature; Science; Scientific American; IEEE Spectrum.
- B. *Proceedings von Konferenzen einschlägiger wissenschaftlicher Netzwerke*, insbesondere: European Forum for Studies of Policies for Research and Innovation“ (Eu-SPRI Forum); Future-Oriented Technology Analysis (FTA); European Association for the Study of Science and Technology (EASST); The Society for Social Studies of Science (4S); Netzwerk Technikfolgenabschätzung (NTA); European Parliamentary Technology Assessment (EPTA); European Academies Science Advisory Council (EASAC); International Network of Government Science Advice (INGSA); Schweizerische Vereinigung für Zukunftsforschung (swissfuture); European Technology Assessment Conference (ETAC) and globalTA series.
- C. *Zukunftstrends und Megatrends-Publikationen bekannter internationaler Akteure*, insbesondere: Meta-Council on Emerging Technologies (World Economic Forum); OECD Science, Technology and Innovation Outlook; MetaScan3 Emerging Technologies; Office for Science UK: Technology and Innovation Futures; EC-JRC Megatrends; Standardization Opportunities from Horizon Scanning der internat. Normungsinstitute; acatech; World Economic Forum; UBA; UNCTAD, ITU.
- D. *TA- und Foresight-Datenbanken*, insbesondere: Projekt- und Publikationsdatenbank des EPTA-Netzwerks; Publikationsdatenbank des NTA openTA; die Open Repository Base on International Strategic Studies; Knowlege4policy-Plattform des EU-Kompetenzzentrums für Foresight; Statista, ESPAS-Orbis (European Strategy and Policy Analysis System).
- E. *Informelle Quellen*, insbesondere: Wahrnehmungen & aktuelle Diskussionen der Teammitglieder in ihren einschlägigen Netzwerken; Erfahrungen aus Horizon-Scanning Projekten der Teammitglieder; Blogs, Websites, Newsletter (z. B. sciencemag.org, nature.com, SwissCognitive, OECD STI News, tech2b); Beobachtung einschlägiger Medienplattformen (z. B. TED-Talks, futurezone, APA Science, VDI-Publikationen¹); Beobachtung der EU-Ausschreibungen Horizon Europe.

¹ vdi.de/ueber-uns/presse/publikationen.

F. *Quellen mit spezifischem Österreichbezug*, insbesondere: Forschungs- und Technologiebericht der Bundesregierung; Laufende Ausschreibungen des BMVIT (Klima- und Energiefonds, Fabrik der Zukunft etc.); Austrian Cooperative Research (ACR) Innovationsradar.

Methodisch basiert die Auswertung der Quellen auf systematischer Dokumentenanalyse durch einschlägige Expert:innen des ITA (ÖAW) und des ITAS (KIT) sowie durch iterative, interdisziplinäre Diskussionen. Darüber hinaus kommen auch teil-automatisierte, KI-gestützte Auswertungen von digitalen Quellen zur Anwendung:

Methode

G. *KI-gestützte quantitative Auswertung großer Textdatenmengen*: In Ergänzung der qualitativen Quellenauswertung wird die Software RS-Lynx² verwendet, die auf Grundlage großer Mengen an webbasierten Informationsquellen mit Hilfe von Künstlicher Intelligenz Trends aufspüren kann. Weiters wird die Textmining-Plattform TIM Open Access³ der EU-Kommission eingesetzt.
Genereller Umgang mit KI-Tools: Für den Bericht wird KI weder zur vollautomatisierten Textproduktion noch zur Themenkonzeption eingesetzt. Verschiedene KI-Anwendungen werden zur Textverbesserung (language editing), zur Übersetzung und zur Unterstützung bei der Literaturrecherche eingesetzt. Die Autorinnen und Autoren tragen die volle Verantwortung für die Texte.

KI

Als spezifische Basisquellen für diese Berichtsversion dienten folgende Sekundärquellen:

*Für diesen Bericht
spezifisch
ausgewertete Quellen*

- Acatech-Publikationen⁴
- Dubai Future Foundation – The global 50 – 2025 Report. Special Edition – Global Solutions and Share Futures⁵
- EU Publications Office⁶
- EDPS – Techsonar 2026⁷
- Futures4Europe.eu⁸
- Gartner Top 10 Strategic Technology Trends 2026⁹
- GESDA – Science Breakthrough Radar 2026¹⁰
- Deloitte Tech Trends 2026¹¹
- MIT 10 Breakthrough Technologies 2026¹²

² radiosphere.de/medienmonitoring-plattform-rs-lynx/; Inhalte: Social Media, Presse (print/online), TV/Radio, Podcasts, PDFs (konfigurierbar).

³ knowledge4policy.ec.europa.eu/text-mining/tim_oa_en; Inhalte: OA Publikationen/ Semantic Scholar, weltweite Patentanträge/Patstat, FP5 bis Horizon Projekte (Cordis).

⁴ acatech.de/publikationen/.

⁵ dubaifuture.ae/wp-content/uploads/2025/12/Global-50-Special-Edition-ENG.pdf.

⁶ op.europa.eu/en.

⁷ edps.europa.eu/system/files/2025-11/25-11-25_techsonar-2025-2026_en.pdf.

⁸ futures4europe.eu.

⁹ gartner.com/en/articles/top-technology-trends-2026.

¹⁰ radar.gesda.global/current-edition.

¹¹ deloitte.com/us/en/insights/topics/technology-management/tech-trends.html.

¹² technologyreview.com/2026/01/12/1130697/10-breakthrough-technologies-2026/.

2 AKTUELLE SOZIO-TECHNISCHE ENTWICKLUNGEN

Die folgenden sechs sozio-technischen Entwicklungen wurden im Berichtszeitraum November 2025 bis Mai 2026 als besonders relevante und aktuelle Themen für das Parlament und für Österreich identifiziert. Die Auswahl zeigt ein breites Spektrum an Themen mit weitreichenden sozialen, ökonomischen, politischen und ökologischen Auswirkungen. In all diesen Bereichen hat Österreich Kompetenzen vorzuweisen, die aus Sicht der Forschungs-, Innovations- und Technologiepolitik wirtschaftliche Entwicklungspotenziale darstellen. Zugleich zeigen diese sozio-technischen Entwicklungen neuen parlamentarischen Handlungsbedarf als auch parlamentarische Gestaltungsspielräume – jeweils in einem breiteren gesamtgesellschaftlichen Kontext.

*Berichtszeitraum
November 2025
bis Mai 2026*

Neue Themen Mai 2026

6 neue Themen

Quantensensoren

Herausforderung Demenz

Biopestizide

KI und Arbeitsmarkt: Deskillung und Berufseinstieg

Neue Technologien gegen chronische Schmerzen

Überfüllter Orbit

Aktualisierte Themen, urspr. aus November 2024 und Mai 2023

*12 aktualisierte
Themen*

Intelligente Soziale Agenten gegen die Einsamkeit?

Phagen zur Therapie und Biokontrolle

Self-Driving-Labs

Textil-Recycling

Grüner Beton

Digitale Zwillinge im Gesundheitswesen

Künstliche Gebärmutterssysteme und synthetische Embryonen

Medikamente gegen Übergewicht

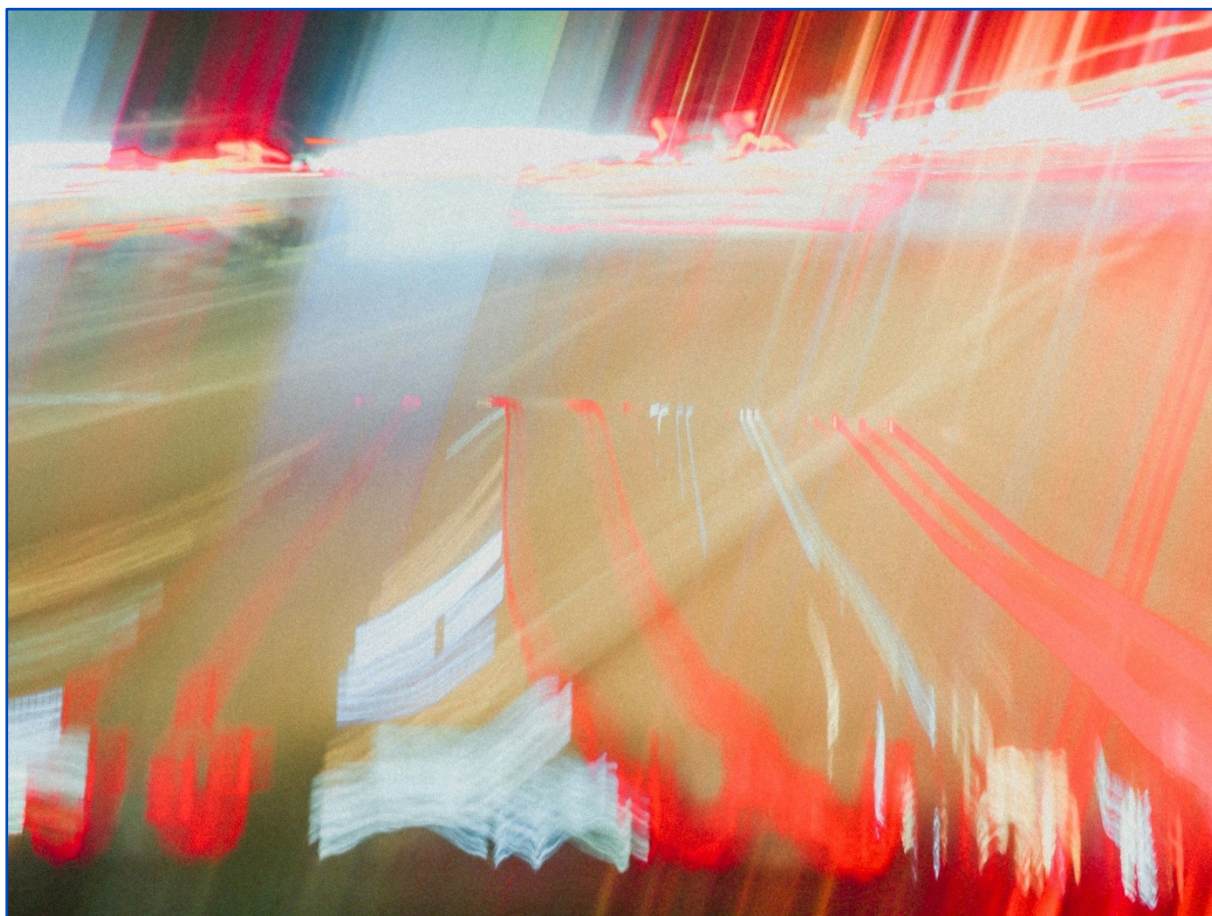
Generative KI und Demokratie

Großwärmepumpen

Umweltwirkungen der Raumfahrt

Dürresilienz

QUANTENSSENSOREN



© CC0 (Brandon Griggs)

ZUSAMMENFASSUNG

Quantensensoren nutzen Quantenphänomene zur Messung von Schwerkraft, Magnetfeldern und Beschleunigung. Da Quantenzustände extrem empfindlich gegenüber Änderungen ihrer Umwelt sind, führt das zu deutlich präziseren Messergebnissen. Quantensensoren können damit genauere Navigation ohne Satelliten, die Erkundung des Erdreichs ohne Bohrungen und die Beobachtung kleinster Bewegungen in Zellen ermöglichen. Wer diese Fähigkeiten nutzen kann, könnte gegenüber anderen Akteuren einen signifikanten Vorteil haben, den sogenannten „Quantum Advantage“. Dadurch gewinnen Quantensensoren an geopolitischer und militärischer Brisanz. Quantensensoren könnten neue Formen der Überwachung ermöglichen. Da Quantensensoren große Vorteile, aber auch große Nachteile mit sich bringen können, besteht Bedarf an guter Begleitung und gesellschaftlicher Debatte. Da die Technologien weiter fortgeschritten sind als Quantencomputer und Quantenkommunikation, wäre dafür jetzt ein guter Zeitpunkt.

*Deutlich präzisere
Messungen*

*Viele Chancen
und Risiken*

*Zeitpunkt für breite
gesellschaftliche
Debatte günstig*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Quantensensoren sind ein Teilbereich der *Quantentechnologie*. Wie Quantenkommunikation und -computing nutzen solche Sensoren Phänomene der Quantenmechanik – in diesem Fall, um Messungen mit einer Präzision zu ermöglichen, die mit herkömmlichen Methoden nicht erreichbar ist. Sie eignen sich insbesondere zur Messung von Zeit, Temperatur, Entfernungen, Schwerkraft und elektromagnetischen Feldern (GAO, 2025). Damit sind sie für vielfältige Einsatzfelder relevant, von Industrie über Medizin bis hin zu Wissenschaft und Militär.

Quantenphänomene zur Messung nutzen

Quantensensoren machen sich die Eigenschaft zunutze, dass Quantenzustände von Partikeln extrem empfindlich auf Änderungen ihrer Umgebung reagieren (Bongs et al., 2023). Dank der extremen Sensitivität sind kleinere und genauere Atomuhren, durch Nebel und um die Ecke sehende Kameras, Sensoren zur Bodenerkundung, Bildgebung in der Medizin und zur Navigation ohne Satellitennavigationssysteme wie GPS möglich (Bongs et al., 2023; GAO, 2025; Schmidt et al., 2025). Im Vergleich zu anderen Quantentechnologien sind Quantensensoren in der Entwicklung weit fortgeschritten: Es gibt viele funktionierende Sensoren in Laboren, manche Anwendungen, wie etwa Photonendetektoren und Atomuhren, sind bereits kommerziell erhältlich (Bongs et al., 2023; OECD, 2025).

Extrem empfindliche Sensoren

Doch wie lassen sich diese Sensoren praktisch vorstellen? Wie erwähnt, reagieren Quantenphänomene extrem sensibel, z. B. auf die Schwerkraft und Magnetfelder – auch jenes der Erde. Diese Sensoren reagieren damit auch auf unterschiedliche Bodenzusammensetzungen: Unterirdische Wasserreservoirs und -ströme, Ressourcenvorkommen sowie Höhlen und Tunnel verändern die Schwerkraft minimal. Mit Quantensensoren können diese Unterschiede wahrgenommen werden und z.B. Vulkanaktivität, Wasserhaushalt, Tunnel, archäologische Stätten und Mineralvorkommen erkannt und gefunden werden – und das ohne Probebohrungen und Grabungen (GAO, 2025; Schmidt et al., 2025).

Schwerkraft, Magnetfelder für unterirdische Messungen

Eine andere vielversprechende Anwendung ist die Navigation: Mobile Quantennavigationssensoren können Positionsänderungen präzise nachverfolgen, indem sie minimale Änderungen der Schwerkraft, der Magnetfelder und der Beschleunigung tausendmal genauer erkennen als herkömmliche Methoden (Bongs et al., 2023). Bereits heute können die Sensoren etwa in Smartphones und Sportuhren mithilfe von Beschleunigungssensoren, Kompassen und hochentwickelten Algorithmen erkennen, wie man sich bewegt – damit wird beispielsweise Stiegensteigen oder Aufstehen aus dem Sitzen erkannt. Mit Quantensensoren ließe sich die bisherige Messgenauigkeit signifikant verbessern. Es wurde theoretisch gezeigt, dass sie, eingebettet in eine entsprechende neue Infrastruktur, als Navigationssystem eine präzisere Alternative zum traditionellen GPS sein könnten (Li et al., 2026) – oder eine Ergänzung dazu, falls GPS-Signale gestört oder nicht empfangbar sind (z. B. wegen *überfülltem Orbit*), sei es aufgrund gezielter Störungen (*Jamming*), Wetterphänomenen, der Topografie oder aufgrund der Abschirmung durch Wasser.

Quantensensoren zur Navigation ohne Satelliten

Auch in der Medizin gibt es große Hoffnungen, dass bildgebende Verfahren durch Quantensensorik präziser werden können. Magnetresonanztomografie (MRT) könnte etwa durch neue Quantentechnologien 10.000-fach genauer werden, und durch

Bildgebung in der Medizin

die Erkennung winziger Magnetfelder ließen sich Stoffwechselprozesse im Herz-Kreislauf-System besser diagnostizieren.¹ Aber auch kleinste Bewegungen in Zellen könnten damit sichtbar gemacht werden (Ramelet, 2026).

Im Umwelt- und Klimabereich könnten Quantensensoren für genaueres Umweltmonitoring eingesetzt werden – um z. B. Luftverschmutzung und Treibhausgasemissionen besser zu erkennen. Damit könnten sie dazu beitragen, bessere Grundlagen für Klimaprognosen, Risikoszenarien und Adaptionsstrategien bereitzustellen (Ferreira & Lagercrantz, 2026). Bei der Überwachung von Stromnetzen und anderen Infrastrukturen können Quantensensoren wichtige Funktionen übernehmen (z. B. die Temperaturüberwachung in den Netzen). Auch das Auffinden vielversprechender geothermischer Energiequellen lässt sich durch Quantensensoren vereinfachen (Ferreira & Lagercrantz, 2026).

*Luftverschmutzung
und Treibhausgase
erkennen*

Trotz vielversprechender Fortschritte und des großen Anwendungsspektrums stehen Quantensensoren noch vor einigen Herausforderungen, die den breiten Einsatz behindern. Teils ergeben sie sich aus der hochsensiblen Natur von Quantenphänomenen, die Quantensensoren so präzise, aber eben auch anfällig gegenüber Störungen und Rauschen machen (Matisek et al., 2025). Oft benötigen sie weiters hochspezialisierte Gerätschaften, die teils extremen Strombedarf haben, teils hochpräzise optische Instrumente nutzen oder Kryotechnik zur Herstellung ausreichend niedriger Temperaturen voraussetzen (Oh et al., 2024; Schmidt et al., 2025). Damit sind viele Aspekte der Quantensensorik (wie bei anderen Quantentechnologien auch) eng verbunden mit Fortschritten in anderen Technologiebereichen (Schmidt et al., 2025) und weitere werden notwendig sein, um die Sensoren ausreichend klein und robust zu konstruieren, damit sie außerhalb von Laboren und insbesondere mobil nutzbar sind.

*Herausforderungen
für den praktischen
Einsatz*

Aufgrund ihrer um mehrere Größenordnungen präziseren Messungen können Quantensensoren disruptive Veränderungen auslösen, sobald sie außerhalb von Laboren in größerem Umfang einsatzfähig sind. Für Akteure mit Zugang zu diesen neuen Technologien entsteht ein sog. Quantum Advantage mit schlagartig auftretenden Vorteilen (Schmidt et al., 2025). Teilweise werden in diesem Kontext Analogien zu ChatGPT und anderen großen Sprachmodellen gezogen, deren großflächige Verbreitung innerhalb kurzer Zeit zu weitreichenden Veränderungen auf vielen Ebenen geführt hat, da genuin neuartige Möglichkeiten entstanden sind. Dabei wird die Verfügbarkeit von Quantentechnologien mutmaßlich nicht im gleichen Maßstab wie generative KI gewährleistet sein, womit der Vorteil wenigen Akteuren vorbehalten bleiben wird. Auch handelt es sich bei Quantensensoren eher nicht um eine Technologie, die sich an Endverbraucherinnen und Endverbraucher richtet (Schmidt et al., 2025).

*Disruptive neue
Möglichkeiten*

Besonders heikel können die Auswirkungen von Quantensensoren im militärischen Bereich sein (Brooksby et al., 2025; Matisek et al., 2025): Die Aufklärung könnte signifikante Fortschritte machen, etwa indem militärisches Material (Raketen, U-Boote) und Infrastruktur (Bunker, Tunnelsysteme) leichter lokalisiert werden könnten. Hochsensible Sensoren könnten jedoch auch Seitenkanalangriffe auf (militärische) Kommunikation in neuem Ausmaß ermöglichen, also nicht das

*Viele Anwendungen im
militärischen Bereich*

¹ iaf.fraunhofer.de/de/forscher/quantensysteme/quantensensorik/asteriqs.html.

direkte Abfangen von Daten, sondern den Rückschluss darauf, beispielsweise anhand von Mustern im Energieverbrauch (Schmidt et al., 2025). Darin zeigt sich auch die Dual-Use-Natur vieler Quantensensoren.

Aus der Sorge vor einem Quantum Advantage, insb. im militärischen Bereich, können Quantensensoren auch auf geopolitischer Ebene an Relevanz gewinnen (Schmidt et al., 2025). Ähnlich wie aktuell ein Rennen zwischen China und den USA um die Vorherrschaft im Bereich der KI stattfindet, könnte es auch im Bereich der Quantentechnologie dazu kommen. Damit würden Lieferketten, Exportkontrollen, technische Souveränität und internationale Kooperationen an Brisanz gewinnen. Wie oben angeführt, bedürfen Quantensensoren häufig hochspezialisierter Geräte und Materialien, deren Verfügbarkeit begrenzt ist. Zum Beispiel sind für manche Quantensensoren notwendige hochwertige Diamanten nur schwer erhältlich – sogar den USA fehlen diesbezüglich verlässliche Quellen (GAO, 2025). Auch droht eine sog. „Quantum Divide“, da der Zugang zu Quantentechnologien global ungleich verteilt ist – auch Europa könnte hier ins Hintertreffen geraten.

*Geopolitische
Relevanz*

Die neuen Möglichkeiten durch Quantensensoren können auch jenseits militärischer Einsatzbereiche eine Herausforderung für die Menschenrechte darstellen und zu neuen Formen der (staatlichen) Überwachung führen (Krishnamurthy, 2022; Ramelet, 2026; Schmidt et al., 2025): Einerseits könnte mithilfe von Quantensensoren durch Objekte (Kleidung, Gebäude) hindurchgesehen werden.² Andererseits könnten hochsensitive Sensoren ermöglichen, anhand akustischer Signaturen Einzelpersonen im öffentlichen Raum zu identifizieren oder Gehirnaktivität aus der Ferne zu beobachten.

*Herausforderungen
für Menschenrechte*

Sollten Quantentechnologien zunehmend kommerziell erfolgreich und damit wirtschaftlich relevant werden, stellen sich weitere gesellschaftliche Herausforderungen und Gelegenheiten. Erstens setzen viele Berufe, die für Quantentechnologien (und damit auch -sensoren) relevant sind, ein hohes Ausbildungsniveau voraus. So haben sowohl die Gründerinnen und Gründer von Firmen als auch deren Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter überdurchschnittliche Qualifikationsniveaus, oft auf dem Niveau eines Doktorats (European Patent Office & OECD, 2025). Daher ist ausreichend qualifiziertes Personal ein wichtiger Faktor, um die Entwicklung von Quantensensoren voranzubringen (Brooksby et al., 2025).

*Hohe Qualifikationen
für Berufe im
Quantenbereich
gefordert*

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Österreich verfügt über ein starkes Forschungsökosystem im Bereich der Quantenphysik und Quantentechnologie: Mit dem Vienna Center for Quantum Science and Technology,³ dem FWF-Exzellenzcluster Quantum Science Austria⁴ in Inns-

*Lebendiges
Quanten-Ökosystem
in Österreich*

² Bereits heute erlauben sogenannte *WLAN-Schatten* die Überwachung von Personen und Objekten, da je nach Material (inkl. lebender Körper mit hohem Wasseranteil) WLAN-Wellen in ihrer Ausbreitung beeinträchtigt werden.

³ vcq.quantum.at.

⁴ quantumscience.at.

bruck, Anton Zeilinger als Träger des Physik-Nobelpreises sowie gezielten Förderungen in der Grundlagen-⁵ und angewandten Forschung⁶ besteht bereits eine solide Grundlage für eine aktive Rolle Österreichs bei der Entwicklung von Quantensensoren und damit für internationale Sichtbarkeit und Marktführerschaft. In Wien wurde kürzlich der Startschuss für das Quantum Technology Center gegeben,⁷ das Industrie, Start-ups und Forschung zusammenbringen soll.

Im Rahmen der Industriestrategie 2035 wurde „Quantentechnologie und Photonik“ als eine der neun Schlüsseltechnologien ausgewählt.⁸ Das zeigt, dass Quantentechnologie auf höchster politischer Ebene Sichtbarkeit genießt.

Industriestrategie

Besonders im Hinblick auf Menschenrechte, militärische Anwendungen und die oben angeführte Gefahr einer internationalen Quantum Divide stellt sich die Frage, ob gesetzliche Maßnahmen notwendig sind und in welchen Bereichen: Exportkontrollen, internationale Kooperationen und Governance-Mechanismen, verstärkte Verankerung in Lehrplänen (sowohl im sekundären wie im tertiären Bildungssektor) zum Ausbau der Quantenkompetenz sowie strategische Investitionen zur Sicherstellung technologischer Souveränität sind nur eine Auswahl möglicher Tätigkeitsfelder (Ramelet, 2026; Schmidt et al., 2025).

*Governance
notwendig?*

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Wie oben ausgeführt, bergen Quantensensoren vielfältige Chancen, aber auch gravierende Risiken. In einer kürzlich veröffentlichten Technikfolgenstudie des ITAS für Deutschland wurde mehrmals – auch explizit aus der Quanten-Community – der Bedarf an einer kontinuierlichen Begleitung der quantentechnologischen Entwicklungen hervorgehoben (Schmidt et al., 2025). Unter anderem werden oft Parallelen zu Gentechnik, Nanotechnologien und KI gezogen: Es handelt sich dabei um hochkomplexe Technologien, deren Mechanismen schwer an Alltagsverständnis anknüpfen. Das wiederum kann einerseits zu großer Skepsis und Unverständnis führen, andererseits aber auch Mythen und Hype befeuern.

*Stimmen aus der
Community für
kontinuierliche
Begleitung*

In Verbindung mit der Einschätzung, dass Quantensensoren sich derzeit in der Phase der Kommerzialisierung befinden, scheint jetzt ein guter Zeitpunkt dafür zu sein, eine strukturierte gesellschaftliche Debatte und Begleitung in Form einer umfangreichen Technikfolgenabschätzung zu starten – ähnlich dem Projekt NanoTrust für Nanotechnologien.⁹

*Günstiger Zeitpunkt
für Technikfolgen-
abschätzung*

⁵ Etwa mit Mitteln des Aufbau- und Resilienzplans NextGenerationEU durch den FWF: [fwf.ac.at/foerdern/foerderportfolio/themenfoerderungen/quantum-austria](https://www.fwf.ac.at/foerdern/foerderportfolio/themenfoerderungen/quantum-austria).

⁶ [ffg.at/quantenforschung-und-technologie](https://www.fhg.at/quantenforschung-und-technologie).

⁷ [wien.gv.at/wirtschaft/quantum-technology-center-neu-marx](https://www.wien.gv.at/wirtschaft/quantum-technology-center-neu-marx).

⁸ [bmwet.gv.at/Themen/industriestrategie.html](https://www.bmwet.gv.at/Themen/industriestrategie.html).

⁹ [oeww.ac.at/ita/nanotruster](https://www.oeww.ac.at/ita/nanotruster).

ZITIERTE LITERATUR

- Brooksby, A., et al. (2025). A conceptual framework for describing the future impacts of quantum sensors to national security. *Academia Quantum*, 2(1). academia.edu/3064-979X/2/1/10.20935/AcadQuant7590.
- Bongs, K., Bennett, S., & Lohmann, A. (2023). Quantum sensors will start a revolution – If we deploy them right. *Nature*, 617(7962), 672–675. doi.org/10.1038/d41586-023-01663-0.
- European Patent Office, & OECD. (2025). *Mapping the global quantum ecosystem*. European Patent Office. doi.org/10.65216/20251217-0001.
- Ferreira, V. G., & Lagercrantz, O. (2026). *Quantum technologies: Can they boost the EU's decarbonisation?* (PE 774.707). European Parliamentary Research Service. [europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI\(2026\)774707](https://europarl.europa.eu/thinktank/en/document/EPRS_BRI(2026)774707).
- GAO. (2025). *Quantum Sensors* (GAO-25-107876; Science & Tech Spotlight). GAO Science, Technology Assessment, and Analytics. gao.gov/assets/gao-25-107876.pdf.
- Krishnamurthy, V. (2022). Quantum technology and human rights: An agenda for collaboration*. *Quantum Science and Technology*, 7(4), 044003. doi.org/10.1088/2058-9565/ac81e7.
- Li, H., et al. (2026). Quantum sensors for enhanced positioning and navigation: A comprehensive review. *GPS Solutions*, 30(1), 62. doi.org/10.1007/s10291-026-02030-y.
- Oh, E., et al. (2024). *A Perspective on Quantum Sensors from Basic Research to Commercial Applications* (arXiv:2407.00689). arXiv. doi.org/10.48550/arXiv.2407.00689.
- Ramelet, L. (2026). *Gesellschaftliche Herausforderungen der Quantentechnologien: Zukunftsfragen für die Schweiz (Themenpapier)* [Themenpapier]. TA-SWISS. doi.org/10.5281/zenodo.18232151.
- Schmidt, A., et al. (2025). *Technikfolgenabschätzung für die Quantentechnologien*. doi.org/10.5445/IR/1000185698.

HERAUSFORDERUNG DEMENZ



© CC0 (Vitaly Gariev)

ZUSAMMENFASSUNG

Demenz ist ein Sammelbegriff für verschiedene Erkrankungen, die das Gedächtnis, das Denkvermögen und die Fähigkeit zur Bewältigung alltäglicher Aufgaben beeinträchtigen. Österreichweit sind heute etwa 170.000 Menschen von Demenz betroffen und aufgrund der demographischen Entwicklung wird bis 2050 mit einem Anstieg auf etwa 230.000 Erkrankte gerechnet. Neue technisch-pharmakologische Entwicklungen versprechen Verbesserungen, etwa bei der Risikoeinschätzung und (Früh-)Diagnose mit Hilfe von Blutbiomarkern, künstlicher Intelligenz oder Smartphonedaten. Auch sind neue Medikamente auf Basis von monoklonalen Antikörpern in der EU zugelassen. Deren Wirksamkeit, sowie damit verbundene gesundheitspolitische Weichenstellungen stehen in der Kritik, weil sie nur für wenige Erkrankte in einer sehr frühen Phase anwendbar sind, den Verlauf bestenfalls um 30 % verlangsamen können und teuer sind.

*Neue Ansätze
bei Früherkennung,
Diagnose und
Behandlung von
Demenz*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Demenz ist ein Sammelbegriff für verschiedene Erkrankungen, die das Gedächtnis, das Denkvermögen und die Fähigkeit zur Bewältigung alltäglicher Aufgaben beeinträchtigen (WHO, 2025). Verschiedene Krankheiten und Hirnverletzungen können Demenz verursachen. Es gibt dabei oft keine klaren Grenzen zwischen verschiedenen Formen von Demenz und auch gemischte Formen sind häufig (WHO, 2025). Alzheimer ist die häufigste Ursache (60-70 %) für Demenz und den damit einhergehenden fortschreitenden Verlust von Gedächtnis- und anderen kognitiven Leistungen (B. Zhang et al., 2025). Das Risiko für eine Alzheimererkrankung ist zu 60-80 % genetisch mitbedingt; mittlerweile sind mehr als 40 mit dem Alzheimerisiko assoziierte Gene bekannt (Scheltens et al., 2021). Die genauen Ursachen für Alzheimerdemenz sind bisher nicht genau geklärt. Forschende schätzen aber, dass die Hälfte aller Erkrankungen weltweit auf veränderbare Risikofaktoren zurückzuführen ist. Die häufigsten Risikofaktoren sind laut WHO (2025): Alter (65+), Bluthochdruck, Diabetes, Übergewicht, Rauchen, übermäßiger Alkoholkonsum, körperliche Inaktivität, soziale Isolation und Depression. Eine neue Studie belegt auch den Zusammenhang zwischen einer langfristigen Exposition gegenüber Luftverschmutzung und der dritthäufigsten Form von Demenz (Lewy-body) (X. Zhang et al., 2025).

Vielversprechende pharmakologische Behandlungen gegen Alzheimer-Demenz befinden sich in fortgeschrittenen Phasen klinischer Studien. Die Hauptstrategien zielen auf die Entfernung von Proteinablagerungen und das Bekämpfen von Entzündungen ab (Scheltens et al., 2021). Mehrere Longitudinalstudien bestätigen einen Zusammenhang verschiedener Blutbiomarker¹ mit dem Beginn von Alzheimer-Demenz bei älteren Menschen, die noch keine kognitiven Beeinträchtigungen zeigen. Diese Ergebnisse sind vielversprechend für die Demenzvorhersage und Früherkennung, auch weil sie im Vergleich zu anderen Methoden kosteneffizient und damit leichter skalierbar sind. Allerdings sind auch noch einige Zusammenhänge unklar: So können Personen mit erhöhten Biomarkern, ihr Leben lang asymptomatisch bleiben (Valletta et al., 2025).

Auch die *neuen Medikamente gegen Übergewicht* könnten neuroprotektive Effekte bei an Alzheimer erkrankten Diabetespatientinnen und -patienten haben – die Forschung dazu ist jedoch noch im Frühstadium und nicht verlässlich (da Silva et al., 2026). Laut Hersteller von Semaglutid konnte sich die Hoffnung auf eine statistisch signifikante Verlangsamung von Alzheimer in zwei großangelegten Studien nicht bestätigen.²

Eine gängige Hypothese macht die Anreicherung von Amyloid-Beta-Proteinen im Gehirn und die daraus folgende Toxizität für Nervenzellen für Alzheimer verantwortlich. Ein breites Forschungsfeld beschäftigt sich seit den 1980er-Jahren mit betreffenden Wirkmechanismen und Therapieansätzen (B. Zhang et al., 2025).

Demenz und Alzheimer

Neue pharmakologische Entwicklungen:

Demenzvorhersage mit Blut-Biomarkern

Amyloid-Beta-Ablagerungen

¹ Amyloid-beta, Tau, NfL, GFAB.

² novonordisk.com/content/nncorp/global/en/news-and-media/news-and-ir-materials/news-details.html?id=916462.

Einiges Aufsehen haben die zwei neu zugelassene Medikamente Leqembi (Wirkstoff *Lecanemab*, 2024)³ und Kisunla (Wirkstoff *Donanemab*, 2025)⁴ in der EU erregt. Beides sind monoklonale Antikörper zur Reduzierung von Amyloid-Beta-Ablagerungen, ein zentraler Biomarker für Alzheimer-Demenz. Sie sind seit 2023 in den USA zugelassen und werden bei Menschen mit leichten kognitiven Einschränkungen und leichter Demenz eingesetzt. 2025 wurde in Österreich erstmals eine Therapie mit Lecanemab durchgeführt.⁵ Die Antikörper helfen dem Immunsystem, die Ablagerungen zu erkennen und abzubauen. Dadurch soll das Fortschreiten der Erkrankung um etwa 30 % verringert werden.⁶ So könnte ein akutes Stadium der Erkrankung bis zu zehn Jahre hinausgezögert werden, was bei sehr alten Menschen bedeutet, dass dieses Stadium vor ihrem Tod aufgrund anderer Ursachen bestenfalls nicht mehr eintritt. Damit kann ein potenziell hoher Gewinn für die Lebensqualität der Betroffenen im letzten Lebensabschnitt erzielt werden. Weitere ähnliche Wirkstoffe befinden sich in Entwicklung.

Monoklonale Antikörper – neue Wirkstoffe Lecanemab und Donanemab in EU zugelassen

De facto ist das Medikament nur für relativ wenige Menschen einsetzbar, da es nur in einer sehr frühen Phase der Erkrankung Erfolg verspricht – durch langsame, nicht flächendeckende Früherkennung ist diese Phase bei vielen Neudiagnostizierten schon überschritten. Das Gehirn kann mitunter jahrelang Schädigungen kompensieren, wobei andere Regionen die Funktion der geschädigten Areale übernehmen. Diese neuronale Reserve führt oft dazu, dass verstärkte Symptome erst dann auftreten, wenn die Erkrankung bereits weit fortgeschritten ist. Eine Behandlung mit Lecanemab/Donanemab ist dann nicht mehr möglich.

Späte Erkennung und lange Wartezeiten auf notwendige Tests

Einige Untersuchungen, die für eine Alzheimer-Diagnose notwendig sind, sind nicht breit verfügbar, etwa PET-Scans (Positronen-Emissions-Tomographie) oder Rückenmarksflüssigkeitsuntersuchungen. Dementsprechend lang sind die Wartezeiten. Zusätzliche Verzögerungen entstehen durch Wartezeiten auf einen Gentest, da die Behandlung mit den neuen Medikamenten für Personen mit zwei ApoE4-Genen lebensgefährliche Nebenwirkungen, wie schwere Hirnschwellungen und -blutungen, haben kann. Nur etwa 2-3 % der Gesamtbevölkerung haben diese Genkombination, allerdings weisen Betroffene ein etwa zehnfach höheres Alzheimerisiko auf (Fortea et al., 2024), sodass etwa 15-20 % der Alzheimererkrankten diese doppelte Genvariante haben.

Monoklonale Antikörper: Wirkung umstritten

Es gibt auch Kritik an den neuen Medikamenten und deren gesundheitspolitischen Folgen: Eine Metastudie (Nonino et al., 2026) fasst 17 Studien bis 2025 mit über 20.000 Teilnehmenden (Alter 70-76) zusammen. Die Metastudie kam zu dem Schluss, dass sich bei Menschen mit leichter kognitiver Beeinträchtigung oder leichter Demenz aufgrund von Alzheimer keine klinisch bedeutsamen Effekte nachweisen lassen. Weiters empfehlen Nonino et al. (2026), dass sich zukünftige Forschungen zu krankheitsmodifizierenden Behandlungen von Alzheimer auf andere Wirkmechanismen fokussieren sollten. Auch das Institut für Qualität und Wirtschaftlichkeit im Gesundheitswesen (Deutschland) erkennt keinen zusätzlichen Nutzen von Therapien mit Lecanemab und Donanemab bei einer frühen Alzheimer-Erkrankung gegenüber dem jetzigen Therapiestandard innerhalb ei-

³ ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/leqembi.

⁴ ema.europa.eu/en/medicines/human/EPAR/kisunla.

⁵ science.orf.at/stories/3231764/.

⁶ alzheimer-gesellschaft.at/project/aktuelle-informationen-zu-neuen-alzheimer-therapien-fuer-patientinnen/.

nes 18-monatigen Therapiezeitraums (IQWiG, 2025, 2026). Die Österreichische Alzheimergesellschaft stimmt dieser Bewertung nicht zu, räumt aber ein, dass beim EU-Zulassungsverfahren Langzeitdaten fehlten, die eigentlich notwendig wären, um die Wirksamkeit zu bewerten.⁷

Weitere Ansätze sind Impfungen und die Blockierung bzw. Modulierung von Enzymen, die jetzt besser verstanden zu sein scheint. Die Ansätze befinden sich noch im Forschungsstadium.⁸

Neue KI-Methoden zur Erkennung von Alzheimer erfassen und verarbeiten eine Vielzahl von Daten, wie beispielsweise bildgebende Untersuchungen des Gehirns (MRI), genetische Informationen und klinische Befunde (Aditya Shastry & Sanjay, 2024; Wahul et al., 2025). Darauf basierende Modelle können helfen, die Differenzialdiagnose in der Neurologie zu verbessern und könnten als Screening-Tool für Demenz in klinischen Settings oder Arzneimittelstudien eingesetzt werden (Xue et al., 2024). Das EU-geförderte Projekt PREDICTOM entwickelt eine KI-Plattform zur Früherkennung von Personen mit erhöhtem Demenzrisiko. Das KI-Tool soll helfen, Menschen niederschwellig und flächendeckend zu erreichen, indem erste Tests zu Hause durchgeführt werden können. Dazu gehören Erinnerungs- und Denkaufgaben, ein Hörcheck und Eye-tracking mittels Webcam sowie die Einsendung von Speichelproben und Blutstropfen aus der Fingerkuppe. Der Algorithmus weist den Teilnehmenden ein Erkrankungsrisiko zu, anhand von digitalen Messungen, kognitiver Leistung, lebensstilbasierten Risikofaktoren, selbstberichteten Symptomen sowie eines Biomarkers aus den Proben.⁹

Ein anderer Ansatz hat das Potential aufgezeigt, Menschen mit erhöhtem Demenzrisiko mit Smartphonedaten zu identifizieren. Einfache Wegfindungsaufgaben in einer kurzen „Schnitzeljagd“ mit Smartphonenavigation zeigten bereits deutliche Unterschiede zwischen gesunden Menschen und solchen mit erhöhtem Demenzrisiko (Marquardt et al., 2024). Die zunehmende Nutzung digitaler Datenerfassungstools ermöglicht theoretisch eine breite Bevölkerungsabdeckung sowie eine detaillierte klinische Charakterisierung (Au et al., 2025). Beispielsweise können gesprochene Antworten die Testsensitivität erhöhen, da digitale Sprachaufzeichnungen nach Hinweisen auf kognitive Einschränkungen ausgewertet werden können (Au et al., 2025).

Auch Licht wird in Zusammenhang mit einer Verbesserung von Alzheimersymptomen gebracht. So zeigte etwa eine Studie, dass flackernde Lichtsequenzen einen positiven Effekt auf Mäuse mit Alzheimer-ähnlichen Erkrankungen haben können. Es wurde gezeigt, dass in den Gehirnwellen von Alzheimererkrankten Gammafrequenzen um 40 Hz schwächer sind als bei Gesunden. Diese Frequenzen sind wichtig für Aufmerksamkeit und Gedächtnis. Derzeit befinden sich Produkte wie Brillen und Kopfhörer, die solche Frequenzen ausstrahlen, in klinischen Tests.¹⁰

Impfung?

*KI-gestützte
Demenz-Diagnose und
Früherkennung*

*Smartphonedaten
und Wearables*

Lichttherapie

⁷ alzheimer-gesellschaft.at/iqwig_stellungnahme/.

⁸ nature.com/articles/d41586-025-01102-2.

⁹ predictom.eu.

¹⁰ nature.com/articles/d41586-024-03147-1.

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Österreichweit sind heute etwa 170.000 Menschen von Demenz betroffen und aufgrund der demographischen Entwicklung wird bis 2050 mit einem Anstieg auf etwa 230.000 Erkrankte gerechnet (GÖG, 2025). Es wird prognostiziert, dass sich die Demenzfälle in Europa bis 2050 verdoppeln, weltweit sogar verdreifachen. Diese Schätzung beruht auf der gängigen Diagnoseform, die sich auf das Vorhandensein von klinischen Symptomen und Nachweisen mit Biomarkern bezieht. Betrachtet man zusätzlich symptomlose Fälle mit positivem Biomarkernachweis, könnten sich die Zahlen noch einmal verdreifachen (Scheltens et al., 2021).

Demenz verursacht hohe volkswirtschaftliche Kosten, laut WHO weltweit etwa US\$ 1,3 Billionen (Stand 2019). Die Hälfte der Kosten steht im Zusammenhang mit täglich durchschnittlich fünf Stunden informeller Pflege durch Angehörige und nahe Freunde. Frauen sind direkt und indirekt übermäßig von Demenz betroffen. Einerseits, weil sie bei einer Erkrankung mehr Lebensjahre mit Einschränkungen verbringen und auch eine höhere Sterblichkeit im Vergleich zu Männern haben. Andererseits, weil Frauen 70 % der Pflegearbeit für Menschen mit Demenz leisten (WHO, 2025).

Neue Pharmakotherapien sind bei bestenfalls mäßiger Wirkung sehr teuer und eine Erstattungsentscheidung steht aus. Voraussetzung ist eine spezialisierte Diagnostikinfrastruktur (ApoE4-Genotypisierung, MRT-Monitoring), die aber nicht flächendeckend vorhanden ist.

*Stark steigende
Zahlen an
Demenzkrankungen
erwartet*

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Der Demenzbericht 2025 beschreibt Versorgungsdefizite und Handlungsfelder, eine Abschätzung neuer technischer Optionen und damit verbundener Governancebedarfe fehlt jedoch. Dies betrifft etwa Fragen zu blutbasierten Biomarkern: Wie wird erstattet? Wie wird die Screeningpopulation definiert? Auch ethische Fragen sind offen: ein Frühbefund Jahre vor Symptombeginn birgt erhebliches präventives Potenzial, ist ohne gesicherte Therapieoption aber problematisch. Außerdem besteht die Möglichkeit falsch-positiver Testresultate. Eine Folgenabschätzung von digitaler Früherkennung und Wearables kann neue Einsichten zu Niedrigschwelligkeit, Skalierbarkeit und ungeklärten Datenschutzfragen bringen.

*Folgenabschätzung
neuer technischer
Optionen*

ZITIERTE LITERATUR

- Aditya Shastry, K., & Sanjay, H. A. (2024). Artificial Intelligence Techniques for the effective diagnosis of Alzheimer's Disease: A Review. *Multimedia Tools and Applications*, 83(13), 40057-40092, doi.org/10.1007/s11042-023-16928-z.
- Au, R., et al. (2025). Technological advances enabling an enhanced understanding of early Alzheimer's disease. *Alzheimer's & Dementia*, 21(11), e70883, doi.org/10.1002/alz.70883.

- da Silva, A. M. P., et al. (2026). Tirzepatide versus semaglutide for the prevention of mild cognitive impairment, dementia, and Alzheimer's disease in type 2 diabetes: A real-world, retrospective cohort study. *Journal of Diabetes and its Complications*, 40(5), 109306, doi.org/10.1016/j.jdiacomp.2026.109306.
- Fortea, J., et al. (2024). APOE4 homozygosity represents a distinct genetic form of Alzheimer's disease. *Nature Medicine*, 30(5), 1284-1291, doi.org/10.1038/s41591-024-02931-w.
- GÖG. (2025). Österreichischer Demenzbericht 2025. *Gesundheit Österreich*, Wien, broschuerenservice.sozialministerium.gv.at/Home/Download?publicationId=884&attachmentName=%C3%96sterreichischer_Demenzbericht_2025.pdf.
- IQWiG. (2025). Lecanemab (frühe Alzheimer-Krankheit); Nutzenbewertung gemäß § 35a SGB V; Dossierbewertung. doi.org/10.60584/A25-111.
- IQWiG. (2026). Donanemab (frühe Alzheimer-Krankheit); Nutzenbewertung gemäß § 35a SGB V; Dossierbewertung. doi.org/10.60584/A25-134.
- Marquardt, J., et al. (2024). Identifying older adults at risk for dementia based on smartphone data obtained during a wayfinding task in the real world. *PLOS Digital Health*, 3(10), e0000613, doi.org/10.1371/journal.pdig.0000613.
- Nonino, F., et al. (2026). Amyloid-beta-targeting monoclonal antibodies for people with mild cognitive impairment or mild dementia due to Alzheimer's disease. *Cochrane Database of Systematic Reviews*(4), doi.org/10.1002/14651858.CD016297.
- Scheltens, P., et al. (2021). Alzheimer's disease. *The Lancet*, 397(10284), 1577-1590, [doi.org/10.1016/S0140-6736\(15\)01124-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(15)01124-1).
- Valletta, M., et al. (2025). Blood biomarkers of Alzheimer's disease and progression across different stages of cognitive decline in the community. *Nature Communications*, 16(1), 10412, doi.org/10.1038/s41467-025-66728-2.
- Wahul, R. M., et al. (2025). Multimodal approaches and AI-driven innovations in dementia diagnosis: a systematic review. *Discover Artificial Intelligence*, 5(1), 96, doi.org/10.1007/s44163-025-00358-x.
- WHO. (2025). Fact-Sheet Dementia. who.int/news-room/fact-sheets/detail/dementia.
- Xue, C., et al. (2024). AI-based differential diagnosis of dementia etiologies on multimodal data. *Nature Medicine*, 30(10), 2977-2989, doi.org/10.1038/s41591-024-03118-z.
- Zhang, B., et al. (2025). Therapeutic advances in targeting the amyloid- β pathway for Alzheimer's disease. *Brain Sciences*, 15(10), 1101, doi.org/10.3390/brainsci15101101.
- Zhang, X., et al. (2025). Lewy body dementia promotion by air pollutants. *Science*, 389(6764), eadu4132, doi.org/10.1126/science.adu4132.

BIOPESTIZIDE



© CC0 (Cristian Jacinto)

ZUSAMMENFASSUNG

Der großflächige Einsatz synthetischer Pestizide hat in den vergangenen Jahrzehnten Ernteverluste durch Schädlinge deutlich reduziert. Gleichzeitig führte er jedoch zu erheblichen Umweltschäden, zum Verlust von Biodiversität und zu gesundheitlichen Belastungen für die Bevölkerung. Daher werden sichere und nachhaltige Alternativen dringend benötigt. Dazu zählen Biopestizide, die auf natürlichen Substanzen aus Tieren, Pflanzen, Mikroorganismen oder Mineralien basieren. Sie wirken in der Regel gezielter gegen Schädlinge und weisen eine geringere Toxizität für Nichtzielorganismen sowie eine bessere Abbaubarkeit auf. Kurz- bis mittelfristig können Biopestizide synthetische Pestizide nicht vollständig ersetzen. Sie sind im Rahmen des *integrierten Pflanzenschutzes* in Kombination mit anderen Maßnahmen anzuwenden, etwa mechanischen Verfahren, dem Einsatz resistenter Sorten sowie dem Schutz und der Förderung von Nützlingen. Zentrale Herausforderungen liegen in der Entwicklung sicherer und nachhaltiger Biopestizide.

Biopestizide reduzieren die negativen Folgen synthetischer Pestizide

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Pestizide sind Substanzen, die gegen Schadorganismen wie Unkraut (Herbizide), Insekten (Insektizide), Pilze (Fungizide) oder Bakterien (Bakterizide) eingesetzt werden. Sie werden hauptsächlich als Pflanzenschutzmittel in der Landwirtschaft und im Gartenbau angewendet. Darüber hinaus werden sie in weiteren Bereichen wie Insektensprays, Holzschutz und Desinfektionsmittel verwendet. Pestizide sind seit Tausenden von Jahren im Einsatz, um Anbaukulturen zu schützen, etwa in Form pflanzlicher Extrakte und Mineralien. Ab 1945 setzte eine bedeutende Entwicklung synthetischer Pestizide ein, die in stetig steigenden Mengen produziert und ausgebracht wurden, um die Ernährungssicherheit einer stark wachsenden Bevölkerung zu gewährleisten.

Die Anwendung von Pestiziden ist zwar hocheffektiv, jedoch äußerst ineffizient: Mehr als 99 % der Wirkstoffe gehen durch Abdrift, Verdunstung, Absorption in den Boden, Abbau oder Abfluss verloren. Insbesondere erreichen weniger als 0,1 % der Insektizide die Zielinsekten (Forest et al., 2025). Etwa 10 % der Pestizide lagern sich im Boden ab, wo sie die Bodenbiodiversität weiterhin negativ beeinflussen; rund 10 % gelangen in Flüsse, und etwa 80 % werden abgebaut. Die entstehenden Abbauprodukte sind jedoch weiterhin potenziell toxisch und verbreiten sich in der Umwelt (Maggi et al., 2023). Außerdem führt der massive Einsatz von Pestiziden zur Resistenzbildung bei Schädlingen, was die Effektivität synthetischer Pestizide verringert.

Der massive Einsatz synthetischer Pestizide führt jedoch zu einer großflächigen Verschmutzung von Luft, Wasser und Boden sowie zum Verlust der Biodiversität durch den Tod von Nichtzielorganismen wie wichtigen Mikroorganismen im Boden, Säugetieren, Insekten und Vögeln. Viele der Kollateralopfer sind Nützlinge, die Schädlinge natürlich regulieren. 2021 wurden Pestizide und deren Abbauprodukte, auch als *Metabolite* bezeichnet, in 93 % der Grundwasserproben in Österreich nachgewiesen (BMLUK, 2023); 2025 wurden außerdem 50 verschiedene Pestizide in der Umgebungsluft in Österreich detektiert (Umweltbundesamt, 2025). Zudem wurden bei 84 % der Teilnehmenden einer Studie in fünf europäischen Ländern Pestizide in Blutproben gefunden.¹

Die Aufnahme von Pestiziden und Metaboliten durch Rückstände in Lebensmitteln und Trinkwasser kann auch bei Menschen schwere gesundheitliche Folgen haben, z. B. ein erhöhtes Krebsrisiko, kardiovaskuläre Probleme, Geburtsfehler sowie neurologische Erkrankungen wie Parkinson und Alzheimer (Umweltbundesamt, 2024). In erster Linie sind Beschäftigte im Land- und Gartenbau direkt betroffen, da sie durch die Handhabung und Anwendung von Pestiziden sowie die Wartung von Feldspritzen regelmäßig mit hohen Konzentrationen an Wirkstoffen in Kontakt kommen. Besonders kritisch ist die bislang wenig untersuchte Toxizität von Metaboliten sowie von Mischungen verschiedener Pestizide und Metaboliten, die sich gegenseitig verstärken können und in der Umwelt schwer zu kontrollieren sind (Umweltbundesamt, 2024).

*Biodiversitätsverlust
und großflächige
Verschmutzung der
Umwelt*

*Toxizität von
Mischungen und
Abbauprodukte
wenig untersucht*

¹ eea.europa.eu/en/analysis/publications/how-pesticides-impact-human-health.

Insgesamt wurden die direkten gesellschaftlichen Kosten für Trinkwasseraufbereitung und die Behandlung von Berufskrankheiten im Jahr 2019 in der EU auf 2,3 Milliarden Euro geschätzt. Die indirekten Kosten belaufen sich auf 48,1 Milliarden Euro: Dazu zählen unter anderem die Behandlung von Krankheiten in der allgemeinen Bevölkerung und Maßnahmen zum Schutz der Biodiversität. Hinzu kommen andere Folgen wie der Verlust von Ökosystemdienstleistungen, die in der genannten Summe aber noch nicht enthalten sind (Umweltbundesamt, 2024).

Daher zielt die EU-Kommission mit ihrer Strategie „Vom Hof auf den Tisch“² darauf ab, den Pestizideinsatz bis 2030 um 50 % zu reduzieren. Erreicht werden soll dies durch eine Verringerung sowohl des ausgebrachten Volumens als auch der Gefährlichkeit der Wirkstoffe. Ganz ohne alternative Stoffe und Methoden lässt sich dieses Ziel jedoch nicht erreichen: Ohne Pestizide gingen bis zu 70 % der landwirtschaftlichen Produktion verloren.

Eine Kombination nachhaltiger und sicherer Maßnahmen wird daher bevorzugt: *integrierter Pflanzenschutz*.³ Dieser besteht aus dem Einsatz alternativer Methoden zur Kontrolle von Schädlingen, z. B. mechanische Bekämpfungsmethoden, die Verwendung resistenter Sorten sowie dem Schutz und der Förderung von Nützlingen. Zudem verringert die Vielfalt der eingesetzten Methoden das Risiko der Resistenzbildung (Smith et al., 2026). In diesem Rahmen bieten Biopestizide eine nachhaltigere und sicherere Alternative zu synthetischen Pestiziden.

Im Gegensatz zu synthetischen Pestiziden basieren Biopestizide auf Substanzen natürlichen Ursprungs, gewonnen aus Tieren, Mikroorganismen, Pflanzen oder Mineralien. Viele Biopestizide weisen eine geringere Toxizität als synthetische Pestizide auf, da sie die Zielorganismen häufig nicht töten, sondern sie abstoßen oder in deren Lebenszyklus eingreifen. Je nach Wirkstoff sind sie bereits in geringen Mengen hoch wirksam. Sie sind typischerweise selektiver, das heißt, sie wirken gezielter gegen Schädlinge. Dadurch sind sie für Nichtzielorganismen (andere Pflanzen, Insekten, Mikroorganismen, Säugetiere wie Menschen, Vögel) weniger schädlich und gehen mit einer geringeren Belastung für beruflich exponierte Personen einher. Häufig beruhen sie auf komplexen Wirkmechanismen und verringern damit das Risiko einer Resistenzbildung. Da sie auf natürlichen Substanzen basieren, sind Biopestizide zudem oft schneller abbaubar und weniger langlebzig in der Umwelt.⁴

Biopestizide lassen sich in drei Hauptkategorien einteilen. (1) *Biochemische Pestizide* oder *Semiochemikalien* basieren auf nicht-toxischen Substanzen. Sie töten den Zielorganismus nicht, sondern ändern dessen Verhalten oder Kommunikation und stören so den Lebenszyklus, was über mehrere Generationen zu einer abnehmenden Population führt. Eingesetzt werden beispielsweise Abwehrmittel auf Basis von Pflanzenextrakten oder Pheromone, die Paarung und Reproduktion stören, Schadinsekten in Fallen locken oder natürliche Feinde anziehen. (2) *Mikrobi-*

*Vom Hof auf den Tisch:
50 % weniger Pestizide
bis 2030*

*Biopestizide
im Rahmen des
integrierten
Pflanzenschutzes*

*Biopestizide:
gezieltere Wirkung,
geringeres Risiko von
Resistenzen und
schnellerer Abbau*

*Biopestizide bieten
verschiedene Ansätze
für den Pflanzenschutz*

² food.ec.europa.eu/plants/pesticides/sustainable-use-pesticides/pesticide-reduction-targets-progress_en.

³ bmluk.gv.at/themen/landwirtschaft/landwirtschaft-in-oesterreich/pflanzliche-produktion/pflanzenschutz/Integrierter_PS.html.

⁴ oecd.org/en/topics/sub-issues/pesticides-and-biocides/biological-pesticides.html.

elle Pestizide basieren auf Mikroorganismen (Bakterien, *Viren*, Pilzen) als Wirkstoffe, die gezielt Schädlinge oder Unkräuter zerstören. Ein Beispiel ist das Bakterium *Bacillus thuringiensis*, das Proteine produziert, die für viele Insektenlarven toxisch sind. (3) *Plant-incorporated protectants* beruhen auf der genetischen Modifizierung von Pflanzen, durch die diese Fähigkeiten erhalten, Biopestizide selber zu produzieren, um sich vor Schädlingen zu schützen. So können etwa DNA-Sequenzen von *Bacillus thuringiensis* in das Genom einer Pflanze integriert werden, sodass sie das toxische Protein direkt produziert.

Neue Arten von Biopestiziden befinden sich in frühen Entwicklungsphasen. Dazu gehören *Nanobiopestizide* und *RNAi*-basierte Pestizide. *Nanobiopestizide* nutzen die große spezifische Oberfläche von Nanomaterialien, also das Verhältnis der Oberfläche eines Materials zu seiner Masse, die zu einer höheren Reaktivität und damit zu einer größeren Effektivität im Vergleich zu größeren Partikeln oder Tröpfchen führt. Häufig kommen Metalle und Metalloxide wie Titandioxid, Silber oder Kupfer zum Einsatz (Forest et al., 2025). Der Einsatz von Nanocarriern, also speziell entwickelten Nanopartikeln, die einen Wirkstoff gezielt zum Schädling transportieren und dort freisetzen, verringert unbeabsichtigte Verluste in die Umwelt und erhöht den Anteil des Wirkstoffs, der den Zielorganismus erreicht. Die Aufnahme von Nanopartikeln durch Nichtzielorganismen und deren Anreicherung der Nanopartikel in der Umwelt bleiben jedoch wenig untersucht.

RNAi, auch *RNA-Interferenz* genannt, ist ein Mechanismus zur Regulierung bzw. Inaktivierung der Expression von Genen, die an der Proteinsynthese beteiligt sind und eine entscheidende Rolle für normale Körperfunktion spielen. Als Biopestizid eingesetzt, richtet sich die *RNA-Interferenz* gegen Gene, die für die Zielinsekten essenziell sind, und führt zu deren Inaktivierung, wodurch das Insekt getötet oder sein Lebenszyklus gestört wird. Das durch *RNAi* adressierte Gen ist in der Regel spezifisch für das Zielinsekt.

Zurzeit können nicht alle synthetischen Pestizide durch Biopestizide ersetzt werden⁶, und nicht alle Biopestizide sind in der Biolandwirtschaft erlaubt. Sie sind im Rahmen eines integrierten Pflanzenschutzansatzes als Ergänzung zu anderen Methoden einsetzbar. Die Vielfalt der Methoden reduziert die benötigte Wirkstoffmenge, die jedoch weiterhin potenziell negative Umwelt- und Gesundheitswirkungen haben kann, und verringert das Risiko einer Resistenzbildung bei Schädlingen.

Biopestizide stellen jedoch keine Wunderlösung dar und sind nicht automatisch nachhaltig und sicher für Menschen und Nichtzielorganismen. Sie sollten daher so früh wie möglich im Entwicklungsprozess sorgfältig getestet werden, um sicherzustellen, dass sie sicherer und nachhaltiger sind als die synthetischen Stoffe, die sie ersetzen sollen, um „Regrettable Substitutions“ zu vermeiden. Dafür können Methoden zur nachhaltigen und sicheren Entwicklung von Chemikalien und Materialien angewendet werden, wie etwa *Safe-and-Sustainable-by-Design* (Olischer et al., 2024). Damit sollte der gesamte Lebenszyklus berücksichtigt werden, insbesondere um zu verhindern, dass toxische Abbauprodukte entstehen.

Die effiziente Anwendung von Biopestiziden ist jedoch komplexer als die von synthetischen Pestiziden und hängt stark von Wetter- und Bodenbedingungen ab. Sie bauen sich schneller ab und weisen daher eine kürzere Wirkungszeit auf. Das

*Gentechnische
Biopestizid-Ansätze*

*Synthetische Pestizide
sind noch nicht 100 %
ersetzbar*

*Nicht automatisch
sicherer und
nachhaltiger*

bedeutet, dass der effiziente Einsatz von Biopestiziden von der Verfügbarkeit hochauflösender Wetterdaten, Informationen zur Bodenzusammensetzung sowie von Kenntnissen über den Lebenszyklus der Zielorganismen abhängt. Entsprechend sind die Digitalisierung der Landwirtschaft und die gezielte Weiterbildung von Fachkräften entscheidend.

Weiters fördert der Einsatz nachhaltiger und sicherer Biopestizide im Rahmen vielfältiger Pflanzenschutzmaßnahmen die Biodiversität der Böden und erhöht deren Fruchtbarkeit. Dadurch sinkt der Bedarf an Dünger und die Landwirtschaft wird widerstandsfähiger gegenüber klimatischen und geopolitischen Krisen.

Der Bedarf an Dünger wird verringert

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Österreich setzt pro Hektar landwirtschaftlicher Fläche deutlich mehr Pestizide ein als der europäische Durchschnitt: 3,8 kg/ha gegenüber 2,7 kg/ha in der EU. Zwischen 2011 und 2023 sind die Pestizidverkäufe EU-weit um rund 20 % gesunken, in Österreich jedoch um 52 % gestiegen (FAO, 2025). Einerseits wurden seit 2010 deutlich mehr gesundheitsgefährdende Pestizide (darunter auch **PFAS**-haltige Pestizide) verkauft,⁵ andererseits stieg auch der Absatz umweltfreundlicherer Stoffe wie Schwefeldioxid für die Biolandwirtschaft.⁶ Österreich gilt als Spitzenreiter der europäischen Biolandwirtschaft, mit mehr als 25 % der landwirtschaftlichen Fläche (EU-Durchschnitt: 10 %).⁷ Der Marktanteil von Bioprodukten wächst und lag 2025 bei 11,9 %.⁸ Das zeigt ein starkes Momentum für eine nachhaltigere Landwirtschaft, getragen von der wachsenden Nachfrage nach Bioprodukten sowie der Bereitschaft der österreichischen Bäuerinnen und Bauern, nachhaltigere Methoden einzusetzen.

Österreich als Spitzenreiter der Biolandwirtschaft

Im Rahmen des Horizon-Forschungsprogramms der EU werden derzeit 41 Projekte zu Biopestiziden und integriertem Pflanzenschutz mit insgesamt 160 Millionen Euro gefördert. Österreichische Forschungsinstitutionen spielen dabei eine wichtige Rolle und erhalten 7,4 Millionen Euro (4,6 %) aus diesen Mitteln. Besonders aktiv sind die Universität für Bodenkultur Wien, das Austrian Institute of Technology und das Austrian Center for Industrial Biotechnology.⁹ Neben der Entwicklung von Biopestiziden werden auch innovative und kostengünstige Methoden des integrierten Pflanzenschutzes gefördert und in Zusammenarbeit mit Bäuerinnen und Bauern getestet, die Biopestizide mit anderen Maßnahmen kombinieren.

Beteiligung an der europäischen Forschung

⁵ orf.at/stories/3413529.

⁶ orf.at/stories/3168328.

⁷ destatis.de/Europa/DE/Thema/Land-Forstwirtschaft-Fischerei/Oeko.html.

⁸ vienna.at/umsatz-mit-bio-lebensmitteln-gestiegen/9988760.

⁹ cordis.europa.eu.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Die Entwicklung nachhaltiger und sicherer Pestizide bietet Österreich die Chance, auf bestehenden Stärken aufzubauen und seine Vorreiterrolle einer nachhaltigeren Landwirtschaft zu festigen. Empfohlen wird eine Technikfolgenabschätzungstudie zur gezielten Gestaltung von Innovationen im Bereich der Biopestizide. Damit sollen Synergien zwischen Wissenschaft, Industrie und Landwirtschaft identifiziert werden und es soll aufgezeigt werden, wie sich die Stärken Österreichs bei der Entwicklung sicherer und nachhaltigerer Stoffe strategisch nutzen lassen. Zugleich ist eine Anpassung der Regulierung notwendig, um geeignete Rahmenbedingungen für Versuche und Einsatz von Biopestiziden zu schaffen, etwa durch *Regulatory Sandboxes*, die Untersuchungen unter realen Wetter- und Bodenbedingungen auf großflächigen Bereichen ermöglichen.

Eine interdisziplinäre TA-Studie würde den gesamten Lebenszyklus von Biopestiziden sowie deren sozioökonomische Auswirkungen berücksichtigen. Besonders wichtig wäre die frühzeitige Einbindung der Öffentlichkeit, um Transparenz zu schaffen und die Akzeptanz von Konsumentinnen und Konsumenten zu erhöhen. Auf Basis fundierter Kosten-Nutzen-Analysen sollten geeignete Anreiz- und Förderinstrumente entwickelt werden, um sicherzustellen, dass Bäuerinnen und Bauern potenzielle Mehrkosten für den Einsatz sicherer und nachhaltigerer Produkte nicht allein tragen müssen. So würde gewährleistet, dass die Entwicklung und Anwendung von Biopestiziden maximale gesellschaftliche Vorteile bringen werden.

ZITIERTE LITERATUR

- BMLUK (2023). *Pflanzenschutzmittelwirkstoffe und ihre Metaboliten in Fließgewässern*.
bmluk.gv.at/service/publikationen/wasser/pflanzenschutzmittelwirkstoffe-und-ihre-metaboliten-in-fluessgewaessern.html.
- FAO (2025). World Food and Agriculture – Statistical Yearbook 2025.
<https://doi.org/10.4060/cd4313en>.
- Forest V., et al. (2025). Efficiency and safety of nanopesticides, it takes two to tango. An overview of the lack of data on possible effects on human health. *Sci. Tot. Env.*, 970 (179156). doi: [10.1016/j.scitotenv.2025.179156](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.179156).
- Maggi F., et al. (2023). Agricultural pesticide land budget and river discharge to oceans. *Nature*, 620 (1013-1017). doi: [10.1038/s41586-023-06296-x](https://doi.org/10.1038/s41586-023-06296-x).
- Olscher C., et al. (2024). Safe-and-Sustainable-by-Design. *NanoTrust Dossier Nr.67*. doi: [10.1553/ita-nt-067](https://doi.org/10.1553/ita-nt-067).
- Smith J, et al. (2026). Challenges facing the management of pesticide resistance in weeds, diseases and insect pests in European agriculture and the future of effective IPM implementation. *Pest Management Science*, 82, 4. doi: [10.1002/ps.70522](https://doi.org/10.1002/ps.70522).
- Umweltbundesamt (2025). *Pestizide in der Umgebungsluft*.
umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0946.pdf.
- Umweltbundesamt (2024). *Ernährungssicherheit und Pestizidreduktion*.
umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0922.pdf.

KI UND ARBEITSMARKT: DESKILLING UND BERUFSEINSTIEG



© CC0 (Daniil Komov)

ZUSAMMENFASSUNG

Spätestens seit der rasanten Verbreitung generativer Künstlicher Intelligenz (KI) – sind die Arbeitsmarkteffekte des technologischen Wandels Gegenstand gesellschaftlicher Debatten. Zwar unterliegen wissenschaftliche Prognosen methodischen Unsicherheiten, aktuell werden jedoch Risiken insbesondere im Bereich der (qualifizierten) Dienstleistungsarbeit konstatiert (z. B. Deskilling). Außerdem könnte der vermehrte Einsatz von KI-Systemen Berufseinsteigenden den Karrierestart erschweren und Frauen überproportional betreffen. Übereinstimmung gibt es im Rahmen dieser Debatten, dass die tiefgreifenden Transformationen in Wirtschaft und Gesellschaft gestaltet werden müssen. Der Schwerpunkt liegt hier in gezielten qualifizierungs-, verteilungs- und sozialpolitischen Maßnahmen, um negativen Beschäftigungseffekten entgegenzuwirken und den digitalen Wandel sozialverträglich zu gestalten.

KI:
*Arbeitsmarkteffekte
unklar, Gestaltung
gefordert*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Seit mehr als einem Jahrzehnt ist eine intensive wissenschaftliche Auseinandersetzung mit den Arbeitsmarkteffekten der Automatisierung und insbesondere digitaler Technologien zu beobachten. Fokussierten sich technologiepolitische Debatten in den 2010er Jahren noch stark auf die Implikationen der „Industrie 4.0“, steht heute zunehmend die rasante Verbreitung (generativer) KI im Zentrum der Aufmerksamkeit. So befasste sich auch das ITA mit dem branchenspezifischen Wandel von Arbeit im Kontext der Einführung von KI mit besonderem Schwerpunkt auf der Wissensarbeit (vgl. Strauß 2024).

*KI als
gesellschaftliches
Politikum*

Die Arbeitsmarkteffekte von KI sind aus volkswirtschaftlicher Perspektive bislang widersprüchlich und empirisch nur unzureichend geklärt. Einerseits häufen sich aufsehenerregende Meldungen über Beschäftigungsabbau im Kontext der Einführung von KI, insbesondere bei den großen IT-Konzernen. Andererseits deuten aktuelle Studien darauf hin, dass die Produktivitätssteigerungen, die durch KI-Einsatz erzielt werden, bislang begrenzt sind. So postulieren Challapally et al. (2025), dass Investitionen von Milliarden von US-Dollar in (generative) KI in rund 95 % der untersuchten Organisationen bislang keinen messbaren Ertrag zur Folge haben. Häufig erfolgen Investitionsentscheidungen im Themenfeld KI ohne konkrete Vorstellungen eines unmittelbaren Nutzens und aus dem Drang heraus, nicht abgehängt zu werden (IBM 2025). In einigen Fällen mussten Unternehmen sogar Personal wieder einstellen und umfangreiche Maßnahmen zur Schadensbegrenzung ergreifen. Hinzu kommt eine starke branchenspezifische Ausdifferenzierung der (potenziellen) Betroffenheit durch KI¹.

*Beschäftigungs- und
Produktivitätseffekte
unklar*

Extrapolationen künftiger Entwicklungen sind auf Grundlage dieser unklaren Evidenz kaum möglich, zumal Studien zu den Beschäftigungseffekten von KI und Automatisierung mit erheblichen methodologischen Herausforderungen konfrontiert sind (vgl. Frey 2021). So neigen Studien, die lediglich von technischen Potenzialanalysen ausgehen, dazu, Implementationsprobleme zu unterschätzen. Zudem basieren viele Studien auf standardisierten Berufsbeschreibungen, die notwendigerweise von der beruflichen Realität abstrahieren und innerberufliche Heterogenität, informelle Tätigkeitsverschiebungen und die Bedeutung von Erfahrungswissen nur unzureichend abbilden. In der Folge werden Automatisierungspotenziale und damit auch mögliche Arbeitsmarkteffekte systematisch verzerrt eingeschätzt.

*Methodische Grenzen
arbeitsmarktlicher
Studien*

Volkswirtschaftliche Prognosemodelle sind mit zusätzlichen Unsicherheiten behaftet, da sie über Annahmen zur technologischen Substituierbarkeit menschlicher Arbeitskraft hinaus Annahmen zum Investitionsverhalten, zur Diffusionsgeschwindigkeit und zu Wachstumseffekten treffen müssen. Die methodologischen Herausforderungen werden dadurch verschärft, dass angesichts der dynamischen technologischen Entwicklung und dem begrenzten Zugriff auf die in Entwicklung befindlichen Modelle seitens unabhängiger Forschungsinstitutionen eine unabhängige Überprüfung der Leistungsfähigkeit dieser technischen Systeme nur

¹ digitalaustria.gv.at/themen/kuenstliche-intelligenz/ki-monitor/eco-austria-studie.html.

begrenzt möglich ist (Narayanan et al. 2024) und die Debatte stark durch Beiträge der IT-Konzerne selbst geprägt wird, die auch von öffentlichkeits- und geschäftsstrategischen Erwägungen beeinflusst werden.

Gleichwohl lassen sich in den bestehenden Studien wiederkehrende Trends erkennen: Erstens unterscheidet sich auf KI basierende Automatisierung von früheren Automatisierungswellen dadurch, dass sie verstärkt auch wissensintensive Tätigkeiten betrifft – einschließlich der IT-Branche, die lange durch einen Fachkräftemangel geprägt war. Auch andere qualifizierte und vergleichsweise gut bezahlte Beschäftigengruppen geraten unter Anpassungsdruck, etwa in der Finanzwirtschaft oder im Rechtswesen.¹ Zweitens deuten erste Evidenzen (Brynjolfsson et al. 2025) darauf hin, dass insbesondere Berufseinsteigende der Karrierestart erschwert werden könnte, da in Einstiegspositionen vorwiegend einfachere kognitive Anforderungen gestellt werden, für die kodifiziertes Wissen (book learning) erforderlich ist, was eine KI-basierte Automatisierung erleichtert. Drittens zeigen Studien, dass Frauen überdurchschnittlich häufig in Berufen tätig sind, die potenziell stärker von KI erfasst werden, etwa in Verwaltung und wissensbasierter Dienstleistungsarbeit (ILO 2026).

Gleichzeitig ist die Arbeitsmarktentwicklung von zahlreichen Faktoren geprägt und die technologische Automatisierbarkeit nur einer von vielen, die über Beschäftigungsabbau und -aufbau entscheiden. Einerseits können ökonomisches Kalkül sowie organisationale, rechtliche oder kulturelle Faktoren die Realisierung technologischer Potentiale verlangsamen. Andererseits findet der gegenwärtige Stellenabbau – etwa in der IT-Industrie – vor dem Hintergrund eines über Jahre hinweg erfolgten umfassenden Aufbaus von Beschäftigung und einer allgemeinen konjunkturellen Schwäche statt. Die Vielschichtigkeit der gegenwärtigen Arbeitsmarktdynamik macht es schwer, die Ursachen des aktuellen Beschäftigungsabbaus eindeutig zu identifizieren.

Dennoch sind negative Beschäftigungseffekte in naher Zukunft wahrscheinlich, zumal Studien, die, eine ausgeglichene Beschäftigungsbilanz in Folge vermehrten KI-Einsatzes annehmen, ein deutlich beschleunigtes Wirtschafts- und damit verbundenes Beschäftigungswachstum dank der Diffusion von KI postulieren (Zika et al. 2025). Ein solches Wachstum ist jedoch derzeit nicht zu beobachten. Dies rückt die Frage nach arbeitsmarkt- und sozialpolitischen Gestaltungsoptionen in den Vordergrund.

Eine Schlüsselrolle wird hierbei der Qualifizierung der Beschäftigten beigemessen. So gewinnt einerseits die Kompetenz, KI-Systeme souverän und reflektiert einsetzen zu können, also etwa über ein grundlegendes Verständnis der Funktionsweise von verschiedenen KI-Systemen und ihrer Limitationen zu verfügen und passende Anwendungsdomänen einschätzen zu können, an Bedeutung. Andererseits wird auch die zunehmende Bedeutung von sozialen und emotionalen Kompetenzen, kritischer Urteilsfähigkeit und adaptiver Problemlösungskompetenz betont, während KI-Systeme kognitive Funktionen wie Planung, Recherche und Koordination zunehmend übernehmen würden (vgl. Strauß 2024). Die mit einer entsprechenden Neujustierung des Bildungssystems verbundenen Herausforderungen werden weiter dadurch erschwert, dass Kinder und Jugendliche wie auch Studierende bereits stark KI-Systeme nutzen. Die Gefahr, dass dadurch „Shortcut“-Routinen erlernt werden, die die Herausbildung kritischer Urteilsfä-

*Dienstleistung, Frauen
und Berufseinsteigende
besonders betroffen*

*Politische Gestaltung
erforderlich*

*Maßnahmen zur
Qualifizierung
notwendig ...*

higkeit erschweren, ist Gegenstand intensiver pädagogischer Debatten. Gleichzeitig sehen sich auch Lehrkräfte aus häufig nicht-technischen Fachgebieten mit der Anforderung konfrontiert, KI-Kompetenzen herauszubilden.

Gleichzeitig stößt eine aktive Qualifizierungspolitik als arbeitsmarktpolitisches Gestaltungsinstrument bei tiefgreifenden Beschäftigungsrückgängen und einer weiteren Zuspitzung des Verhältnisses zwischen offenen Stellen und Arbeitssuchenden an strukturelle Grenzen. Vor diesem Hintergrund werden zunehmend weitergehende arbeitsmarkt- und verteilungspolitische Maßnahmen diskutiert, die über klassische Qualifizierungsstrategien hinausgehen.

... aber nicht hinreichend

Dazu zählen etwa eine Stärkung von Sorgeberufen, für die es eine hohe gesellschaftliche Nachfrage gibt und die als verhältnismäßig rationalisierungsresistent gelten, aber auch das Setzen konjunktureller Impulse von staatlicher Seite sowie ein Ausbau des Sozialstaats, um Sicherheit im technologischen Wandel zu bieten. Diese Einschätzung wird auch von zentralen Akteuren der KI-Wirtschaft unterstützt. Vor dem Hintergrund einer zunehmenden Legitimationskrise und sinkender Akzeptanz für das gegenwärtige Innovationsgeschehen werden vermehrt Fragen der sozialen Nachhaltigkeit thematisiert, die seit geraumer Zeit Gegenstand wissenschaftlicher und politiknaher Debatten sind (vgl. etwa Roberts et al. 2017). So diskutiert OpenAI, einer der führenden KI-Anbieter, in einem aktuellen Policy-Papier unter anderem höhere kapitalbezogene Abgaben, die Schaffung eines Public-Wealth-Fonds zwecks breiter Verteilung der Automatisierungsdividende, den Ausbau sozialer Sicherungssysteme und eine Verkürzung der Arbeitszeit bei vollem Lohnausgleich zur Abfederung KI-bedingter Umbrüche.²

Aktive Arbeitsmarkt-, Verteilungs- und Sozialpolitik gefordert

Unabhängig von direkten Beschäftigungseffekten ergeben sich erhebliche Herausforderungen auch für Bestandsbelegschaften, deren Weiterbeschäftigung als verhältnismäßig sicher gelten kann. So droht der gegenwärtige technologische Wandel die Verhandlungsmacht der Beschäftigten weiter zu schwächen und hat etwa im Kontext des Ausbaus *technischer Überwachung* bis hin zu Formen der *Emotionserkennung am Arbeitsplatz* weitreichende ethische, betriebspolitische und rechtliche Implikationen. Auch sind bereits weitere Leistungsverdichtungen zu beobachten, da KI-Systeme vor allem Routinetätigkeiten übernehmen und dadurch der Anteil komplexer Aufgaben steigt, während zugleich Überwachung, Korrektur und Anpassung der Systeme zusätzliche Anforderungen erzeugen. Zudem wirft die gegenwärtige technologische Innovation Fragen nach der Kompetenzentwicklung. So setzt die Kontrolle von KI-Systemen kritische Urteilskraft und Erfahrungswissen voraus, deren Aufbau durch den Einsatz dieser Systeme erschwert werden kann – etwa, weil sie zur Einsparung von Einstiegspositionen genutzt werden, oder weil die Nutzung von KI-Systemen durch Berufseinsteigende die Notwendigkeit von Kompetenzformierung reduziert und es zu weniger Wissensweitergabe zwischen den Beschäftigten kommt (Ferdman 2025).

Betriebliche Folgen von KI

Erste Studien legen zudem nahe, dass auch erfahrene Beschäftigte Gefahr laufen, zu sehr auf technische Systeme zu vertrauen. Dies kann zu einem „Deskilling“, also dem Verlust bereits erlangter Kompetenzen, führen (vgl. etwa Budzyń et al.

Risiko Deskilling

² OpenAI (2026). Industrial Policy for the Intelligence Age: Ideas to Keep People First. openai.com/de-DE/index/industrial-policy-for-the-intelligence-age/.

2025). Fallen Deskillung in der Folge von KI-Nutzung und eine Zunahme der zugewiesenen Arbeitsmengen, die keine gründliche Überprüfung etwa von Entscheidungsvorschlägen zulässt, zusammen, können entscheidende Qualitätssicherungsmechanismen wie etwa die menschliche Letztentscheidung in kritischen Anwendungsdomänen systematisch unterminiert werden.

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Angesichts der erheblichen sozialen, ökonomischen und politischen Implikationen der Nutzung von KI ist die Identifikation von Gestaltungsoptionen zur Rahmung des gegenwärtigen technologischen Wandels dringlich angezeigt. Schon vorübergehende Phasen erhöhter Unsicherheit, transitorischer Arbeitslosigkeit oder die bloße Furcht vor sozialer Abwertung am Arbeitsplatz können individuelle Lebensverläufe nachhaltig beeinträchtigen und den gesellschaftlichen Zusammenhalt gefährden. Daraus folgt, dass soziotechnischer Wandel aktiv im kurzen, mittleren und langen Zeithorizont gestaltet werden muss.

Ein KI-Observatorium für den österreichischen Arbeitsmarkt, für dessen Gründung bereits 2024 eine Roadmap im Auftrag des Bundesministeriums für Arbeit und Wirtschaft erarbeitet wurde³ (Walker et al. 2024), könnte hierbei einen wichtigen Meilenstein darstellen und als zentrale Wissens-, Beratungs- und Diskussionsplattform dienen.

Wie eine im Auftrag des Bundeskanzleramts durchgeführte Studie herausgearbeitet hat, verfügt die österreichische Wirtschaft über eine Reihe von Spezialisierungen in Branchen, die als besonders exponiert für den Einsatz von KI gelten. Dazu zählen beispielsweise Finanzdienstleistungen und Unternehmensberatung, aber auch die Werbebranche, der Maschinenbau und die Pharmaindustrie¹. Gleichzeitig schafft unter anderem der demographische Druck im Arbeitsmarkt Anreize, Potentiale der (Teil-)Substitution menschlicher Arbeitskraft vermehrt zu prüfen, und unterstreicht die Bedeutung einer umfassenden Strategie zur arbeitsmarktpolitischen Gestaltung. Nicht zuletzt stellt sich insbesondere in Österreich die Frage, wie das bestehende sozialpartnerschaftliche System weiterentwickelt bzw. mobilisiert werden kann, um die sozialverträgliche Gestaltung dieses tiefgreifenden wirtschaftlichen Transformationsprozesses in Zusammenarbeit mit dem Gesetzgeber zu sichern.

*Zukunft der
Arbeitswelt gestalten*

KI-Observatorium

*Branchenspezifische
Exposition*

*Sozialpartnerschaft als
Gestaltungsressource*

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Ohne einen robusten staatlichen Gestaltungsrahmen droht die zunehmende Verbreitung von KI bestehende Beschäftigungsungleichheiten zu verschärfen, den Zugang zu Arbeit erschweren und die Verhandlungsmacht von Beschäftigten zu schwächen.

*Aktive politische
Rahmung von
KI-bedingter
Transformation*

³ Konzeptdesign: KI-Observatorium für den österreichischen Arbeitsmarkt, sozialministerium.gv.at/dam/sozialministeriumat/Anlagen/Services/Studien/KI-Observatorium_Bericht_final.cleaned.pdf.

Es besteht daher erheblicher politischer Handlungsbedarf, um absehbare Risiken zu begrenzen und zugleich die produktiven Potenziale von KI betrieblich, organisatorisch und gesellschaftlich nutzbar zu machen, ohne dabei den sozialen Status der Beschäftigten zu gefährden. Um einen solchen aktiv-gestaltenden Politikansatz zu informieren, wäre in einer vertiefenden Studie zu untersuchen, wie (zielgruppenspezifische) Qualifizierungsstrategien, verteilungspolitische Maßnahmen, die Weiterentwicklung des Sozialstaates, arbeitszeitpolitischen Ansätze sowie einer Neubewertung öffentlicher Beschäftigung integriert werden können, um möglichen negativen Beschäftigungseffekten des Einsatzes von KI zu begegnen.

ZITIERTE LITERATUR

- Budzyń, K., et al. (2025). Endoscopist deskilling risk after exposure to artificial intelligence in colonoscopy: a multicentre, observational study. *The Lancet Gastroenterology & Hepatology*, 10(10).
[doi.org/10.1016/S2468-1253\(25\)00133-5](https://doi.org/10.1016/S2468-1253(25)00133-5).
- Brynjolfsson, E., Chandar, B., & Chen, R. (2025). Canaries in the Coal Mine? Six Facts about the Recent Employment Effects of Artificial Intelligence.
digitaleconomy.stanford.edu/app/uploads/2025/11/CanariesintheCoalMine_Nov25.pdf.
- Challapally, A., Pease, C., Raskar, R., & Chari, P. (2025). The GenAI Divide: State of AI in Business 2025. mlq.ai/media/quarterly_decks/v0.1_State_of_AI_in_Business_2025_Report.pdf.
- Ferdman, A. (2025). AI deskilling is a structural problem. *AI & Society*, 41.
doi.org/10.1007/s00146-025-02686-z.
- Frey, P. (2021). Visions of Automation: A Comparative Discussion of Two Approaches. *Societies*, 11(2). doi.org/10.3390/soc11020063.
- IBM (2025). Global C-suite Series: CEO Study (32nd edition). IBM Institute for Business Value. bm.com/downloads/documents/us-en/12f5a711174dc2ac.
- International Labour Organization. (2026). Gen AI, occupational segregation and gender equality in the world of work. International Labour Organization.
doi.org/10.54394/00033798.
- Narayanan, A., et al. (2024): A Safe Harbor for Independent AI Evaluation.
sites.mit.edu/ai-safe-harbor/.
- Roberts, C., Lawrence, M., & King, L. (2017). Managing automation: Employment, inequality and ethics in the digital age. Institute for Public Policy Research.
ippr.org/publications/managing-automation.
- Strauß, S. (2024). CAIL – Critical AI Literacy. Kritische Technikkompetenz für konstruktiven Umgang mit KI-basierter Technologie in Betrieben. Institut für Technikfolgen-Abschätzung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften. pub.oeaw.ac.at/0xc1aa5572_0x003f893c.pdf.
- Zika, G., et al. (2025). Künstliche Intelligenz: Potenzielle Effekte für den deutschen Arbeitsmarkt. doku.iab.de/forschungsbericht/2025/fb2325.pdf.

NEUE TECHNOLOGIEN GEGEN CHRONISCHE SCHMERZEN



© CC0 (Eren Li)

ZUSAMMENFASSUNG

Chronischer Schmerz ist ein weitverbreitetes Problem mit erheblichen gesellschaftlichen Folgen. Klassische Schmerztherapien umfassen medikamentöse und physikalische Verfahren, ergänzt durch psychotherapeutische und Lebensstil-Interventionen. Immer mehr rücken jedoch neue technologische Lösungsansätze in den Fokus. Diese reichen von neurotechnologischen Verfahren über Immersions-Technologien wie virtuelle Realität (VR) bis hin zu digitalen Selbstmanagement-Tools. In ersten Studien zeigen viele dieser Technologien vielversprechende Wirkungen. Dennoch ist die Erfolgsbilanz nicht einheitlich. Zudem stellen sich Fragen der Zugänglichkeit und der Integration in die Routineversorgung. Aus Sicht der Technikfolgenabschätzung bestehen Chancen für individuellere Therapien und eine Entlastung von Fachkräften, aber auch das Risiko verschärfter Ungleichheit und höherer Belastung durch Selbstverantwortung. Deshalb braucht es klare Qualitätsstandards, gerechte Zugangsregelungen und begleitende Evaluationen.

Neue digitale Technologien könnten chronische Schmerzen lindern.

Qualitätsstandards, Zugangsregelungen und Technologiebewertung sind gefragt

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Chronische Schmerzen betreffen in Österreich etwa 1,8 Millionen Menschen (Hammer et al. 2025) und verursachen erhebliche gesellschaftliche Kosten. Eine österreichische Kostenstudie schätzte die jährlichen gesellschaftlichen Kosten bei Personen im Erwerbsalter auf rund 10.200 Euro pro Patientin bzw. Patient, wobei neben direkten Gesundheitskosten auch Produktivitätsverluste und informelle Pflege ins Gewicht fallen (Mayer et al. 2019). Sie wirken in allen Lebensbereichen und beeinträchtigen die Lebensqualität. Außerdem können sie zu Angst- und Schlafstörungen oder depressiven Verstimmungen führen, die die Schmerzen wieder verschärfen (BMG 2025). Eine wichtige Rolle spielt daher die Prävention, insbesondere die Vermeidung einer Chronifizierung akuter oder wiederkehrender Schmerzen sowie die Verhinderung von Funktionsverlust, sozialem Rückzug und psychischen Begleiterkrankungen. In den letzten Jahren hat eine Vielzahl neuer Ansätze an Bedeutung gewonnen. Dazu zählen nicht nur digitale und neurotechnologische Verfahren, sondern auch biomedizinische Innovationen, etwa im Bereich standardisierter Cannabis-Arzneimittel, Biomarker, Epigenetik oder perspektivisch gentherapeutischer bzw. präzisionsmedizinischer Ansätze. Der folgende Beitrag fokussiert auf solche technologischen Verfahren, die bereits in klinischen Anwendungen, Pilotprojekten oder der Versorgungsdiskussion sichtbar sind – insbesondere Neuromodulation, VR und digitale Selbstmanagement-Tools.

Chronische Schmerzen betreffen in Österreich etwa 1,8 Millionen Menschen

Ein aktueller Schwerpunkt der medizinischen Praxis ist die Neuromodulation: Dabei werden elektrische Impulse gezielt an Nervengewebe abgegeben, um die Schmerzleitung zu beeinflussen. Techniken reichen von *Rückenmarkstimulation* über *tiefe Hirnstimulation* bis zu *peripherer Nervenstimulation*. In Österreich wie international werden diese Verfahren zunehmend in spezialisierten Zentren durchgeführt. Klinische Studien zeigen für bestimmte Gruppen von Patientinnen und Patienten teils deutliche Effekte, etwa bei der Rückenmarkstimulation. So berichtete eine Studie bei chronischen Rückenschmerzpatientinnen und -patienten nach implantierter Rückenmarkstimulation im Mittel eine Schmerzlinderung von über 60 % (Blazek et al. 2026). Die Evidenz ist jedoch insgesamt gemischt, da Wirksamkeit und Nutzen stark von Indikation, Auswahl der zu Behandelnden und Verfahren abhängen und belastbare Langzeitvergleiche vielfach fehlen.

Die Neuromodulation hat gute Ergebnisse gezeigt

Typischerweise werden dafür *Smarte Implantate* eingesetzt. Man spricht auch von „intelligenten Schmerzschrittmachern“. Dabei handelt es sich um implantierbare Geräte, die elektrische Signale etwa an Wirbelsäule oder Hirnnerven abgeben. Die München Klinik hat kürzlich einen neuen „Schmerzschrittmacher“ entwickelt (München Klinik 2024), bei dem elektrische Impulse aus einem unter der Haut platzierten Generator gesendet werden (Ślusarczyk et al. 2023). In Deutschland wurde kürzlich ein KI-gestütztes Rückenmarkstimulationssystem zugelassen, das die Stimulation anhand von Rückmeldungen der Patientinnen und Patienten zur Schmerzlinderung sowie potenziell anhand physiologischer Messdaten anpasst (Patzner 2025). Dabei bleibt die Quantifizierung von Schmerz eine zentrale Herausforderung, da Schmerzen überwiegend subjektiv beschrieben werden und ihre Einschätzung auch durch Kommunikation und Wahrnehmung im Behandlungskontext geprägt ist.

Schmerzschrittmacher werden entwickelt

Parallel dazu wächst der Einsatz *digitaler Anwendungen* wie Apps und Online-Programme, die das Selbstmanagement unterstützen können: Patientinnen und Patienten dokumentieren Schmerzstärke, Schlaf und Stimmung, erhalten motivierendes Feedback oder Ausgleichsübungen. Eine Metaanalyse kommt zum Schluss, dass eHealth-Interventionen bei chronischem Schmerz (etwa webbasierte Therapieprogramme) prinzipiell Nutzen bringen, etwa indem sie Patientinnen und Patienten mehr Selbstwirksamkeit verschaffen und Fachkräfte entlasten (Bartels et al. 2025). Wichtig ist jedoch: Diese Tools ergänzen, ersetzen aber nicht den Arztkontakt. Telemedizinische Angebote (z. B. Videosprechstunden für Schmerztherapie) sind weitere Komponenten der digitalen Versorgung.

Digitale Anwendungen können Behandlung effektiv unterstützen

Eine neuere Entwicklung fokussiert auf *VR-Technologien*, um Schmerzpatientinnen und -patienten über virtuelle Ablenkung oder gezieltes Neuroplastizitätstraining Linderung zu verschaffen. In Deutschland lief beispielsweise an der Universität Würzburg das Projekt „ReliefVR“, in dem Betroffene mit speziellen VR-Brillen und begleitenden individuell angepassten Übungen lernten, Bewegungen zu machen, die sie aus Angst vor Schmerz sonst eher vermeiden würden (Universität Würzburg 2022). Erste Daten deuten darauf hin, dass VR-gestützte Rehabilitation Symptome messbar lindern und das Bewegungsausmaß steigern kann (Baker et al. 2026).

Der Umgang mit Schmerzen kann mithilfe virtueller Realität geübt werden

Fortschrittliche Behandlungsansätze bedeuten nicht nur Hightech-Medizin. Vielmehr erweitern sie das Therapiespektrum um soziotechnische Interventionen (Weinhold/Gastaldi 2015). Das umfasst etwa begleitende Schulungsangebote, verhaltensorientierte Coaching-Programme oder (digitale) Gruppenprogramme. Therapien werden stärker auf individuelle Lebensgewohnheiten abgestimmt, was als Chance gilt, zugleich jedoch die Verantwortung für den Therapieerfolg anteilig auf die betroffene Person verlagert (Main et al. 2025).

Therapien werden individueller, die Verantwortung für den Therapieerfolg liegt stärker bei den Patientinnen und Patienten

Zu vielen Ansätzen fehlen allerdings große Langzeitstudien und systematische Vergleiche mit herkömmlichen Therapien (Valentijn et al. 2022). So ist unklar, wie nachhaltig die Effekte sind. Hinzu kommt, dass eine konsistente und kosteneffiziente Versorgung nicht erst bei der Therapie ansetzt: Bei vielen schmerzverursachenden Erkrankungen oder Verletzungsfolgen erfolgen Diagnose und geeignete Behandlung verspätet. Dies kann dazu beitragen, dass sich Schmerzverläufe chronifizieren, funktionelle Einschränkungen zunehmen und vermeidbare Folgekosten entstehen. Besonders deutlich wird dies etwa bei Endometriose, bei der Diagnoseverzögerungen von mehreren Jahren beschrieben sind.

Evidenzlage und Herausforderungen

Mehrere praktische Barrieren sind bekannt. Erstens ist die Wirksamkeit oft sehr individuell: Was bei einem Patienten oder einer Patientin wirkt, hilft dem bzw. der nächsten möglicherweise kaum, denn Patientinnen und Patienten reagieren unterschiedlich auf Reize und Lernmethoden (Mogil 2021). Zweitens erfordern interdisziplinäre Ansätze eine enge Kooperation zwischen Chirurgie, Schmerztherapie, Psychologie und IT. In vielen Kliniken fehlt jedoch das entsprechende Fachwissen oder die technische Ausstattung (McCartney et al. 2025). Drittens ist der Zugang ungleich verteilt: In ländlichen Regionen oder in der Regelversorgung sind nicht alle Behandlungsmöglichkeiten verfügbar. Zusätzlich können sozioökonomische Benachteiligung, Geschlecht, ethnische Zuschreibungen, Sprachbarrieren oder psychische Vorannahmen beeinflussen, wie Schmerzen wahrgenom-

Die Wirksamkeit ist oft individuell, die Implementierung herausfordernd und der Zugang ungleich verteilt

men, abgeklärt und behandelt werden. Bestimmte Patient:innengruppen laufen daher Gefahr, später eine Diagnose zu erhalten oder fehldiagnostiziert zu werden (Baker et al. 2024).

So treten chronische Schmerzen bei Frauen häufiger auf, sind oft stärker ausgeprägt und persistieren länger; zugleich können geschlechtsspezifische, hormonelle, immunologische und neurobiologische Mechanismen die Entstehung und Verarbeitung von Schmerz beeinflussen (Brezic et al. 2026). Auch Diskriminierungserfahrungen, Genderstereotype oder die Normalisierung bestimmter Schmerzen können Diagnose, Überweisung und Therapieentscheidungen verzögern. Studien, etwa im Bereich Endometriose, zeigen zudem, dass höher gebildete Frauen eher Zugang zu spezialisierten Therapien haben. Nicht zuletzt stellen sich Datenschutz- und Ethikfragen: Digitale Anwendungen erheben viele personenbezogene Daten, etwa zu Schmerzintensität, Bewegungsprofilen oder biometrischen Parametern. Ihre Verwendung muss transparent, sicher und zweckgebunden erfolgen. Zugleich ist zu klären, wie mit Personen umzugehen ist, die digitale Anwendungen aus Datenschutzbedenken ablehnen: Dies darf nicht dazu führen, dass keine gleichwertigen Alternativen angeboten werden. Bei KI-basierten Systemen sind Algorithmus-Bias und mangelnde Erklärbarkeit zu bedenken: Gesundheits-KI könnte bestehende Diskriminierungen (z. B. nach Alter oder Herkunft) unabsichtlich verstärken (Cascella et al. 2025).

Kosten, Nutzen und Zugangsbedingungen für unterschiedliche Bevölkerungsgruppen sind zu klären

Trotz der zahlreichen Hürden und Unsicherheiten muss eine ausgewogene Versorgungsstrategie auch bestehende Therapiepfade kritisch berücksichtigen. Langfristiger Opioidgebrauch kann mit erheblichen Risiken verbunden sein, darunter Abhängigkeit, Überdosierung und weitere gesundheitliche Folgewirkungen. Für cannabinoidbasierte Therapien wird zwar eine mögliche Rolle in der Behandlung chronischer Schmerzen diskutiert, die Evidenz ist jedoch je nach Indikation, Präparat und Studiendesign unterschiedlich belastbar; zugleich bestehen in der Praxis teils hohe Hürden bei Verschreibung und Kostenübernahme (Campbell et al. 2018).

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Die Entwicklung neuer Schmerztechnologien ist auch für die österreichische Gesundheitspolitik von hoher Relevanz. Die hohe Prävalenz chronischer Krankheiten mit Schmerzproblematik macht dieses Thema zu einer zentralen Gesundheitsfrage (Hammer et al. 2025). 2024 wurde die Schmerzmedizin in den Österreichischen Strukturplan Gesundheit aufgenommen, was den politischen Willen zur strukturierten Verbesserung der Versorgung zeigt (Baltaci 2025). Zugleich bestehen weiterhin versorgungsstrukturelle Defizite: Nach der bislang aktuellsten österreichweiten Stuserhebung waren 2022/2023 in Österreich 51 Schmerzambulanzen in Betrieb, davon nur sieben im Vollzeitbetrieb; zudem wurde ein rechnerischer Fehlbestand von 51,3 Schmerzambulanzen ausgewiesen (Hammer et al. 2025). Obwohl integrative Schmerzversorgung seit 2024 im Österreichischen Strukturplan Gesundheit verankert ist, bleibt die flächendeckende Umsetzung eines abgestuften, multimodalen Versorgungsmodells eine zentrale Herausforderung. Neue Technologien müssten daher gezielt in ein ganzheitliches Modell eingebettet werden, das medikamentöse, nichtinvasive, psychosoziale, rehabilitative und

Rahmenbedingungen: Infrastrukturen und ganzheitliches Modell

gegebenenfalls interventionelle Verfahren sinnvoll kombiniert. Für Parlament und Gesundheitspolitik stellen sich damit vor allem Fragen nach Wirksamkeit, Kosteneffizienz, Finanzierung, gerechtem Zugang, Datenschutz, Regulierung und Qualifikation des Gesundheitspersonals. Dabei betrifft das Thema nicht nur die Gesundheits-, sondern auch die Sozial- und Digitalpolitik: Entscheidend ist, ob technologische Innovationen bestehende Versorgungslücken verringern oder unbeabsichtigt neue Ungleichheiten schaffen. Etwa zwischen Stadt und Land, zwischen Spezialversorgung und Regelversorgung oder zwischen Personengruppen mit unterschiedlicher digitaler Ausstattung oder sozioökonomischem Hintergrund.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

In einer vertiefenden TA-Studie könnte untersucht werden, wie neue technologische und biomedizinische Ansätze zur Behandlung chronischer Schmerzen wirksam, sicher und sozial gerecht in die österreichische Versorgung integriert werden können. Dafür wären der aktuelle Wissensstand zu Wirksamkeit, Sicherheit, Kosten und Nutzen sowie Erfahrungen aus Schmerzzambulanzen, medizinischer Praxis und Pilotprojekten systematisch zusammenzutragen. Im Zentrum stünden weniger einzelne Anwendungen als vielmehr die Bedingungen ihrer sinnvollen Einbettung in ein multimodales Versorgungsmodell: Wie lassen sich digitale, neurotechnologische, pharmakologische und rehabilitative Verfahren vergleichen und kombinieren? Welche Anforderungen ergeben sich für Datenschutz, Regulierung, Erstattung, Personalqualifikation und Qualitätssicherung? Ebenso sollte geprüft werden, wie sich Zugangsbarrieren für ländliche Regionen, sozioökonomisch benachteiligte Gruppen oder Patientinnen und Patienten mit geringerer digitaler Kompetenz vermeiden lassen.

Eine TA-Studie könnte Kosten und Nutzen einzelner Ansätze bewerten und Gelingensbedingungen untersuchen

ZITIERTE LITERATUR

- Baker, M. B., et al. (2024). Overcoming Barriers: A Comprehensive Review of Chronic Pain Management and Accessibility Challenges in Rural America. *Healthcare*, 12(17), 1765. doi.org/10.3390/healthcare12171765.
- Baker, N. A., Polhemus, A. H., Baird, J. M., & Kenney, M. (2026). Embodied Fully Immersive Virtual Reality as a Therapeutic Modality to Treat Chronic Pain: A Scoping Review. *Virtual Worlds*, 5(1), 3. doi.org/10.3390/virtualworlds5010003.
- Baltaci, K. (2025). „Meilenstein“: Wien bekommt Österreichs erstes Schmerzzentrum. *Die Presse*. [diepresse.com/19455808/meilenstein-wien-bekommt-oesterreichs-erstes-schmerzzentrum](https://www.diepresse.com/19455808/meilenstein-wien-bekommt-oesterreichs-erstes-schmerzzentrum).
- Bartels, S. L., Pelika, A., Taygar, A. S., & Wicksell, R. K. (2025). Digital approaches to chronic pain: A brief meta-review of eHealth interventions - Current evidence and future directions. *Current Opinion in Psychology*, 62, 101976. doi.org/10.1016/j.copsyc.2024.101976.
- Blazek, F., et al. (2026). Long-term efficacy of neuromodulation in chronic pain management: A single-center retrospective study. *Frontiers in Pain Research*, 7, 1737302. doi.org/10.3389/fpain.2026.1737302.

- Brezic, N., Gligorevic, S., Sič, A., Tseriotis, V.-S., & Knezevic, N. N. (2026). Sexually Dimorphic Neuroimmune Pathways in Chronic Pain: A Comprehensive Systematic Review of Cellular and Molecular Mechanisms. *Biomolecules*, 16(2), 258. doi.org/10.3390/biom16020258.
- Campbell, G., Hall, W., Peacock, A., et al. (2018). Effect of cannabis use in people with chronic non-cancer pain prescribed opioids: Findings from a 4-year prospective cohort study. *The Lancet Public Health*, 3(7), e341–e350.
- Cascella, M., et al. (2025). Ethical Considerations in the Use of Artificial Intelligence in Pain Medicine. *Current Pain and Headache Reports*, 29(1), 10. doi.org/10.1007/s11916-024-01330-7.
- Hammer, S et al. (2025). Statuserhebung der österreichischen Schmerzambulanzen 2023. *Schmerz (Berlin, Germany)*, 39(3), 211–220. doi.org/10.1007/s00482-025-00871-z.
- Main, A., et al. (2025). Patients' Experiences of Digital Health Interventions for the Self-Management of Chronic Pain: Systematic Review and Thematic Synthesis. *Journal of Medical Internet Research*, 27(1), e69100. doi.org/10.2196/69100.
- Mayer, S., Spickschen, J., Stein, K. V., Crevenna, R., Dorner, T. E., & Simon, J. (2019). The societal costs of chronic pain and its determinants: The case of Austria. *PLoS ONE*, 14(3), e0213889. doi.org/10.1371/journal.pone.0213889.
- McCartney, et al. (2025). Professional-Facing Digital Health Technology for the Care of Patients With Chronic Pain: Scoping Review. *Journal of Medical Internet Research*, 27(1), e66457. doi.org/10.2196/66457.
- Mekhail, N., et al. (2020). Long-term safety and efficacy of closed-loop spinal cord stimulation to treat chronic back and leg pain (Evoke): A double-blind, randomised, controlled trial. *The Lancet Neurology*, 19(2), 123–134. [doi.org/10.1016/S1474-4422\(19\)30414-4](https://doi.org/10.1016/S1474-4422(19)30414-4).
- Mogil, J. S. (2021). Sources of Individual Differences in Pain. *Annual Review of Neuroscience*, 44(1), 1–25. doi.org/10.1146/annurev-neuro-092820-105941.
- München Klinik. (2024). Neuer „Schmerzschrötmacher“ schenkt Menschen mit chronischen Schmerzen neue Lebensqualität. München Klinik. muenchen-klinik.de/presse/pressearchiv/news/artikel/neuer-schmerzschrötmacher-schenkt-menschen-mit-chronischen-schmerzen-neue-lebensqualitaet-1/.
- Patzer, K.-H. (2025). Neue Technologie: KI-gestützte Rückenmarkstimulation. *Info Diabetologie*, 19(3), 50–50. doi.org/10.1007/s15034-025-5125-0.
- Universität Würzburg. (2022). VR-Technologie gegen Schmerzen. Julius-Maximilians-Universität Würzburg. uni-wuerzburg.de/aktuelles/einblick/single/news/vr-technologie-gegen-schmerzen/.
- Valentijn, P. P., et al. (2022). Digital Health Interventions for Musculoskeletal Pain Conditions: Systematic Review and Meta-analysis of Randomized Controlled Trials. *Journal of Medical Internet Research*, 24(9), e37869. doi.org/10.2196/37869.
- Weinhold, I., & Gastaldi, L. (2015). From Shared Decision Making to Patient Engagement in Health Care Processes: The Role of Digital Technologies. In S. Gurtner & K. Soyez (Eds.), *Challenges and Opportunities in Health Care Management* (pp. 185–196). Springer International Publishing. doi.org/10.1007/978-3-319-12178-9_15.

ÜBERFÜLLTER ORBIT



© CC0 (Pawel Czerwinski)

ZUSAMMENFASSUNG

Die starke Zunahme an Satelliten sorgt zunehmend für Probleme im am meisten genutzte Bereich der Erdumlaufbahn. Er ist bereits fast zu voll mit Satelliten und Weltraummüll, und eine problemlose Nutzung wird immer schwieriger. Durch weitere Innovationen, etwa Sonnenstrom aus dem All, wird sich das Problem verschärfen. Die Überfüllung führt schon jetzt zu schädlicher Lichtverschmutzung und kostspieligen Ausweichmanövern. Asteroideneinschläge auch fern der Erde und Cyberangriffe könnten zu einer Kettenreaktion von Kollisionen führen. Diese könnten den Ausfall wichtiger Beobachtungs- und Steuersysteme zur Folge haben. Die beginnende Nutzung sehr niedriger Umlaufbahnen ist mit weniger Weltraumschrott verbunden, löst aber nicht die grundlegende Problematik. Eine umfassende internationale Zusammenarbeit und Regulierung, insbesondere auch der kommerziellen Akteure, ist dringlich.

*Ressourcenproblem
Weltraum muss
dringend gelöst werden*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Die derzeit meistgenutzten Bereiche der Erdumlaufbahn sind der Low Earth Orbit (LEO) bis 2.000 km Höhe, der geostationäre Orbit (GEO) bei 35.786 km sowie der Medium Earth Orbit (MEO) dazwischen.¹ Mit Stand April 2026 befinden sich insgesamt etwa 32.000 Satelliten und Fragmente von über 10 cm Größe im Erdorbit, wenn man auch Schätzungen über z. T. geheime militärische Satelliten miteinbezieht.² Auch GEO ist überfüllt;³ MEO weniger, aber schon 2021 musste Galileo Weltraumschrott ausweichen.⁴ Der rasante Anstieg der neu in den Orbit platzierten Satelliten verschärft bestehende Probleme. Mehrere kürzlich begonnene und erwartbare Entwicklungen erfordern eine holistische Betrachtung der miteinander verschränkten, verstärkten und neu auftretenden Ressourcenprobleme und Risiken im Orbit.

Schon vor einiger Zeit wurde klar, dass die *Umweltwirkungen der Raumfahrt* nicht länger vernachlässigbar sind – dazu zählen Schadstoffe, die Behinderung der Weltraumbeobachtung sowie von satellitengestützter Fernerkundung durch die Reflexion von Licht und das Verdecken von Radiosignalen aus dem All. Es ist schon länger bekannt, dass die hohe Dichte an Satelliten und *Weltraummüll* vor allem im LEO bereits ein signifikantes Risiko für das Kessler-Syndrom birgt – eine Kaskade an Kollisionen, bei der die Splitter, die bei Kollisionen entstehen, mit weiteren Objekten kollidieren. Dadurch, dass immer mehr Ausweichmanöver notwendig werden, durch welche mehr Treibstoff verbraucht wird und die Lebensdauer der Satelliten sinkt,⁵ hängen Weltraummüll und Umweltwirkungen direkt zusammen.

Auch Asteroiden könnten eine Kettenreaktion auslösen. So hätte ein Einschlag des Asteroiden 2024 YT4⁶ auf dem Mond die Kraft einer großen Atombombe und selbst der geringe Anteil an dadurch herausgeschleudertem Gestein, das in die Erdumlaufbahn gelangen würde, würde je nach Flugbahn das Meteorenaufkommen im Orbit verzehn- oder verhundertfachen.⁷

Gleichzeitig führt die hohe Konzentration an anthropogenen Treibhausgasen in der Erdatmosphäre zu einer Kühlung und Kontraktion der Thermosphäre, einer geringeren Dichte der Atmosphäre im LEO und einem geringeren Sog auf Weltraumschrott in Richtung Erde. Dies verzögert das Verglühen von Objekten (Parker et al., 2025). Neben dem Risiko, Schäden an Satelliten und Raumfahrzeugen zu verursachen, ist Weltraumschrott auch deswegen problematisch, weil er viele Aluminiumteile enthält. Diese verändern die Reflexion von Licht im Orbit (die Albedo), und, bei Oxidierung, den Strahlungsantrieb. Dadurch können sie das Klima beeinflussen und die Ozonschicht schädigen (Hayashi et al., 2025). Ande-

Viele Satelliten und Müll im Orbit

Kollisionsrisiko und Verschmutzungsprobleme verschärfen sich

Asteroideneinschlag auf dem Mond könnte Risiko von Kollisionen in der Erdumlaufbahn erhöhen

... Treibhausgase ebenso

¹ sdo.esoc.esa.int/publications/Space_Environment_Report_I9R1_20251021.pdf.

² theguardian.com/science/ng-interactive/2026/mar/31/this-feels-fragile-how-a-satellite-smashing-chain-reaction-could-spiral-out-of-control.

³ physicsworld.com/a/space-debris-threat-to-geosynchronous-satellites-has-been-dramatically-underestimated/.

⁴ eusst.eu/newsroom/news/eu-sst-supports-galileo-first-collision-avoidance-manoevre-galileo-spacecraft.

⁵ rand.org/pubs/research_briefs/RBA1949-1.html.

⁶ Wofür eine Eintrittswahrscheinlichkeit von 4 % für das Jahr 2032 geschätzt wird.

⁷ space.com/astronomy/asteroids/asteroid-2024-yr4-wont-earth-but-it-could-still-ruin-your-day-heres-how.

rerseits enthält Weltraummüll noch weitere kritische Rohmaterialien und seltene Erden, was eine Wiederaufbereitung und Wiederverwertung – sofern technisch machbar – erstrebenswert machen würde (ibid.).

Es befinden sich mehrere Mega-Konstellationen – Netzwerke aus Hunderten bis Tausenden von Satelliten – im LEO und weitere sind geplant (Abbas, 2022). Dadurch erhöht sich das Aufkommen an Weltraumschrott signifikant und unvollständig verglühte Teile könnten beim Sturz auf die Erde zu Todesfällen führen (ibid.). Die Firma SpaceX, der ca. zwei Drittel der derzeit aktiven Satelliten gehören, plant – ebenso wie Google und Amazon/Blue Origin – Datenzentren im All für KI.⁸ Diese hätten gegenüber den sehr ressourcenintensiven **Datenzentren** auf der Erde den Vorteil, dass durchgehend Sonnenenergie genutzt werden und in der sehr kalten Umgebung auf Kühlwasser verzichtet werden könnte. Die Umsetzung dieser Pläne würde etwa eine Million zusätzlicher Satelliten erfordern.⁸

Auch bei Solarstrom aus dem All wird die ständige Verfügbarkeit von Sonnenlicht ausgenutzt, das dort deutlich intensiver ist als auf der Erde. Diese Technologie hat bereits einen hohen technologischen Reifegrad erreicht.⁹ Es sollen Solarpaneele in den GEO platziert und die gewonnene Energie mittels Mikrowellen zu Bodenstationen auf die Erde übertragen werden. Ein erster amerikanischer Prototyp existiert und für 2028 hat die VR China eine Konstruktion mit einer Spannweite im Kilometerbereich angekündigt.⁹

Megakonstellationen und besonders hell leuchtende Satelliten – BlueWalker 3 etwa scheint heller als 99 % der Sterne¹⁰ – beeinträchtigen jetzt schon die Sichtbarkeit des Nachthimmels, was als Verlust empfunden werden kann und das Verhalten von Tieren beeinflusst (Kyba *et al.*, 2023). Das Problem könnte sich verschärfen. Die Firma Reflect Orbital hat einen Antrag an die US-Raumfahrtbehörde gestellt, um große Spiegel zwischen Satelliten anzubringen, um an bestimmten Orten punktuell mond- bis tageslichtähnliche Zustände zu erzeugen, etwa für die Fortsetzung von Industrieaktivitäten im Freien oder die Lenkung von Sonneneinstrahlung auf erdbasierte Solaranlagen über Nacht.¹¹ Schlafforschende warnen in einem offenen Brief an die Behörde davor, dass bereits bewusst gar nicht als hell empfundene **Lichtmengen den zirkadianen Rhythmus von Menschen und anderen Tieren sehr stören** können, mit gravierenden gesundheitlichen Folgen.¹²

Angesichts der Überfüllung bietet es sich an, in bisher wenig genutzte Höhen auszuweichen, so in den Very Low Earth Orbit (VLEO), in Höhen von unter 450 km. Von dort sind sehr hochauflösende Abbildungen der Erde möglich, was insbesondere für das Militär interessant ist. Die starke Erdanziehungskraft in diesen Höhen stellt jedoch besonders hohe Anforderungen an Robustheit und Antrieb der Satelliten, die lange Zeit nicht erfüllt waren. Die ISS fliegt seit über 25 Jahren in einer Höhe von 400 km¹³. Auch die VR China hat eine permanent besetzte Raumstation im VLEO und hatte dort bereits einen Satelliten. Österreich und die Niederlande planen im Rahmen des Projekts LEO2VLEO, bis 2027 drei Nanosatelliten zu platzieren, welche zwischen VLEO und LEO wechseln.¹⁴ Aufgrund ih-

*Megakonstellationen
...*

*... und womöglich
Datenzentren
verstärken das
Ressourcenproblem*

*Für Solarstrom aus
dem All gibt es einen
Prototypen*

*Lichtverschmutzung
stört Biorhythmus und
womöglich Navigation*

*Firma möchte gezielt
auf Erde leuchten*

*Innovation:
Very Low Earth Orbit*

⁸ [nature.com/articles/d41586-026-01370-6](https://www.nature.com/articles/d41586-026-01370-6).

⁹ [weforum.org/stories/2025/10/space-based-solar-power-energy-transition/](https://www.weforum.org/stories/2025/10/space-based-solar-power-energy-transition/).

¹⁰ [nature.com/articles/d41586-023-03054-x](https://www.nature.com/articles/d41586-023-03054-x). [nature.com/articles/d41586-023-03054-x](https://www.nature.com/articles/d41586-023-03054-x).

¹¹ [theguardian.com/science/2026/apr/05/satellite-mirror-plans-could-disrupt-sleep-and-ecosystems-worldwide-scientists-say](https://www.theguardian.com/science/2026/apr/05/satellite-mirror-plans-could-disrupt-sleep-and-ecosystems-worldwide-scientists-say).

¹² [bioclocks.uk/news/bambos-](https://www.bioclocks.uk/news/bambos-).

¹³ [esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Wo_ist_die_Internationale_Raumstation](https://www.esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Wo_ist_die_Internationale_Raumstation).

¹⁴ [militaeraktuell.at/bundesheer-satelliten-gemeinsam-niederlanden/](https://www.militaeraktuell.at/bundesheer-satelliten-gemeinsam-niederlanden/).

rer Nähe zur Erde können Satelliten im VLEO automatisch verglühen. Dies könnte das Problem des Weltraummülls zwar stark verringern. Es stünde allerdings nicht im Einklang mit dem Ziel der Kreislaufwirtschaft in der Raumfahrt, zudem besteht weiterhin die mit dem Verglühen verbundene Verschmutzung und Schädigung der Ozonschicht (Roberts, 2025), ebenso wie die Risiken durch unvollständig verglühte Teile.

Zum Risiko von Kollisionen und der Überlastung von Radiofrequenzen können hybride Bedrohungen beitragen. Bereits jetzt wird die Signalübertragung im All durch Jamming gestört und durch Spoofing verfälscht.¹⁵ Im Jahr 1998 traf ein Satellit auf die Erde, nachdem seine Solarpaneele durch einen Hackingangriff falsch ausgerichtet worden waren und seine Batterie verbrannte (Jha et al., 2022). Satelliten könnten auch manipuliert und als Antisatellitenwaffen eingesetzt werden.¹⁵ Bei Satelliten lassen sich besondere Vulnerabilitäten ausnutzen: Erstens befinden sich aufgrund der langen Lebensdauer und der mangelnden Zugänglichkeit für Systemaktualisierungen, viele Satelliten mit Legacy-Betriebssystemen im Umlauf, welche für heutige Cyberangriffe nicht gerüstet sind (ENISA, 2025). Zweitens bedeutet der Einsatz von Megakonstellationen, dass die Manipulation eines Satelliten sehr viele Satelliten gleichzeitig beeinflussen könnte (Jha et al., 2022). KI-Anwendungen vereinfachen Cyberangriffe stark und erweitern den Kreis der potentiellen Akteure, und quantencomputinggestütztes Hacking könnte für diejenigen, die Zugang dazu haben, eine Reihe bisheriger Verschlüsselungsmethoden wirkungslos machen. Dadurch werden Cyberisiken auch bei Satelliten akut. Eine umfassende weltweite Regulierung des Raumverkehrs fehlt, wird aber aufgrund nahender Kippunkte dringend benötigt.¹⁶ Zudem ist die Situation fragil durch Abhängigkeit von einzelnen Akteuren wie dem US-amerikanischen Traffic Coordination System for Space (TraCSS) bei der Koordination von Ausweichmanövern.¹⁷ Bisherige Regelwerke zielen vor allem darauf ab, das Verglühen von Objekten nach Ende ihrer Lebensdauer zu gewährleisten und das Ablösen von Teilen beim Befördern in die Umlaufbahn zu verhindern bzw. deren schnelles Verglühen zu gewährleisten. Projektionen der ESA zeigen jedoch, dass selbst bei strikter Einhaltung dieser Regeln eine Fortsetzung der bisherigen Entwicklung langfristig zu einer erheblichen Überschreitung des geschätzten Schwellenwerts für eine nachhaltige Nutzung führt (ESA, 2025). Wenn Satellitenoperatoren keine Ausweichmanöver veranlassen würden, würde es nur Tage oder Wochen dauern, bis eine Kettenreaktion an Kollisionen den LEO unbrauchbar machen würde.¹⁸ Wird Weltraumschrott nicht gezielt entfernt, könnte LEO schon in 50-100 Jahren nicht mehr nutzbar sein – und mit Entfernung in etwa 200 Jahren (Bennett, 2025). Die erste Mission zur Entfernung ist für 2027 durch die Europäische Weltraumagentur und die Firma ClearSpace geplant.¹⁹ Bislang werden Eigentumsrechte und Fragen der Verantwortung bilateral gelöst. Mit steigender Kommerzialisierung stellt sich zunehmend die Frage, wie bei Insolvenzen Eigentums- und Steuerungsrechte, übertragen werden können (ibid.). Zu bedenken wäre bei dieser Frage, wie

Hybride Bedrohungen

Verbindliche Zusammenarbeit und weltweite Regulierung dringend gebraucht

Vorgehen bei Insolvenz privater Akteure muss geklärt werden

¹⁵ space.com/space-exploration/satellites/an-ai-cyberattack-could-trigger-a-satellite-apocalypse-in-the-next-2-years.

¹⁶ rand.org/pubs/research_briefs/RBA1949-1.html.

¹⁷ reuters.com/business/aerospace-defense/space-industry-urges-us-congress-not-axe-system-that-prevents-satellite-2025-07-08/.

¹⁸ assets.publishing.service.gov.uk/media/6620cf9a77a30aa0c4757d35/rhc_report_on_the_future_regulation_of_space_technologies.pdf.

¹⁹ clearspace.today/news/prelude.

mit der Verhandlungsmacht von Großkonzernen umgegangen werden sollte. Geriete eine Firma, die viele Satelliten im Orbit hat, in Zahlungsschwierigkeiten, und könnte die Steuerung nicht rasch übernommen werden, könnte es sein, dass keine Kosten für einen Bailout gescheut würden, um eine fatale Kettenreaktion zu verhindern. Dies setzt unerwünschte Anreize für risikoreiches Verhalten. Auch die Verantwortung für die steigenden Kosten von Ausweichmanövern und die erhöhten Versicherungskosten sollte diskutiert werden.

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Das Bundesheer hat im März 2026 eine Demoversion eines seiner Satelliten präsentiert, welcher Spoofing und Signalunterbrechungen und -störungen erkennen soll.²⁰ Das Projekt Leo2VLEO zielt auch auf strategische Unabhängigkeit ab.²⁰ Die aktive Mitwirkung an der Raumfahrt bedeutet auch Mitverantwortung für eine nachhaltige Nutzung, wie in der Österreichischen Weltraumstrategie 2035+ reflektiert.²¹ Österreich hat einen Anteil von erneuerbaren Energien bei der Stromerzeugung von ca. 80 % und plant eine rasante Elektrifizierung des Energiesystems, mit dem Ziel der CO₂-Neutralität bereits für das Jahr 2030. Die damit einhergehende Abhängigkeit von satellitengestützten Technologien zur Aufrechterhaltung der Netzstabilität²² bei stark variablen Quellen bedeutet eine hohe Vulnerabilität gegenüber Bedrohungen für Satelliten. Die nachhaltige und sichere Nutzung der Ressource Weltraum ist also von unmittelbarem Interesse für Österreichs Sicherheit und Energieversorgung.

*Österreichische
Satelliten*

*Energietransition
verstärkt Abhängigkeit
von Satelliten*

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Die zunehmende Abhängigkeit von einem nutzbaren Orbit, die sich akkumulierenden und interagierenden Folgen der rasant zunehmenden Nutzung, sowie die rasche Zunahme des Risikos eskalierender Ereignisse erfordern folgende Maßnahmen: 1. die Verstärkung der internationalen Zusammenarbeit für regulatorische und ökonomische Maßnahmen in Bezug auf Recyclingfähigkeit und Kreislaufwirtschaft, 2. automatisierte Systeme für Ausweichmanöver, 3. erhöhte Cybersicherheit, 4. die Ausweitung der Befugnisse überwachender Institutionen in Bezug auf Datenerhebung und deren Durchsetzungsmöglichkeiten von Beschlüssen, welche das Vermeiden von Kollisionen betreffen. Fragen der Haftung für Objekte, deren Steuerung verloren geht, für die Folgen von Kollisionen und für Weltraumschrott sollten möglichst auf internationaler Ebene geklärt werden. Die technischen Möglichkeiten, Weltraumschrott wiederzuverwerten, statt ihn verglühen zu lassen, sollten untersucht werden. Ebenso sollten Ansätze für eine ganzheitliche Strategie zum Umgang mit negativen Externalitäten wie Treibhausgasemissionen, Luft- und Lichtverschmutzung erarbeitet werden – dazu sollte aus Erfahrungen mit bisherigen internationalen Abkommen, welche sich auf andere so-

*Nachhaltige und
sichere Nutzung
-
zahlreiche offene
Fragen*

²⁰ [orf.at/stories/3421931/](https://www.orf.at/stories/3421931/).

²¹ [bmlv.gv.at/wissen-forschung/publikationen/beitrag.php?id=3765](https://www.bmlv.gv.at/wissen-forschung/publikationen/beitrag.php?id=3765).

²² publicdownloads.entsoe.eu/clean-documents/RDC%20documents/2021_Technology%20Factsheet.pdf.

ziale Dilemmata beziehen, bei denen eine frei zugängliche Ressource durch übermäßige Nutzung erschöpft wird, gelernt werden. Dies ist in Bezug auf den LEO und den geostationären Orbit wichtig, aber nicht zuletzt auch für den VLEO, bei dessen Erschließung für Satelliten von Anfang an darauf hingearbeitet werden sollte, die im LEO bereits entstandenen Probleme nicht zu wiederholen.

Aufgrund seines Engagements bei der Raumfahrt und seiner historischen Rolle bei der internationalen Zusammenarbeit könnte Österreich eine Vorreiterrolle einnehmen. Dazu sollten die zugrunde liegenden Herausforderungen bei der Kooperation, die verschiedenen miteinander verschränkten Ebenen der technischen Entwicklungen sowie die sich daraus ergebenden Ansatzpunkte für Anreizmechanismen und Regulierung evaluiert werden. Hier kann die Technikfolgenabschätzung mit Methoden zur Einbindung von Stakeholdern eine wichtige Rolle spielen.

Österreich kann
Vorreiterrolle
einnehmen

ZITIERTE LITERATUR

- Abbas, Sh. 2025. Challenges to Space Activities in the Context of Mega Satellite Constellations: A Focus on Environmental Impacts. *Astron. Space Sci.* 2025; 42(1):1-13. DOI: [10.5140/JASS.2025.42.1.1](https://doi.org/10.5140/JASS.2025.42.1.1).
- Bennett, M.M. 2025. Orbital debris requires prevention and mitigation across the satellite life cycle. *Commun Eng* 4, 95. DOI: [10.1038/s44172-025-00430-5](https://doi.org/10.1038/s44172-025-00430-5).
- European Space Agency (ESA), 2025. ESA Space Environment Report 2025. sdo.esoc.esa.int/publications/Space_Environment_Report_I9R1_20251021.pdf.
- European Union Agency for Cybersecurity (ENISA), 2025. ENISA Space Threat Landscape 2025. enisa.europa.eu/publications/enisa-space-threat-landscape-2025.
- Hayashi, F., Kioka, A., Ishii, T., Nakamura, T., 2025. Unveiling the resource potential of space debris: A forecast of valuable metals to 2050. *Waste Management* 193/1(376-385). DOI: [10.1016/j.wasman.2024.12.019](https://doi.org/10.1016/j.wasman.2024.12.019).
- Jha et al., 2022. Safeguarding the final frontier: Analyzing the legal and technical challenges to mega-constellations. *J Space Saf Eng* 4, 9, DOI: [10.1016/j.jsse.2022.08.006](https://doi.org/10.1016/j.jsse.2022.08.006).
- Kyba et al. (2023). Citizen scientists report global rapid reductions in the visibility of stars from 2011 to 2022. *Science* 379, 265-268. doi.org/10.1126/science.abq7781.
- Parker, W.E., Brown, M.K. & Linares, R. 2025. Greenhouse gases reduce the satellite carrying capacity of low Earth orbit. *Nat Sustain* 8, 363-372. DOI: [10.1038/s41893-025-01512-0](https://doi.org/10.1038/s41893-025-01512-0).
- Roberts, P.C.E., 2025. VLEO and space sustainability: how does Very Low Earth Orbit contribute to the shift towards more sustainable space activities? *CEAS Space J* DOI: [10.1007/s12567-025-00677-w](https://doi.org/10.1007/s12567-025-00677-w).

INTELLIGENTE SOZIALE AGENTEN GEGEN EINSAMKEIT? (AKTUALISIERT)



© unsplash.com/Markus Spiske, Logan Weaver; Thomas Bayer

ZUSAMMENFASSUNG

Immer mehr digitale Anwendungen kommen auf den Markt, die zum Ziel haben, Menschen im Alltag emotional zu unterstützen und zu beraten. Unter digitalen sozialen Agenten versteht man KI-gestützte Chatbots, die textliche und/ oder visuelle Inhalte für Gespräche mit Anwender:innen produzieren. Auf der einen Seite können solche Anwendungen die mentale und emotionale Gesundheit der Nutzer:innen stärken, ärmeren Bevölkerungsgruppen den Zugang zu psychologischer Unterstützung erleichtern und gegebenenfalls psychologische Behandlungen im Alltag unterstützen. Auf der anderen Seite besteht die Gefahr der Abhängigkeit, der langfristigen Verstärkung von Einsamkeit und des Verlusts zwischenmenschlicher Kompetenzen. Ob ein dialogorientierter KI-Chatbot eher die Fähigkeiten der Nutzenden stärkt, Beziehungen zu anderen Menschen aufzubauen, oder Einsamkeit eher noch verstärkt, hängt unter anderem maßgeblich von der Gestaltung und dem Diskurs über KI ab.

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Immer mehr digitale Anwendungen kommen auf den Markt, die zum Ziel haben, Menschen im Alltag emotional zu unterstützen und zu beraten. Sie werden als intelligente soziale Agenten oder „conversational AI“ bezeichnet. Dabei handelt es sich meist um KI-gestützte Chatbot-Anwendung die mittels **Generativer Künstlicher Intelligenz** (GenKI) textliche, visuelle und audio- Inhalte für Gespräche mit Anwenderinnen führen. Laut Herstellern können intelligente soziale Agenten die Rolle eines Sparringpartners, Beraters, Mentors oder selbst eines Freundes übernehmen (dazu siehe auch **Social (Ro-)Bots: Maschinen als Gefährtinnen**). Zu den am häufigsten genutzten Anwendungen gehören „Replika“ aus den USA, die vor allem in Asien beliebte App „Xiaoice“ sowie die seit 2022 verfügbare Anwendung „character.ai“. Insbesondere Jugendliche greifen auf intelligente soziale Agenten zunehmend gerne zu.

Die auf dem Markt verfügbaren Chatbots setzen ähnliche Methoden ein und werben mit unterschiedlichen Schwerpunkten. Im Laufe der Interaktion mit den Nutzenden lernen die Chatbots die Vorlieben und Interessen der Nutzenden kennen und passt ihre Antworten entsprechend an. Replika ist auf iPhone- und Android-Plattformen verfügbar und lässt sich über Text-, Sprach-, Augmented- und Virtual-Reality-Schnittstellen nutzen. Gespräche erfolgen mit einem vorgefertigten oder vom Nutzenden generierten Avatar (Maples 2024). Solche Anwendungen bieten die Möglichkeit, mit einem digitalen persönlichen Lehrer, Assistenten, Freund oder Partner zu interagieren, der den Anwendern jederzeit zur Verfügung steht und bei allem helfen kann. Die Plattform character.ai wirbt insbesondere damit, dass Gespräche mit digitalen Avataren bekannter Persönlichkeiten, Spiel- und Zeichentrickfiguren möglich sind. Die Plattform bietet außerdem die Möglichkeit, den vorprogrammierten digitalen Gesprächspartner je nach angestrebter Nutzung auszuwählen (z. B. Coach für Bewerbungsgespräche oder Fremdsprachenlehrer, Reiseplanungsbegleiter). Sowohl character.ai als auch das 2023 auf den chinesischen und japanischen Markt gebrachte „GPT Clones“ der Firma Xiaoice, die zu Microsoft gehört, werden dafür trainiert, konkrete Personen zu imitieren. Mit wenigen Daten – drei bis fünf Minuten eines öffentlichen Videos oder Daten aus sozialen Medien – kann der virtuelle Klon einer Person des öffentlichen Lebens erzeugt werden (Liu 2023).

Intelligente soziale Agenten werden zu unterschiedlichen Zwecken genutzt. Eine zentrale Anwendung stellt die psychologische Unterstützung und Motivationsförderung im Bildungskontext (siehe auch **KI-Emotionserkennung**) dar (Ganguly et al. 2026). Erste Forschungsergebnisse zeigen, dass intelligente soziale Agenten sich auf die mentale Gesundheit positiv auswirken können. Als Grund werden dessen permanente Verfügbarkeit, seine Gesprächsfähigkeit und seine Fähigkeit, als Gesprächspartner nicht zu urteilen, genannt. Nutzende berichten außerdem von positiven Lebensveränderungen, etwa, sich dank der Nutzung in ihren realen Beziehungen empathischer zu verhalten. Einige Anwendungen haben bei Studierenden gute Ergebnisse erzielt. Auch für die Unterstützung der psychischen Gesundheit von Kindern und Jugendlichen wird ein bedeutsames Potenzial gesehen. Manche Chatbots sind spezifisch und gezielt auf die Unterstützung der mentalen Gesundheit zugeschnitten, wie beispielsweise der Chatbot des Start-

Viele Menschen, insbesondere Jugendliche und junge Erwachsene, nutzen digitale Chatbots zur emotionalen Unterstützung im Alltag

Intelligente soziale Agenten können digitale Avatare bekannter Persönlichkeiten oder von Privatpersonen nachahmen

Intelligente soziale Agenten können sich auf die mentale Gesundheit positiv auswirken

ups „Wysa“.¹ Wysa adressiert sowohl Patientinnen und Patienten als auch Ärztinnen und Ärzte. Letzteren bietet Wysa Unterstützung bei der Entwicklung von maßgeschneiderten Behandlungstherapien. Seit dem 15. April 2026 ist die Lösung einer Psychologin aus Klagenfurt „Mind Springs“ verfügbar. Damit strebt sie an, „klinisch bewährte Methoden mithilfe von KI“ zu skalieren (mindsprings.ai 2026). Die meisten Chatbots, die auf großen Sprachmodellen basieren und Menschen bei psychischen Belastungen unterstützen sollen, verfügen allerdings nicht über eine Zulassung als Medizinprodukt. In UK wurde eine erste Chatbot-Anwendung im Bereich der psychischen Gesundheit („Limbic Access“²) zugelassen. Diese soll insb. dabei helfen, Erstdiagnosen zu verfassen und Patient:innen zu identifizieren, die prioritär behandelt werden sollen.

Studienergebnisse deuten aber auch auf negative Effekte hin, wie dass Menschen in zwischenmenschlichen Konflikten weniger bereit sind, Verantwortung zu übernehmen – dies wird in Zusammenhang mit der Tendenz von Chatbots gebracht, auch bei gegenteiliger Faktenlage die Position der Nutzenden zu bestärken (Cheng et al. 2026). Ähnlich problematisch ist diese Tendenz bei Nutzenden, deren Prompts um möglicherweise psychotische Wahrnehmungen kreisen: Manche Modelle regen bei solchen Nutzungsmustern dazu an, sich Hilfe zu suchen, und verweigern, Ratschläge zu potenziell psychotischen Handlungen zu geben; andere Modelle bestärken diese. Mehrere Suizidfälle wurden mit der intensiven Nutzung von KI-Chatbots in Zusammenhang gebracht (Fieldhouse et al. 2025).

Die Fähigkeit von Chatbots, Wünsche zu erkennen und eine Art „Echokammer der Zuneigung“ zu schaffen, könnte ihre Anwendern hochgradig süchtig machen (Mahari und Pataranutaporn 2024). Auch Mira Murati, Chief Technology Officer von OpenAI, warnte vor Suchtgefahren durch KI. Diese könnten insbesondere durch das langfristige Gedächtnis der Chatbots und die Möglichkeit, Systeme hochgradig zu personalisieren, entstehen (Klar 2023). Eine exzessive Nutzung könnte zu einer inneren Entfremdung und verstärkter Einsamkeit führen (Uhle 2024) oder gar eine Art „digitale Bindungsstörung“ verursachen. Die Nutzenden würden Kompetenzen verlieren, sich auf andere Menschen einzulassen und empathisch zu reagieren (Mahari und Pataranutaporn 2024). Eine längere tägliche Nutzung von Chatbots geht mit verstärkter Einsamkeit, emotionaler Abhängigkeit, problematischer Nutzung und verminderter Sozialisierung einher (Fang et al. 2025).

Insbesondere marginalisierte und vulnerable Bevölkerungsgruppen könnten stärker gefährdet sein. So kann die Nutzung durch Kinder sie davon abhalten, ihre Empathiefähigkeit zu entwickeln. Denn eine intensive Nutzung kann bei Ihnen unrealistische Erwartungen an menschlichen Beziehungen wecken (Malfacini 2025). Für Kinder und Jugendliche bergen primär kommerziell motivierte KI-Chatbots außerdem das Risiko psychischer Belastungen (Ärzteblatt 2026), beispielsweise durch die Ausgabe sexualisierter Inhalte³ und erhöhen ihren riskanten Medienkonsum (DAK 2026). Auch die Nutzung durch Menschen mit einer Internetpornografie-Sucht könnte ihre Symptome verschärfen (Malfacini 2025).

Potenzielle negative Folgen: Bestärkung psychotischer Handlungen und geringere soziale Kompetenzen

Suchtgefahr und verstärkte Einsamkeit

Marginalisierte und vulnerable Bevölkerungsgruppen sind besonders gefährdet

¹ wysa.com.

² limbic.ai/access.

³ orf.at/stories/3402682/.

Parallel dazu wurden gravierende Mängel festgestellt, wie Verletzung grundsätzlicher europäischer Datenschutzstandards oder die Ausgabe unpassender (sexueller) Inhalte (Krempel 2023). Anwendungen, welche andere Personen simulieren, werden auch dazu genutzt, um Stalking zu automatisieren⁴. Insbesondere über die langfristige Nutzung intelligenter sozialer Agenten ist bisher wenig bekannt.

KI-Chatbots, die gezielt zur Förderung der psychologischen Gesundheit angeboten werden, könnten insbesondere ärmeren Bevölkerungsgruppen den Zugang zu psychologischer Unterstützung erleichtern, die sich ein solches Angebot sonst nicht leisten könnten. Problematisch wird es allerdings insbesondere dann, wenn bestimmte Funktionalitäten nur gegen Aufpreis erhältlich sind. Bisher werden solche KI-Anwendungen, die gezielt und ausschließlich dazu dienen sollen, die mentale Gesundheit von Patientinnen und Patienten zu fördern, nicht als Ersatz, sondern eher als Unterstützung einer psychologischen Behandlung angesehen. Wissenschaftlichen Erkenntnisse stützen den Einsatz als eigenständige Therapiemaßnahmen nicht vollständig (Hua et al. 2025).

KI-Chatbots können den Zugang zur psychologischen Unterstützung erleichtern, die medizinische Behandlung psychischer Störungen aber nicht ersetzen

Ob ein dialogorientierter KI-Chatbot eher die Fähigkeiten der Nutzenden stärkt, Beziehungen zu anderen Menschen aufzubauen, oder Einsamkeit eher noch verstärkt, hängt stark vom Design der Anwendungen ab. Chatbots können beispielsweise so gestaltet werden, dass sie als Übungsraum zum Erlernen von Konfliktlösungskompetenzen dienen und zur Verbesserung des Verhaltens in ihren analogen interpersonellen Beziehungen führen (Uhle 2024). Bewusste Designentscheidungen, die Nutzenden im digitalen Raum solange wie möglich verbleiben zu lassen (sogenannte „dark patterns“), können wiederum eher Einsamkeit verstärken (Mahari und Pataranutaporn 2024). Außerdem werden dialogfähige KI auch nicht immer für das eingesetzt, wofür die jeweiligen Chatbots trainiert wurden (Longpre et al. 2024). Nicht nur Designentscheidungen, sondern auch Diskurse über KI-Chatbots bzw. intelligente soziale Agenten beeinflussen, wie Menschen mit ihnen umgehen und wie gut sie wirken. Denn das mentale Modell einer Person, das heißt ihre Vorstellung des Chatbots, zum Beispiel als mitfühlend-fürsorglicher oder als emotionsloser Algorithmus, prägt ihre Interaktion mit dem Chatbot. Dieses mentale Modell ergibt sich aus dem kulturellen Hintergrund, persönlichen Überzeugungen, aber auch aus den gesellschaftlichen Narrativen und dem Diskurs von Software-Anbietern zu ihren Produkten. Durch eine sorgfältige Darstellung der Anwendung (sogenanntes „Priming“), die einen Chatbot als einfühlsam darstellt, kann Vertrauen in das System gesteigert, eine höhere Bindung und so höhere Wirkungen beispielsweise bei der Verbesserung der mentalen Gesundheit erreicht werden (Pataranutaporn et al. 2023), wobei die Suchtgefahr auch steigen kann. Hingegen können antisoziale Konnotationen die potenziellen Vorteile eines Einsatzes von KI zur Verbesserung zwischenmenschlicher Kommunikation untergraben (Hohenstein et al. 2023). Kaum erforscht und potenziell weitreichend sind die langfristigen Folgen positiver Narrative, die ggf. die Risiken in den Hintergrund geraten lassen. Insbesondere die Ausnutzung positiver Narrative zu Marketingzwecken bzw. um Unternehmensprofite zu maximieren, könnte weitreichende gesellschaftliche Folgen mit sich bringen (Pataranutaporn et al. 2023).

Design- und Kommunikationsentscheidungen wirken sich auf soziale Kompetenzen, Gesundheit und Wohlbefinden aus

⁴ [theguardian.com/technology/2025/feb/01/stalking-ai-chatbot-impersonator](https://www.theguardian.com/technology/2025/feb/01/stalking-ai-chatbot-impersonator).

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Auch wenn Österreich aktuell den Aufbau von Kompetenzen im Bereich KI in Gesellschaft fördert (Bundeskanzleramt 2024), wurden Chancen und Risiken der Nutzung intelligenter sozialer Agenten zum Aufbau sozialer Kompetenzen und zur Förderung der mentalen Gesundheit bisher noch nicht systematisch ausgelotet. Erste Schritte einer Auseinandersetzung werden gemacht. So befasst sich eine Arbeitsgruppe des österreichischen Bundesverbands für Psychotherapie mit den Chancen und Risiken von KI-Tools in der psychotherapeutischen Praxis (ÖBVP o. J.). Angesichts der rasch steigenden Nutzungszahlen, der unbekannt langfristigen Folgen sowohl für Gesundheit und Wohlbefinden der Nutzenden als auch für den gesellschaftlichen Zusammenhalt und der fehlenden Qualitätssicherungsmechanismen und grundsätzlichen Datenschutzbedenken mancher Anwendungen wäre eine Auseinandersetzung mit ihren Chancen und potenziellen Auswirkungen geboten. Dabei wäre zu überlegen, wie die Wirksamkeit nachgewiesen werden kann, wie die Anwendungen in die klinische Versorgung integriert werden könnten, ohne einen gerechten Zugang zu Therapieplätzen zu gefährden. Außerdem müssten ausreichende Kompetenzen bei Personal, Patientinnen und Patienten aufgebaut werden.

Bislang stehen intelligente soziale Agenten wenig im Vordergrund gesellschaftlicher und politischer Diskussion um Generative KI

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Die Forschung zu Auswirkungen der Verbreitung intelligenter sozialer Agenten auf Individuen im privaten und beruflichen Kontext sowie auf Gesellschaften steckt noch in den Kinderschuhen. Das Feld entwickelt sich rasant. So stellen **KI-Agenten**, die in der physischen und digitalen Welt Aktionen ausführen können, inzwischen auch eine Möglichkeit dar, durch den Zugang zu Privatdaten (z. B. E-Mails, Fotos, Terminkalender) Verhaltensmuster über die Zeit zu monitoren und Empfehlungen für Verhaltensänderung automatisch und regelmäßig zu formulieren. Diese Systeme könnten in das private Leben noch weiter durchdringen und bringen weitere Chancen, aber auch Risiken mit sich. Insbesondere sind die Langzeitfolgen des intuitiven Engagements mit intelligenten sozialen Agenten interdisziplinär zu erforschen. Außerdem wäre auszuloten, inwiefern der aktuelle Regulierungsrahmen die Risiken ihrer Nutzung ausreichend abdeckt bzw. welche Regulierungsbedarfe durch die verbreitete Nutzung der KI-Chatbots entstehen.

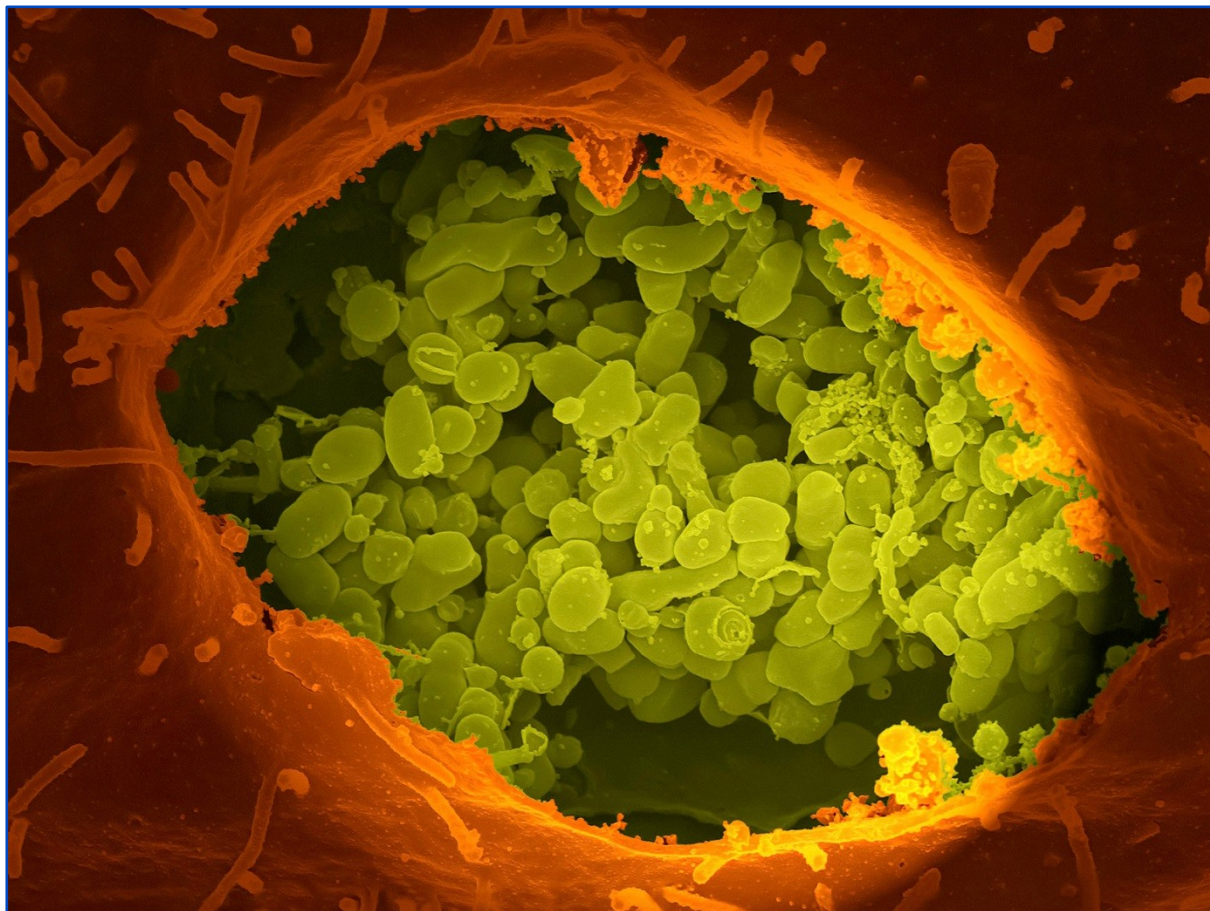
Ein besseres Verständnis der Nutzung und Wirkung intelligenter sozialer Agenten ist notwendig

ZITIERTE LITERATUR

- Bundeskanzleramt (2024). Digital Austria. digitalaustria.gv.at.
- Cheng et al. (2026). Exploring the Ethical Challenges of Conversational AI in Mental Health Care: Scoping Review. JMIR Publications. doi.org/10.2196/60432.
- DAK (2026). DAK-Suchtstudie untersucht Jugendentrend: KI-Chatbots erhöhen riskanten Medienkonsum. dak.de/presse/bundesthemen/kinderjugendgesundheit/dak-suchtstudie-untersucht-jugendentrend-ki-chatbots-erhoehen-riskanten-medienkonsum_164470.

- Deutsches Ärzteblatt (2026). Kinder und Jugendliche: KI-Chatbots gegen Einsamkeit. aerzteblatt.de/archiv/kinder-und-jugendliche-ki-chatbots-gegen-einsamkeit-5b9b44e2-38a2-414c-8a18-44c3eabde01c.
- Fang, C. M. et al. (2025). How AI and Human Behaviors Shape Psychosocial Effects of Extended Chatbot Use: A Longitudinal Randomized Controlled Study. [10.48550/arXiv.2503.17473](https://doi.org/10.48550/arXiv.2503.17473).
- Fieldhouse, R. (2025). Can AI chatbots trigger psychosis? What the science says. *Nature*. Vol 646. [10.1038/d41586-025-03020-9](https://doi.org/10.1038/d41586-025-03020-9).
- Ganguly, A. et al. (2026). Conversational AI agents in education: an umbrella review of current utilization, challenges, and future directions for ethical and responsible use. *AI Ethics* 6, 72 (2026). [10.1007/s43681-025-00916-0](https://doi.org/10.1007/s43681-025-00916-0).
- Hohenstein, J. et al. (2023). Artificial intelligence in communication impacts language and social relationships. *Scientific Reports* 13 (1), 5487, doi.org/10.1038/s41598-023-30938-9.
- Hua, Y. et al. (2025). A scoping review of large language models for generative tasks in mental health care. doi.org/10.1038/s41746-025-01611-4.
- Klar, R. (2023). Open AI exec warns AI can become 'extremely addictive'. *The Hill*. thehill.com/policy/technology/4229972-open-ai-exec-warns-ai-can-become-extremely-addictive/.
- Krempf, S. (2023). „Virtueller Freund“: Datenschützer stoppen Chatbot Replika in Italien. heise.de/news/Virtueller-Freund-Datenschuetzer-stoppen-Chatbot-Replika-in-Italien-7485010.html.
- Liu, Y. (2023). China's „Black Mirror“ GPT Clones Raise Global Concerns. *Jing Daily Culture*. jingdailyculture.com/chinas-black-mirror-gpt-clones-raise-global-concerns/.
- Longpre, S. et al. (2024). Consent in Crisis: The Rapid Decline of the AI Data Commons. *arXiv*. doi.org/10.48550/arXiv.2407.14933.
- Mahari, R.; Pataranutaporn, P. (2024). We need to prepare for 'addictive intelligence'. *MIT Technology Review*. technologyreview.com/2024/08/05/1095600/we-need-to-prepare-for-addictive-intelligence/.
- Malfacini, K. (2025). The impacts of companion AI on human relationships: risks, benefits, and design considerations. *AI & Soc* 40, 5527–5540. [10.1007/s00146-025-02318-6](https://doi.org/10.1007/s00146-025-02318-6).
- mindsprings.ai (2026). Lass Ballast los – für mehr Lebensfreude mindsprings.ai.
- ÖBVP (o. J.). AG Online-Psychotherapie, DiGAs & KI. psychotherapie.at/oebvp/arbeitsbereiche/ag-online-psychotherapie-digas-ki.
- Pataranutaporn, P. et al. (2023). Influencing human–AI interaction by priming beliefs about AI can increase perceived trustworthiness, empathy and effectiveness. *Nature Machine Intelligence* 5 (10), 1076–1086. doi.org/10.1038/s42256-023-00720-7.
- Stegmaier, A. (2024). KI und Psychotherapie: Hallo, ChatGPT, mir geht es nicht gut. *Wr. Zeitung*. wienerzeitung.at/a/hallo-chatgpt-mir-geht-es-nicht-gut.
- Uhle, C. (2024). Künstliche Intelligenz und die Zukunft der Menschheit. Fischer.

PHAGEN ZUR THERAPIE UND BIOKONTROLLE (AKTUALISIERT)



© unsplash.com/CDC

ZUSAMMENFASSUNG

Insbesondere mit Blick auf die Problematik von Antibiotikaresistenzen für die Gesundheit von Mensch, Tier und Umwelt haben Phagen – also Viren, die Bakterien befallen – das Potenzial, einen wichtigen Beitrag zur Problemlösung zu leisten. Eine deutlich größere Entwicklungsdynamik bzw. eine breitere Verwendung von Phagen als bisher für medizinische Zwecke oder zur Biokontrolle in der Land- und Lebensmittelwirtschaft ist unter den aktuellen Rahmenbedingungen in der Europäischen Union aber kaum zu erwarten. Notwendig dafür wäre eine Anpassung bzw. Flexibilisierung der bislang weitgehend auf Chemikalien ausgerichteten Regulierungen, die Schaffung effektiver wirtschaftlicher Anreizstrukturen und gegebenenfalls von Erstattungsmodellen, z. B. für wirklich neue antimikrobielle Medikamente, sowie eine gezielte Förderung von F&E-Aktivitäten. Primär bräuchte es somit politische Initiativen, um die Regulierung bzw. Rahmenbedingungen in allen Anwendungsbereichen zu überprüfen sowie durch Ergänzung flexibler und innovativer Regelungen weiterzuentwickeln.

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Die weltweite Ausbreitung von *Antibiotikaresistenzen* (Naghavi et al., 2024) hat das Interesse an der therapeutischen Nutzung von Bakteriophagen (kurz: Phagen) in der Humanmedizin in den letzten Jahren wieder neu belebt. Darüber hinaus werden Phagen vor dem Hintergrund politischer Bestrebungen auf internationaler Ebene hin zu einer nachhaltigeren Landwirtschaft und dem europäischen Green Deal auch verstärkt als Mittel der Biokontrolle („biocontrol“) diskutiert (TAB, 2023, S. 55 ff.), d. h. als natürliches Mittel zur Bekämpfung von pathogenen Bakterien bei Tieren, *Pflanzen* und in Lebensmitteln.

Phagen sind Viren, die Bakterien befallen und zerstören können. Sie gelten als die am häufigsten vorkommenden biologischen Einheiten der Erde und finden sich zusammen mit Bakterien in allen Lebensräumen, auch im menschlichen Körper, v. a. im Darmtrakt (TAB, 2023, S. 42f.). Phagen zeigen eine Reihe besonderer Eigenschaften, die sie als Mittel zur Bekämpfung von pathogenen Bakterien besonders interessant, aber auch herausfordernd machen (z. B. Strathdee et al., 2023; TAB, 2023, S. 63ff.). So beeinträchtigen Antibiotikaresistenzmechanismen die Wirksamkeit von Phagen i.d.R. nicht. Zwar können sich auch bakterielle Phagenresistenzen entwickeln; diese lassen sich aber durch Adaptation von Phagen oder Isolation neuer Phagen relativ einfach überwinden. Teilweise können Phagen zusammen mit Antibiotika synergistisch wirken und manche Phagen können Bakterien auch dann zerstören, wenn diese schützende Schichten (sog. Biofilme) bilden, wie es oft bei schwer behandelbaren Infektionen der Fall ist. Schließlich infiziert eine Phagenart oft nur eine bestimmte Bakterienart oder sogar nur manche Stämme davon; d. h. die (Wirts-)Spezifität von Phagen ist – im Gegensatz zum Wirkungsspektrum vieler Antibiotika – sehr hoch. Zwar können so Kollateralschäden an nützlichen Bakterien im Körper oder der Umwelt reduziert oder vermieden werden. Doch gleichzeitig erfordert diese Eigenschaft, dass Phagenpräparate auf die jeweiligen Erreger „passend“ abgestimmt werden. Um gegen Infektionen, die oft durch mehrere Bakterienarten bzw. -stämmen verursacht werden und bei denen sich gegebenenfalls Phagenresistenzen entwickeln können, wirksam zu sein, müssen vorab definierte, vorhaltbare (Fertig-)Phagenpräparate aus teilweise komplexen und schwer herzustellenden Mischungen verschiedener Phagen („Cocktails“) bestehen. Diese müssen zudem regelmäßig mit neuen oder adaptierten Phagen (s. o.) aktualisiert werden. Insbesondere bei einigen wichtigen, genetisch variablen Erregern oder solchen, für die nur Phagen mit extrem engem Wirtsspektrum existieren, ist dieser Ansatz meist nicht möglich bzw. erfolgreich. Oft werden deshalb auf die bei einer Patientin bzw. einem Patienten tatsächlich vorhandenen Erregerstämme zugeschnittene, sog. *personalisierte* Phagenpräparate mit aus Phagenbanken oder neu aus der Umwelt (z. B. aus Abwässern) isolierten Phagen hergestellt (Strathdee et al., 2023; Pirnay et al., 2024).

Phagen wurden bereits unmittelbar nach ihrer Entdeckung vor über 100 Jahren zur Bekämpfung bakterieller Infektionen bei Menschen erforscht und angewendet. Abgesehen von einigen ehemaligen Sowjetrepubliken (z. B. Georgien, Russland, Ukraine), in denen Phagenpräparate als zugelassene Medikamente existieren, sind Phagen kontinuierlich nur in Polen für experimentelle Behandlungen eingesetzt worden. In den westlichen Industrieländern sind Phagen dagegen seit den 1940er-Jahren und der breiten Verfügbarkeit von Antibiotika kaum noch therapeutisch genutzt worden (Marongiu et al., 2022; TAB 2023, S. 45ff.).

*Phagen –
allgegenwärtige
„Bakterienkiller“
mit besonderen
Eigenschaften*

*Die Phagentherapie –
ein alter, im Westen
weitgehend vergessener
Ansatz*

Aktuell hat noch kein Phagenpräparat in einem westlichen Land eine Marktzulassung als Arzneimittel erhalten. Phagen können so i.d.R. nur dann zur Therapie verwendet werden, wenn keine zugelassenen wirksamen Arzneimittel verfügbar sind (TAB, 2023, S. 147f. u. 157ff.). In der EU können Mitgliedsstaaten dies für Medikamente erlauben, die nach ärztlichen Angaben für bestimmte Patient:innen hergestellt werden („named-patient exemption“). Zudem sind in der EU Arzneimittel, die in einer Apotheke nach ärztlicher Verschreibung für eine:n bestimmte:n Patient:in zubereitet werden (oft „magistrale Herstellung“ genannt), von der Zulassung ausgenommen (TAB, 2023, S. 147 f.). Positive Ergebnisse zur Wirksamkeit und Sicherheit stammen fast ausschließlich aus Fallstudien einzelner, oft „austherapierter“ Patient:innen mit schwer behandelbaren chronischen und/oder antibiotikaresistenten Infektionen, unter Verwendung personalisierter Phagenpräparate (Pirnay et al., 2024; Uyttebroek et al., 2022). Diese Behandlungen erfolgten in verschiedenen EU-Ländern unter den o. g. Ausnahmemöglichkeiten (TAB, 2023, S. 162ff.).¹ In Österreich wurde 2024 eine erfolgreiche erste solche Behandlung als Heilversuch (Named Patient Use, NPU)² an der Universitätsklinik für Thoraxchirurgie der AKH Wien und der MedUni Wien durchgeführt³. In Belgien ist eine sehr pragmatische nationale Ausgestaltung zur magistralen Herstellung von Phagen nach festgelegten Qualitätsstandards zum Hauptweg für die Phagentherapie geworden. Diese ermöglicht auch die Nutzung von nicht nach Normen der Good Manufacturing Practice (GMP; s. u.) hergestellten Phagen – was eine flexible(re) Produktion patientenindividueller Phagenpräparate erlaubt (Verbeken & Pirnay, 2022; Pirnay et al., 2024). Ein so in Brüssel nach Isolierung aus einer dortigen Phagenbank hergestellter passender Phage hat auch den Heilversuch in Wien ermöglicht.

Phagen können derzeit nur in Ausnahmefällen zur Therapie genutzt werden

Voraussetzung für eine Marktzulassung von Arzneimitteln in der EU oder den USA sind jedoch der Wirksamkeits- und Verträglichkeitsnachweis durch i.d.R. randomisierte kontrollierte klinische Studien sowie die Einhaltung von GMP-Grundsätzen. Die wenigen bisher durchgeführten solchen Studien (z. B. in Frankreich und der Schweiz) konnten – mit Ausnahme einer kleineren Studie – keine Wirksamkeit der Therapieansätze nachweisen. Alle Studien verwendeten vorab definierte Phagencocktails und wiesen z. T. konzeptionelle oder produktionstechnische Probleme auf (TAB, 2023, S. 85ff.). In den letzten drei bis vier Jahren ist eine Reihe neuer klinischer Studien initiiert worden, darunter erste Studien mit personalisierten Phagencocktails sowie genetisch veränderten Phagen (König, 2025). Die weitaus meisten dieser Studien werden von relativ jungen Biotech-Unternehmen verantwortet und mehrheitlich (auch von Firmen aus der EU oder Israel) in den USA durchgeführt (König, 2025). Doch selbst wenn einige dieser klinischen Versuche erfolgreich verlaufen und auch patientenspezifische Präparate eine Marktzulassung erhalten könnten (TAB, 2023, S. 153f.), müssten für den nach-

Klinische Studien und andere – regulatorische und ökonomische – Herausforderungen

¹ Z. T. mit Phagen aus ärztlicher Eigenherstellung (z. B. in Deutschland), die in Österreich nicht erlaubt ist.

² Dieser leitet sich aus der „Named patient exemption“ ab (s. § 8 Art. 1 Z 2 ArzneimittelG). Der NPU erfordert i. d. R. keine behördliche Bewilligung und liegt in der Eigenverantwortung des behandelnden Arztes. basg.gv.at/fileadmin/redakteure/01_Formulare_Listen/I/L_I236_Information_Named_Patient_Use_en.pdf.

³ meduniwien.ac.at/web/ueber-uns/news/2024/news-im-maerz-2024/fortschritte-im-verstaendnis-von-morbus-crohn-erzielt/mit-viren-gegen-bakterien/.

haltigen Erfolg solcher Produkte kritische regulatorische und wirtschaftliche Herausforderungen gelöst werden. So dürften Änderungen in der Zusammensetzung von (Fertig-)Phagencocktails, die regelmäßig zu deren Aktualisierung nötig sind, nach der Erstzulassung immer wieder langwierige Genehmigungsverfahren, wenn nicht sogar gänzlich neue Marktzulassungsanträge erfordern (PelFRENE, Sebris, & Cavaleri, 2021; TAB, 2023, S. 151f.). Des Weiteren würden Phagenpräparate für häufigere Infektionen oder Indikationen, die auch mit Antibiotika behandelt werden können, mit preisgünstigen, oft generischen Antibiotika konkurrieren. Ein solcher Wettbewerb gilt als wichtiger Faktor für die bekannten Rentabilitätsprobleme bei neu entwickelten Antibiotika (TAB, 2023, S. 222). Schließlich wären Phagenpräparate, die durch ihre Fähigkeit zur Bekämpfung von (ansonsten nicht mehr behandelbaren) antibiotikaresistenten und/oder chronischen Infektionen einen besonders hohen oder sogar einzigartigen Nutzen haben könnten, auf eine sehr begrenzte Zahl von Fällen beschränkt. Investitionen für diese Produkte müssten sich so durch eine relativ geringe Anzahl von Behandlungen amortisieren (TAB, 2023, S. 221ff.; König, 2025). Ob für solche Phagenprodukte aber ähnliche Spitzenpreise wie für bestimmte Krebsmedikamente oder gen- und zellbasierte Therapien für seltene Krankheiten erzielt werden können, ist äußerst ungewiss.

In der Land- und Lebensmittelwirtschaft geht es um die Nutzung von Phagen in verschiedenen Anwendungsbereichen (Hüsing, Aichinger, & Fischer, 2022; TAB, 2023, S. 101ff.). In der Nutztierhaltung zielt die Nutzung von Phagen v. a. auf den Einsatz als Tierarzneimittel zur Reduktion von Antibiotika sowie als Futtermittelzusätze ab, um bakterielle Kontaminationen daraus hergestellter Lebensmittel zu reduzieren. In *Aquakulturen* soll ebenfalls der Antibiotikaeinsatz durch Phagen verringert werden. Im *Pflanzenbau* können Phagen insbesondere zum Erhalt von Pflanzen, die durch *pathogene Bakterien irreversibel* geschädigt werden, v. a. Obstbäume, eine wichtige Rolle spielen. Derzeit werden meist Kupfer und gegebenenfalls Antibiotika eingesetzt, die stark umweltschädlich sind. Schließlich können Phagen als Zusatzstoffe bzw. Dekontaminationsverfahren für Lebensmittel bei der Lebensmittelverarbeitung und -haltbarmachung genutzt werden, um Erreger von Lebensmittelinfektionen zu kontrollieren und Nahrungsmittel besser haltbar zu machen. Die dafür in der EU wichtigsten lebensmittelrechtlichen Kategorien sind die Nutzungen als Lebensmittelzusatzstoffe oder als Verarbeitungshilfsstoffe, als Dekontaminationsverfahren für Lebensmittel sowie zur Desinfektion von Einrichtungen oder Oberflächen bei der Lebensmittelherstellung oder -lagerung.

Für all diese Anwendungsbereiche gibt es einige wenige (z. T. von europäischen Firmen stammende) und bereits kommerzialisierte, aber v. a. außerhalb der EU zugelassene Phagenpräparate. Hierzu gehören Futtermittelzusätze, Aquakulturprodukte, Präparate zur Oberflächendekontamination von tierischen Lebensmitteln, Obst, Gemüse oder Käse sowie Phagenpräparate gegen bestimmte Pflanzenkrankheiten (TAB, 2023, S. 105ff. u. 115ff.). Im Juli 2025 erhielt als erstes Phagenprodukt ein Futterzusatz für Geflügel der polnischen Firma Proteon eine EU-Zulassung. Beim Pflanzenschutz hat die ungarische Firma Enviroinvest nur zeitlich und räumlich begrenzte Notfallzulassungen für ein Phagenpräparat gegen Feuerbrand bei Obstbäumen erhalten. Darüber hinaus können Phagenprodukte lediglich zur Verwendung als in der EU nicht zulassungspflichtige Verarbei-

*Phagenanwendungen
in der Land- und
Lebensmittelwirtschaft*

*Es gibt nur wenige
zugelassene Produkte –
und nur ein erstes in
der EU*

tungshilfsstoffe der Lebensmittelverarbeitung klassifiziert und eingesetzt werden. Rechtliche Klarheit, in welchen Fällen Phagen so einzuordnen sind, sowie verlässliche Zahlen zu dieser Nutzung gibt es jedoch nicht (Hüsing, Aichinger, & Fischer, 2022, 97f.). Neben technischen Herausforderungen bei der Entwicklung von Phagenpräparaten für den Praxiseinsatz (z. B. deren Stabilität unter Freilandbedingungen) gelten die meist noch auf einzelne, definierte Chemikalien ausgerichteten und oft in Bezug auf Phagen weitgehend unklaren Regulierungen und Zulassungsanforderungen als ein großes Hemmnis. Diese stellen vor allem kleine und mittlere Unternehmen, die aktuell hauptsächlich die Entwicklung kommerzieller Anwendungen betreiben, vor Organisations- und Kapazitätsprobleme.

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Allein in Österreich starben 2021 mehr als 3.400 Menschen im Zusammenhang mit bakteriellen *Antibiotikaresistenzen* d. h. durchschnittlich eine Person ca. alle drei Stunden; weltweit betrug die Zahl der Opfer rund 4,7 Mio (IHME, 2024). Antibiotikaresistente Bakterien spielen zudem eine wichtige Rolle für septische Verläufe von Infektionen, die bei Überlebenden oft mit Langzeitschäden und Pflegebedürftigkeit verbunden sind. Mit Blick auf die Gesundheitsproblematik für Mensch, Tier und Umwelt durch Antibiotikaresistenzen sowie toxische Chemikalien könnten Einsatzmöglichkeiten von Phagen zur Therapie und Biokontrolle stärker untersucht und genutzt werden. Allerdings müssten die aktuellen Rahmenbedingungen angepasst werden, damit sich die Nutzung von Phagen für die Therapie oder für land- und lebensmittelwirtschaftliche Anwendungen in Österreich stärker als bisher etablieren kann. Neben der Förderung von Forschung zur Lösung wissenschaftlich-technischer Probleme bei der Entwicklung wirksamer Phagenprodukte dürften zum einen Anpassungen in den, meist noch auf sich nicht verändernde chemische Substanzen bzw. Wirkstoffe ausgerichteten, EU-Regulierungen notwendig sein. Zum anderen scheinen insbesondere für mögliche Präparate zur Phagentherapie wirksamere wirtschaftliche Anreizregelungen für die Entwicklung sowie die Erstattung wirklich neuer antimikrobieller Medikamente erforderlich (TAB, 2023, S. 221ff.).

*Phagen als Option
im Kampf gegen
Antibiotikaresistenzen*

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Primär bräuchte es politische Initiativen bzw. Unterstützung, um die bestehende Regulierung in allen Anwendungsbereichen zu überprüfen und etwa durch Ergänzung spezieller Leitlinien zu Phagen oder Regelungen für Entwicklungsanreize weiterzuentwickeln. Für die Phagentherapie könnte der EU-Kommissionsvorschlag vom April 2023 zur Reform des europäischen Arzneimittelrechts eine Möglichkeit bieten, um u. a. auf Phagentherapeutika mit variabler Zusammensetzung angepasste (Zulassungs-)Vorschriften zu etablieren (Fuerst-Wilmes et al. 2025). Parallel dazu könnte auf nationaler Ebene, z. B. durch eine Kommission, bestehend aus Vertreter:innen von Parlament, zuständigen Ministerien und Behörden, geprüft werden, ob EU-rechtliche Ausnahmeregelungen in Österreich – etwa nach Vorbild des belgischen Modells der magistralen Phagennutzung – bereits so genutzt oder ausgestaltet werden könnten, dass meist notwendige per-

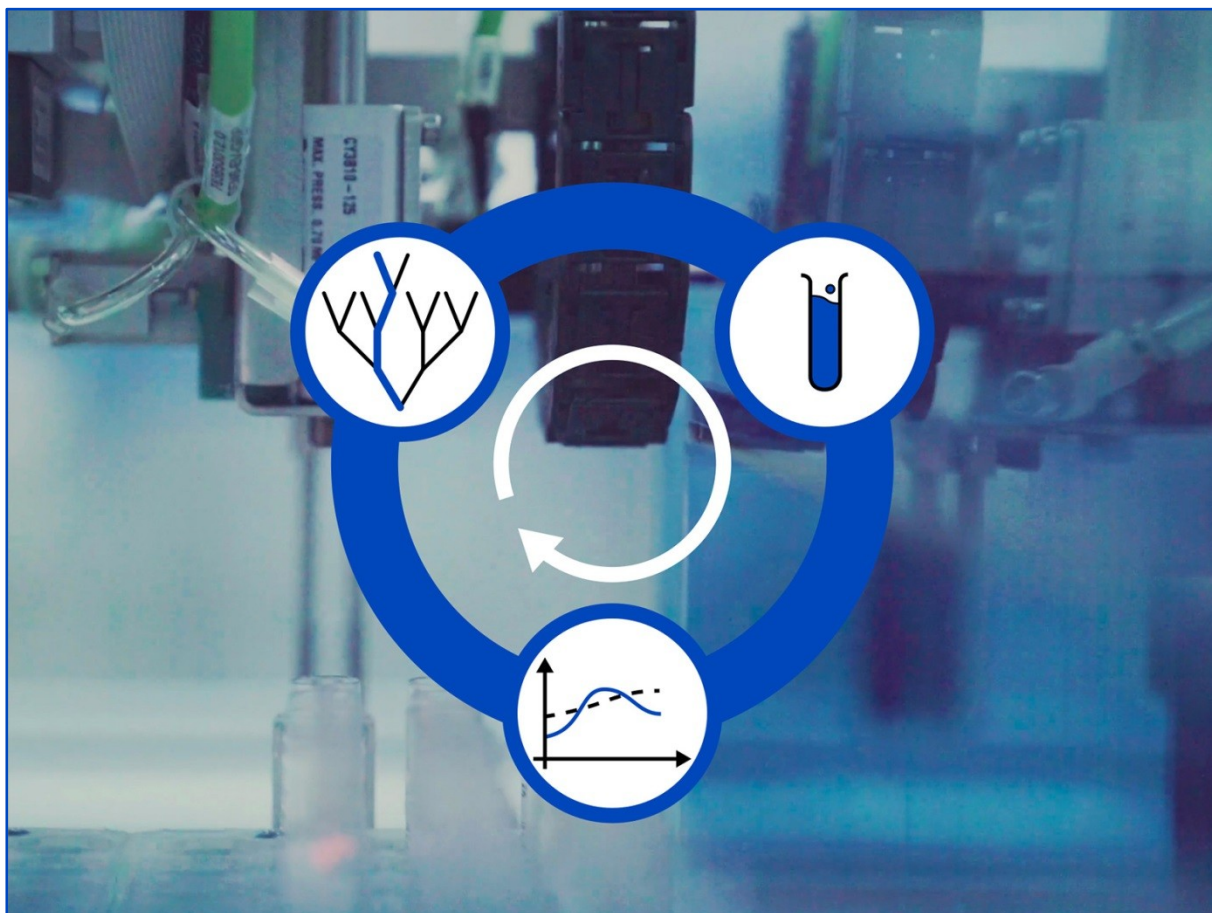
*Initiativen zur
Überprüfung von
Regelungen*

sonalisierte Phagenpräparate unter festgelegten Qualitätsstandards flexibel hergestellt und (über Heilversuche hinaus) für mehr Patient:innen im Land als heute zugänglich werden könnten.

ZITIERTE LITERATUR

- Fuerst-Wilmes, M., et al. (2025). Regulation of phage therapy medicinal products: developments, challenges, and opportunities. *Frontiers in Cellular and Infection Microbiology*, 15. doi.org/10.3389/fcimb.2025.1631359.
- Hüsing, B., Aichinger, H., & Fischer, P. (2022). Bakteriophagen in der Land- und Lebensmittelwirtschaft. Fraunhofer ISI. publica.fraunhofer.de/entities/publication/f7e3af0c-13a1-4724-924d-bdb4938c0e31.
- IHME (2024). The burden of antimicrobial resistance (AMR) in Austria. healthdata.org/sites/default/files/2023-09/Austria.pdf.
- König, H. (2025). The prospect of approved and commercially available phage therapeutics. *International Journal of Antimicrobial Agents*, 66 (6), 107612. doi.org/10.1016/j.ijantimicag.2025.107612.
- Marongiu, L., et al. (2022). Reassessment of Historical Clinical Trials Supports the Effectiveness of Phage Therapy. *Clinical Microbiology Reviews*, 35(4), e0006222. doi.org/10.1128/cmr.00062-22.
- Naghavi, M., et al. (2024). Global burden of bacterial antimicrobial resistance 1990–2021: a systematic analysis with forecasts to 2050. *The Lancet*, 404(10459), 1199–1226. [doi.org/10.1016/S0140-6736\(24\)01867-1](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(24)01867-1).
- Pelfrene, E. et al. (2021). Regulatory Aspects of the Therapeutic Use of Bacteriophages: Europe. In D. Harper, et al. (Eds.), *Bacteriophages: Biology, Technology, Therapy* (pp. 1165–1177). Cham: Springer. doi.org/10.1007/978-3-319-41986-2_51.
- Pirnay, J.-P., et al. (2024). Personalized bacteriophage therapy outcomes for 100 consecutive cases: a multicentre, multinational, retrospective observational study. *Nature Microbiology*, 9(6), 1434–1453. doi.org/10.1038/s41564-024-01705-x.
- Strathdee, S. A., et al. (2023). Phage therapy: From biological mechanisms to future directions. *Cell*, 186(1), 17–31. doi.org/10.1016/j.cell.2022.11.017.
- TAB (Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag) (2023). Bakteriophagen in Medizin, Land- und Lebensmittelwirtschaft – Anwendungsperspektiven, Innovations- und Regulierungsfragen. Innovationsanalyse. (König, H., Sauter, A.) TAB Arbeitsbericht Nr. 206. doi.org/10.5445/IR/1000160512.
- Uyttendaele, S., et al. (2022). Safety and efficacy of phage therapy in difficult-to-treat infections: A systematic review. *The Lancet Infectious Diseases*, 22(8), e208–e220. [doi.org/10.1016/S1473-3099\(21\)00612-5](https://doi.org/10.1016/S1473-3099(21)00612-5).
- Verbeke, G., & Pirnay, J.-P. (2022). European regulatory aspects of phage therapy: magistral phage preparations. *Current Opinion in Virology*, 52, 24–29. doi.org/10.1016/j.coviro.2021.11.005.

SELF-DRIVING-LABS (AKTUALISIERT)



© unsplash.com/Testalize.me; Fabian Fischer

ZUSAMMENFASSUNG

Self-Driving Labs (SDL) sind Labore, die vollautomatisiert Versuchsreihen durchführen können. Dabei gibt es drei Schritte: Mittels Künstlicher Intelligenz (KI) wird eine Versuchsplanung entworfen. Dann wird das Experiment mittels Roboter ohne menschliches Zutun durchgeführt. Das Ergebnis wird wiederum automatisiert evaluiert und ist Grundlage für weitere Versuche. Damit lässt sich eine enorme Beschleunigung erzielen: Versuche können rund um die Uhr durchgeführt werden, außerdem kann durch intelligente Steuerung der Versuchsreihen gezielter nach neuen Stoffen, Molekülen und Proteinen gesucht werden. Weiters erlauben SDLs überregionalen Zugang, damit einher geht allerdings auch das Risiko von Cyberattacken. Weitere Hürden stehen der Realisierung der Potentiale von SDLs im Weg, u. a. die schlechte Datenlage, fehlende Interoperabilität von Instrumenten, mangelhafte Verfügbarkeit von passender Software und hohe Investitionskosten.

*Vollautomatisierte
Labore zur
Effizienzsteigerung
und Beschleunigung
wissenschaftlicher
Entdeckungen*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Fortschritte der Automatisierung und KI führen auch in den Wissenschaften zu neuen Praktiken des Forschens. Durch das Zusammenspiel von mechanischer Automatisierung, Datenerhebung und -analyse sowie steigender Rechenleistung ist der Betrieb von Labors in einigen Anwendungsbereichen im Umbruch begriffen. Anders als der Begriff vermuten lassen könnte, handelt es sich bei „Self-Driving Labs“ nicht um Labors in selbstfahrenden Autos, sondern um vollautomatisierte Laboratorien zur beschleunigten und gezielteren Durchführung von Experimentreihen (Callaway, 2024b). Sie sind besonders für Chemie, Biotechnologie und Materialwissenschaften relevant (Abolhasani & Kumacheva, 2023; Martin et al., 2023). Primäres Ziel ist dabei in der Regel, Kombinationen von Grundelementen zu finden, die bestimmte gewünschte Eigenschaften aufweisen, also z. B. Moleküle, Materialien und Proteine. SDLs stellen dabei einen vollständig automatisierten geschlossenen Kreislauf bestehend aus grob drei Schritten dar: Erstens wird mittels KI ein vielversprechendes Experiment entworfen. Dieses Experiment wird, zweitens, dank Robotern vollautomatisch durchgeführt. Schließlich werden über das Experiment umfangreiche Daten gesammelt und analysiert. Darauf basierend entscheidet die KI, wie das nächste Experiment durchgeführt wird – der Kreislauf ist somit geschlossen.

SDLs können daher Experimentreihen ohne menschliche Intervention durchführen. In weiterer Folge können sie auch 24 Stunden, sieben Tage die Woche durchgehend arbeiten und schon alleine dadurch eine Beschleunigung erreichen (Martin et al., 2023). Darüber hinaus verspricht aber auch die automatische Auswahl vielversprechender Versuchsanordnungen eine bessere Steuerung der Experimente und das Vermeiden von wenig aussichtsreichen Versuchen (Abolhasani & Kumacheva, 2023). Zur Identifizierung erfolgversprechender Versuchsanordnungen können einerseits bereits durchgeführte Experimente herangezogen werden, andererseits kann auch auf (maschinenlesbar aufbereitete) wissenschaftliche Literatur sowie KI-gestützte Modellberechnungen zurückgegriffen werden, wie etwa die Vorhersage von Proteinstrukturen durch Google DeepMinds AlphaFold (Callaway, 2024a). SDLs werden als Schlüsseltechnologie 2025/26 hervorgehoben. Neuere Arbeiten betonen dabei insbesondere Human-in-the-Loop-Ansätze sowie interpretierbare KI-Methoden für automatisierte Forschungsumgebungen. Weiters wird dargelegt, dass SDLs zunehmend skaliert werden, etwa in Form größerer Robotik-Flotten, kompakterer Plattformen und kommerzieller AI-Science-Factories (Reichhardt, 2025; Scheurer & Reuter, 2025).

Unterm Strich soll dadurch die Anzahl der notwendigen Experimente reduziert werden, was auch zu geringerem Ressourcenverbrauch führen würde (Abolhasani & Kumacheva, 2023). Denn SDLs sind besonders in jenen Bereichen attraktiv, wo das Zusammenspiel verschiedener Faktoren untersucht wird. Dabei geht es unter anderem um die einzelnen Bausteine (z. B. Moleküle und Aminosäuren), deren Anordnung bzw. Struktur und um die Umgebungsbedingungen, unter denen die Experimente durchgeführt werden. Je mehr Faktoren variiert werden, desto größer wird die Anzahl der möglichen Versuchsanordnungen – und zwar exponentiell (Abolhasani & Kumacheva, 2023).

Vollautomatisierte Steuerung von Labor-Experimenten mittels Automatisierung und KI

Effizientere Suche nach neuen Molekülen, Materialien und Proteinen

24/7-Automatisierung mit KI-Steuerung und Skalierung

Reduzierung des Ressourcenverbrauchs durch Reduktion der Versuche dank KI

Neben der Beschleunigung und Ressourcenschonung ist eine bessere Dokumentation der Experimente ein positiver Nebeneffekt von SDLs: Die Formalisierung und Digitalisierung aller Aspekte der Experimente sind eine notwendige Voraussetzung, um sie vollautomatisiert durchführen zu können. Die systematische Erfassung umfangreicher Daten kann einerseits der wissenschaftlichen Community helfen sowie zu besserer KI führen, andererseits können die Datenmengen auch bei der Modellierung sogenannter Digital Twins der untersuchten Materialien oder biologischen Systeme behilflich sein, da durch die Experimente Daten über Funktion und Kausalität gesammelt werden können (Martin et al., 2023) (siehe auch *Digitale Zwillinge im Gesundheitswesen*).

*Systematische
Sammlung von Daten*

Grundsätzlich gibt es verschiedene Ansätze, vollautomatisierte Experimente durchzuführen (Abolhasani & Kumacheva, 2023). Eine Möglichkeit ist, gänzlich neue, automatisierbare Laborinstrumente zu entwickeln und einzusetzen. Ein pragmatischer Ansatz besteht darin, einen mobilen Roboterarm so zu programmieren, dass er in einem für Menschen gestalteten Labor sämtliche Arbeitsschritte durchführen kann (d. h. Maschinen bedienen und mit Material hantieren). Für manche Versuchsanordnungen ist es auch möglich, Flüssigkeiten mit Pumpen und Schläuchen automatisiert zu transportieren. Für das Gelingen ist eine erfolgreiche Datenweitergabe zwischen den einzelnen Schritten eines Zyklus essenziell.

*Verschiedene Ansätze
zur mechanischen
Automatisierung*

Bisher gibt es zwar noch wenige vollständig generalisierte SDLs, doch die Zahl spezialisierter Plattformen in Chemie, Materialwissenschaften und Teilen der Biotechnologie wächst deutlich¹ (Martin et al., 2023). Während in der synthetischen Biologie die Herausforderungen größer bleiben und SDLs dort häufig als „Biofoundries“ diskutiert werden, gibt es bereits funktionierende Beispiele. So testete „Eve“ Medikamente auf ihre Eignung gegen Malaria (Martin et al., 2023).

*Spezialisierung von
Self-Driving Labs
nimmt zu*

Besonders eindrucksvoll zeigt sich die Skalierung bei größeren Robotik-Infrastrukturen: Das Acceleration Consortium betreibt laut Nature mit 200 Mio. kanadischen Dollar Förderung eine Flotte von 50 autonomen Robotern¹. Ein internationales Netzwerk von fünf KI-gesteuerten Labs auf drei Kontinenten sowie das ORGANA-System zur Durchführung von chemischen Experimenten mithilfe natürlicher Sprachsteuerung zeigen die zunehmende Verbreitung verteilter SDL-Infrastrukturen (Reichhardt, 2025). In den Materialwissenschaften und Chemie beschleunigen SDLs erfolgreich die Entwicklung von Carbon-Nanoröhren, Nanomaterialien, organischen Stoffen und Dünnschichtmaterialien (Abolhasani & Kumacheva, 2023).

*Hohe Investitionen
notwendig*

Es gibt eine Reihe von Herausforderungen, welche die Umsetzung von SDLs schwierig gestalten. Die erste Hürde stellt passendes Labor-Equipment dar. Neben den hohen Kosten ist die fehlende Standardisierung von Labor-Instrumenten ein kritischer Punkt (Abolhasani & Kumacheva, 2023). Besonders Experimente der synthetischen Biologie setzen sich oft aus vielen Einzelschritten zusammen, die teilweise deutlich schwieriger automatisierbar und zu verketteten sind als in anderen Bereichen (Martin et al., 2023). Damit können je nach Experiment andere Schritte notwendig sein, sodass das Labor gegebenenfalls anders aufgebaut werden müsste. Das ist besonders für die Biologie gravierend, da hier (s. o.) oft mehr Schritte involviert sind (Martin et al., 2023).

¹ [nature.com/articles/d41586-026-00974-2](https://www.nature.com/articles/d41586-026-00974-2).

Eine zweite Hürde stellt die Verfügbarkeit von Daten dar. Um der KI eine gute Entscheidungsgrundlage zu bieten, benötigt es eine ausreichende Datenbasis mit hoher Qualität. Manche Forschende attestieren allerdings, dass das Datenmanagement vergangener Experimente oft nicht in hinreichender Qualität durchgeführt wurde (Martin et al., 2023). Außerdem haben unterschiedliche Labors teilweise maßgeschneiderte Software entwickelt, die oft nicht mit anderen Systemen interoperabel ist, was die Integration in SDLs erschwert (National Academies of Sciences, 2024). Doch auch Software zur Entscheidungsfindung, Steuerung des Labors und Auswertung der Daten ist für viele Anwendungsfälle noch nicht vorhanden (Abolhasani & Kumacheva, 2023).

*Schlechte Datenlage
als Hindernis*

Drittens benötigen SDLs stark interdisziplinäres Fachwissen: Expertinnen und Experten aus den Bereichen KI, Robotik, Prozessautomatisierung, Chemie, Molekularbiologie oder Materialwissenschaft müssen kollaborieren (Hysmith et al., 2024; Martin et al., 2023). Dabei sind die Kulturen dieser Disziplinen jedoch teils sehr verschieden, betrachten u. U. andere Probleme als lösenswert an und sehen einander möglicherweise als Konkurrenz bzw. „Eindringlinge“ im eigenen spezialisierten Feld (Martin et al., 2023).

*Interdisziplinäre
Zusammenarbeit
essentiell*

Was schließlich zur letzten Hürde führt, nämlich dass die Möglichkeiten von SDLs und der relevanten Kompetenzen in Curricula der relevanten Studiengänge derzeit nicht präsent sind (Martin et al., 2023). Weiters wird in herkömmlichen Laboren oft eine Kultur des Probierens und des eher intuitiven Tüftelns praktiziert (National Academies of Sciences, 2024). Die stark formalisierte, durchgeplante und regelförmige Art, wie SDLs betrieben werden müssen, steht dieser Praxis diametral entgegen. Diese beiden Arbeitsweisen gilt es, möglichst sinnvoll zu kombinieren, um die jeweiligen Vorteile nutzen zu können.

*Studienpläne bilden
notwendige Expertise
noch nicht
ausreichend ab*

Aus den Herausforderungen erwachsen auch Chancen: SDLs können Forschende remote über Cloud-Plattformen zur Verfügung gestellt werden. Es gibt bereits Cloud-Labs, die bei Bedarf gemietet und softwaregesteuert werden (National Academies of Sciences, 2024). Diese entwickeln sich zunehmend zu skalierbaren Forschungsplattformen und servicebasierten F&E-Umgebungen entwickeln, was den Zugang zu teurer SDL-Infrastruktur institutionell verbreitert. Entscheidend bleibt eine sorgfältige Vorprüfung von Experimenten und Nutzenden für verantwortungsvolle Forschung.

*Cloud-Labs:
globale Zugänglichkeit
über Internet*

Die Frage des verantwortungsvollen Zugangs stellt sich auch bei der Entwicklung von Open-Source-Labor-Hardware. Mit der Forcierung von Open-Source-Hardware könnten die Kosten von SDLs gesenkt werden (Abolhasani & Kumacheva, 2023), was auch dem Problem fehlender Interoperabilität (s. o.) entgegenwirken würde. Wären die Baupläne allerdings frei zugänglich, würden auch Akteure mit böswilligen Absichten leichteren Zugang zu wichtiger Laborausrüstung erhalten.

*Open-Source
Instrumente als
Chance*

Sowohl bei Cloud-Labs als auch bei SDLs stellen Cyberattacken eine große Gefahr dar: Durch die Steuerung mittels Software, die oft auch ans Internet angebunden ist, besteht die Möglichkeit, dass Laborequipment für böswillige Zwecke verwendet wird (Martin et al., 2023; National Academies of Sciences, 2024). Entsprechend sind robuste Vorkehrungen gegen derartige Angriffe notwendig. Das schließt auch die Integrität der den Experiment-Designs zugrundeliegenden Daten ein: Sind diese fehlerhaft oder bewusst manipuliert, können Experimente fehlgeleitet werden. Daran anschließend kann von SDLs große Gefahr ausgehen, wenn sie vollständig unter der Kontrolle böswilliger Akteurinnen und Akteuren stehen. In diesem Fall können die Effizienzgewinne von SDLs auch von diesen kapitalisiert werden, etwa zur Synthese neuartiger Viren, Giften, Drogen oder anderweitig gefährlicher Materialien (Maffettone et al., 2023; Martin et al., 2023).

*Cyberattacken
als Risiko*

*Beschleunigung
der Erfindung neuer
Schadstoffe*

Auch gut intendierte selbstgesteuerte Experimentreihen können vom Ziel abweichen und gefährliche Materialien erzeugen (Martin et al., 2023). Wie dieses Risiko eingedämmt werden kann, ist unklar. Neuere Beiträge betonen daher nicht die vollständige Ersetzung menschlicher Forschung, sondern wirksame Human-in-the-Loop-Konfigurationen, bei denen Menschen Zieldefinition, Validierung und Sicherheitskontrolle übernehmen (Hysmith et al., 2024; Scheurer & Reuter, 2025).

Human-in-the-Loop

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

SDLs können große Fortschritte und eine Beschleunigung bei der Entdeckung neuartiger Materialien, Moleküle und Proteine bringen. Die Entwicklung von SDLs wiederum ist noch relativ jung mit vielen offenen Fragen und Herausforderungen. Dadurch entstehen neue Chancen, aber es gilt auch, damit einhergehende Risiken zu kontrollieren. Für das österreichische Parlament gilt es daher sicherzustellen, dass bestehende Regulierungen diesen neuen Möglichkeiten Rechnung tragen oder entsprechend aktualisiert werden. Dazu gehören einerseits Regelwerke mit Bezug auf chemische und biologische Gefahrenstoffe (z. B. Seveso-III-Richtlinie², Systemverordnung³). Weiters stellt sich die Frage, inwiefern Gesetze, die über den Arbeitnehmerinnen und Arbeitnehmerschutz die Prozesssicherheit regulieren⁴ bei Self-Driving Labs anwendbar sind oder die Abwesenheit von Personal hier zu einer Gesetzeslücke führen kann.

*Regulative
Rahmenbedingungen
für Self-Driving Labs*

Für Österreich besonders relevant ist die Möglichkeit, auf SDLs auch über das Internet zugreifen zu können. Damit könnte sich einerseits Österreich als Standort entsprechender SDLs profilieren und einer internationalen Forschungsgemeinschaft zugänglich machen, andererseits können österreichische Forscherinnen und Forscher auf SDLs zugreifen, ohne diese selbst betreiben zu müssen. Gerade Österreichs starke Position in den für SDLs relevanten Bereichen könnte eine

*Österreich als Standort
mit viel relevanter
Expertise*

² bmwv.gv.at/Themen/Technik-und-Vermessung/Gewerbetechnik/SevesoIII-Richtlinie.html.

³ ris.bka.gv.at/GeltendeFassung.wxe?Abfrage=Bundesnormen&Gesetzesnummer=20002297.

⁴ Z. B. die große Vielfalt an Rechtsnormen, die auf die Sicherheit im Umgang mit Arbeitsstoffen abstellen: arbeitsinspektion.gv.at/Arbeitsstoffe/Allgemeines/Allgemeines.html.

gute Ausgangsbasis bieten. Schließlich ist mit AITHYRA auch ein neues Institut der Akademie der Wissenschaften an der Schnittstelle KI und Lebenswissenschaften im Aufbau begriffen,⁵ das ein vollautomatisches KI-getriebenes Robotik-Labor für Experimente im Bereich Biomedizin entwickelt.⁶

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Über den aktuellen Stand von Self-Driving Labs in der österreichischen Forschungslandschaft besteht weiterhin kein umfassender Überblick. Es empfiehlt sich daher, eine Status-quo-Erhebung unter Einbeziehung relevanter Stakeholder – insbesondere AITHYRA (ÖAW), FWF und Wirtschaftsverbände – durchzuführen. Parallel sollte eine Rechtskonformitätsprüfung bestehender Regulierungen (Seveso-III, Systemverordnung, EU AI Act) auf SDL-spezifische Lücken zu untersuchen.

*Besserer Überblick
über Status Quo in
Österreich notwendig*

ZITIERTE LITERATUR

- Abolhasani, M., & Kumacheva, E. (2023). The rise of self-driving labs in chemical and materials sciences. *Nature Synthesis*, 2(6), 483-492.
- Atinary (2025). Self-Driving Labs™ bei 5-HT Innovators Club. 5-ht.com
- Callaway, E. (2024a). Developers of AlphaFold win Chemistry Nobel. *Nature*, 634, 525-526.
- Callaway, E. (2024b). 'Self-Driving' Lab Uses AI And Robotics To Improve Proteins. *Nature*, 625, 436.
- Hysmith, H., et al. (2024). The future of self-driving laboratories: from human in the loop interactive AI to gamification. *Digital Discovery*, 3(4), 621-636.
- Maffettone, P. M., et al. (2023). What is missing in autonomous discovery: open challenges for the community. *Digital Discovery*, 2(6), 1644-1659.
- Martin, H. G., et al. (2023). Perspectives for self-driving labs in synthetic biology. *Curr Opin Biotechnol*, 79, 102881, [ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/36603501](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/36603501).
- National Academies of Sciences, Engineering, and Medicine. (2024). *Artificial Intelligence and Automated Laboratories for Biotechnology: Leveraging Opportunities and Mitigating Risks: Proceedings of a Workshop—in Brief*.
- Reichhardt, T. (2025). Self-driving laboratories, advanced immunotherapies and five more technologies to watch in 2025. *Nature*, 637(8047), 1008-1011. doi.org/10.1038/d41586-025-00075-6.
- Scheurer, C., & Reuter, K. (2025). Role of the human-in-the-loop in emerging self-driving laboratories for heterogeneous catalysis. *Nature Catalysis*, 8(1), 13-19. doi.org/10.1038/s41929-024-01275-5.
- Rosch, T. M., et al. (2024). AutoBioTech – A Versatile Biofoundry for Automated Strain Engineering. *ACS Synth Biol*, 13(7), 2227-2237, [ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/38975718](https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38975718).

⁵ oeaw.ac.at/aithyra/.

⁶ aithyra.at/research/groups/wali-malik.

TEXTIL-RECYCLING (AKTUALISIERT)



© unsplash.com/Francois Le Nguyen

ZUSAMMENFASSUNG

Die Textilindustrie ist durch Überproduktion und Überkonsum („Fast Fashion“) geprägt, was zu immensen Mengen an Textilabfällen führt. Die lineare Produktionsweise belastet die Umwelt durch hohen Wasserverbrauch, chemische Verschmutzung, CO₂-Emissionen und Mikroplastik. Dreiviertel der in Österreich anfallenden Textilabfälle werden verbrannt. Ein Übergang zu einer zirkulären Textilwirtschaft mit Fokus auf Wiederverwendung, Reparatur und Recycling ist notwendig. Mechanisches Recycling ist weit verbreitet, aber nur für sortenreine Textilien geeignet. Chemisches Recycling ermöglicht die Wiederverwertung ausgewählter Mischmaterialien. Die EU hat mit der im Oktober 2025 in Kraft getretenen Novelle der Abfallrahmenrichtlinie (EC 2025) verbindliche Vorgaben für Textilien und Schuhe geschaffen. Die Umsetzung in nationales Recht ist bis Juni 2027 vorgesehen, funktionsfähige Systeme der erweiterten Herstellerverantwortung sollen spätestens April 2028 bestehen.

*Herausforderungen:
fehlende Infrastruktur,
Mischmaterialien,
hohe Kosten, sowie
neue regulatorische
Anforderungen durch
EPR und
Sortierpflichten*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Textilabfälle sind vielfältig, neben Altkleidern und Altschuhen inkl. Accessoires (wie Gürtel, Schals, Kopfbedeckung) zählen auch Abfälle von Haustextilien (z. B. Bett- und Tischwäsche, Handtücher) und Heimtextilien (z. B. Teppiche, Vorhänge, Möbelstoffe, Matratzen) dazu. Als „Alttextilien“ werden getrennt gesammelte Textilabfälle aus Haushalten, sowie aus anderen Bereichen wie Gastronomie, Hotels und Krankenhäusern, die in Art und Zusammensetzung Haushalten ähnlich sind, verstanden. Eine weitere Kategorie sind technische/industrielle Textilabfälle, sie umfassen eine große Bandbreite an Anwendungen in verschiedenen Sektoren, wie z. B. Geotextilien, Sitzbezüge in Transportfahrzeugen, Schutztextilien, Zelte und Netze. Altkleider, Schuhe, sowie Haus- und Heimtextilien verursachen etwa 80 % der Textilabfälle, technische Textilien und Produktionsabfälle spielen eine untergeordnete Rolle (Bernhardt et al., 2024). Mit der neuen EU-Regelung (Richtlinie EU 2025/1892) werden separat gesammelte Textilien als Abfall eingestuft und müssen vor einem möglichen Export sortiert werden.

EU-weit macht Kleidung den größten Teil (81 %) des Textilkonsums aus (EC, 2022). In Österreich fallen jährlich ca. 236.000 Tonnen Textilabfälle an (BMK 2023), wovon über 90 % verbrannt werden. Nur ca. 26 % werden getrennt gesammelt (hauptsächlich als Altkleider), der Großteil liegt als gemischte Abfälle vor (Restmüll, Sperrmüll, medizinisch). Nur 3 % entstehen in der Produktion, 97% nach dem Verbrauch durch Haushalte/Betriebe (Bernhardt et al., 2022).

Heute werden weltweit etwa doppelt so viel Textilien produziert wie vor zwanzig Jahren, Tendenz steigend (EEA, 2022). Weltweit landen etwa 87 % dieser Fasern auf Müllkippen oder werden verbrannt, was allein einen ökonomischen Wertverlust von jährlich 100 Mrd. Dollar verursacht (Lanz et al., 2024). Ein großer Treiber dieser Entwicklung ist (Ultra) Fast Fashion, einem nicht nachhaltigen Muster von Überproduktion und Überkonsum. Seit Jahrzehnten verstetigt sich der Trend, Kleidungsstücke immer kürzer zu benutzen, bevor sie weggeworfen werden, was Verbrauchende dazu verleitet, immer öfter Kleidung von minderer Qualität zu kaufen, die schnell produziert wird, um den neuesten Trends zu entsprechen (Niinimäki et al., 2020).

Umweltauswirkungen entstehen entlang der gesamten Wertschöpfungskette in der Textil- und Modebranche, von der Rohstoffherzeugung über die Verarbeitung bis zum Verbrauch. Schwerpunkte der Auswirkungen sind Wasserverbrauch, chemische Verschmutzung, CO₂-Emissionen und Textilabfälle (Niinimäki et al., 2020). Zusätzlich trägt die Freisetzung von **Mikroplastik** aus synthetischen Textilien und Schuhen zu den Umweltauswirkungen des Sektors bei, denn etwa 35 % des in die Umwelt freigesetzten Mikroplastiks stammen aus Textilien. In Betrachtung des gesamten europäischen Konsums haben Textilien, die viertgrößten negativen Auswirkungen auf Umwelt und Klima – nach Lebensmitteln, Wohnraum und Mobilität (EEA, 2022). Ursächlich ist ein lineares Produktionsmodell, das durch kurze Nutzungszyklen und wenig Wiederverwendung, wenig Reparatur und wenig Faser-zu-Faser-Recycling von Textilien gekennzeichnet ist.

Die EU verfolgt inzwischen einen stärker regulativen Ansatz (EC 2025; Richtlinie EU 2025/1892; EC 2026): Mit der Novelle der Abfallrahmenrichtlinie wurden EPR-Systeme für Textilien und Schuhe verankert, ergänzt durch Anforderungen an Sortierung, digitale Produktinformationen und den Umgang mit unverkaufter Ware.

*Was sind
Textilabfälle?*

*90 % der Textilabfälle
werden verbrannt*

*Problem
(Ultra-)Fast Fashion*

Umweltauswirkungen

Textilien bestehen aus verschiedenen Fasertypen. Alttextilien müssen erst gesammelt, sortiert und klassifiziert und ihre Qualität bewertet werden.

Mechanisches Recycling ist am weitesten verbreitet und ausgereift, birgt aber erhebliche Einschränkungen, da es nicht für die Behandlung aller Fasern geeignet ist, insbesondere nicht für Fasern nicht-organischen Ursprungs und Mischtextilien. Für Fasern, die nicht wiederverwendet oder mechanisch recycelt werden können, wird thermisches, chemisches oder bioenzymatisches Recycling notwendig, um eine Deponierung oder Verbrennung zu vermeiden (Lanz et al., 2024).

Mechanisches Recycling umfasst die physische Zerlegung der Fasern durch Methoden wie Schreddern, Zerquetschen oder Schmelzen, bevor die Fasern wieder zu Garn weiterverarbeitet werden. Die mechanische Verarbeitung führt zu schwächeren Fasern und minderwertigen Textilien (Downcycling), die nur begrenzt verwendbar sind, z. B. als Füllmaterial für Möbel oder Isolierung. Mechanisches Recycling ist am effektivsten für Textilien aus einem Material (z. B. 100 Prozent Baumwolle). Weniger effektiv ist es bei gemischten Materialien, da die angewandten Prozesse die Qualität des entstehenden Materials weiter verschlechtert (GAO, 2024). Thermisches Recycling basiert auf Erhitzung zur Rückgewinnung von Polymeren oder Monomeren. Es umfasst thermomechanisches Recycling (Schmelzen thermoplastischer Fasern wie Polyester, Polyamid oder Polypropylen zu Granulat oder Fasern) und thermochemisches Recycling (Polymere zu Monomeren) (Duhoux, 2021).

Beim chemischen Recycling werden Textilien mit Hilfe chemischer Lösungen in ihre molekularen Grundbausteine zerlegt und dann wiederaufgebaut, um Fasern von ähnlicher Qualität herzustellen. Sogar die Gewinnung eines hochwertigen Produkts nach dem Prozess (Upcycling) ist bei ausgewählten Materialien möglich. Bei synthetischen Fasern werden die Polymerketten in Monomere zerlegt, die dann getrennt, gereinigt und zu neuen Polymeren verarbeitet werden. Die Zusatzstoffe werden während des Reinigungsprozesses entfernt. Chemisches Recycling kann entweder in einem geschlossenen Kreislauf erfolgen (das Material wird zu einem identischen Produkt recycelt), z. B. bei reinem Polyester (PET) und Nylon-6-Materialien, oder in einem offenen Kreislauf (das Material wird zu einer anderen Produktkategorie recycelt), z. B. bei Baumwollmaterialien. Deren Endprodukt ist eine Zellulosepulpe, die zur Herstellung neuer Fasern wie Viskose, Lyocell oder Rayon genutzt wird (Lanz et al., 2024). Die derzeitigen chemischen Recyclingverfahren sind in der Regel nicht für gemischte Materialien einsetzbar. Neuartige Ansätze mit Enzymen können einige gemischte Materialien trennen (Kehl & Rioussset, 2024), z. B. Baumwolle und Polyester (GAO, 2024). Neben einem österreichischen Pilotprojekt¹ zur chemischen Trennung von Mischtextilien zeigen internationale Lösungen wie REFIBRA (Lenzing AG, AT), CIRCULOSE (Renewcell AB, SE) oder WORNAGAIN (Worn Again Technologies Ltd. GB), dass chemisches Recycling weiter ausgebaut wird².

Mechanische Recyclingtechnologien gibt es seit der industriellen Revolution, sie kommen allerdings aufgrund moderner Herausforderungen wie der umfangreichen Verwendung von Mischmaterialien an ihre Grenzen. Eine verbesserte Kennzeichnung, die eine Vielzahl von Details enthält (z. B. Zusammensetzung, Produktionsprozess und Recyclingfähigkeit), könnte zur Lösung dieses Problems beitragen, wird aber wenig umgesetzt (GAO, 2024). *Thermochemisches* Recycling

*Unterschiedliche
Recyclingtechnologien
...*

*... Mechanisches
Recycling*

*... Thermisches
Recycling*

*... Chemisches und
bioenzymatisches
Recycling*

*Wie ausgereift
sind die
Recyclingtechnologien?*

¹ fti-ressourcenwende.at/de/projekte/kreislaufwirtschaft/PolyBacTex.php.

² umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/dp184.pdf.

gilt als ausgereifte Technologie, auch wenn die Herstellung von Rohstoffen für die chemische Industrie erst seit kurzem möglich ist (Duhoux, 2021). *Chemisches Textilrecycling* ist derzeit nicht für den breiten Einsatz verfügbar. Theoretisch könnten fast alle Polymere von Kunstfasern depolymerisiert werden, jedoch wurde ein effizientes, praktisches Verfahren, das für alle Polymere geeignet ist, noch nicht entwickelt (Lanz et al., 2024). Solche Technologien haben sich jedoch im Labor und in kleinem Maßstab schon bewährt, haben allerdings teils einen hohen Energieverbrauch³. Auch ist die Empfindlichkeit gegenüber Schwankungen im Einsatzstoff bzw. gegenüber Störstoffen hoch und wirkt sich negativ auf die Qualität der Rezyklate bzw. den erforderlichen Aufbereitungsaufwand aus, und senkt somit die Wirtschaftlichkeit der Verfahren (Kehl & Rioussset, 2024). Gleichzeitig entstehen neue Pilotanlagen und Skalierungsinitiativen, die zeigen, dass sich chemisches Recycling zwar noch nicht flächig durchgesetzt hat, aber technologisch und industriell weiterentwickelt wird (Bernhardt et al. 2024).

Die Sortierung ist eine wichtige Voraussetzung für alle Recyclingtechnologien. Automatisierte Sortiersysteme sind inzwischen nicht mehr nur Pilotlösungen, sondern werden in mehreren Ländern bereits praktisch eingesetzt. Neue Projekte verbinden KI-Sortierung, Materialerkennung und Datenanbindung an Produktpässe (Bernhardt et al. 2024). Diese Sortiersysteme überschreiten die Pilotphase und zeigen bereits praktische Anwendbarkeit. TexMat testet EU-finanziert (6 Mio. €) ein Pfand- und Rückgabesystem mit automatisierten Sammelcontainern und Produktpass-Anbindung. Autoloop kombiniert KI-Sortierung, chemisches Recycling und digitalen Produktpass in einem skalierbaren System. Recyc'Elit (Frankreich) hat seinen Textilrecycling-Piloten verzehnfacht, während China vollautomatische KI-/Hyperspektral-Sortieranlagen (KI-Bildanalyse zur Fasererkennung) einsetzt⁴. Produktion und Verbrauch von Textilien nehmen weiter zu, dennoch ist die Bewirtschaftung von Textilabfällen in Europa nach wie vor suboptimal. Wiederverwendung ist sowohl aus ökologischer als auch aus sozioökonomischer Sicht der vorteilhafteste Bewirtschaftungspfad. Mechanisches Recycling ist, gemessen an den meisten Umweltauswirkungskategorien, der zweitwichtigste Weg. Diese Recyclingpfade sind allerdings momentan gegenüber der Verbrennung wenig wirtschaftlich wettbewerbsfähig, dazu müssten entweder die CO₂-Bepreisung steigen oder die Technologie- und Verarbeitungskosten sinken (Solis et al., 2024). Derzeit mangelt es vor allem an skalierbaren Faser-zu-Faser-Recyclinglösungen, bedingt durch (GAO, 2024): (1) Mechanische und chemische Textilrecyclingtechnologien sind durch mangelnde Infrastruktur und unzureichende Produktinformationen für die Sortierung begrenzt. (2) Es fehlt an ausgereiften, (wirtschaftlich) skalierbaren Recyclingtechnologien, die Textilqualität erhalten und gemischte Materialien trennen. (3) Recyclingeignung der Materialien, unzureichende Inputmengen, geringe Nachfrage, hohe Kosten und Energieverbrauch.

Mit den neuen EU-Vorgaben könnten sich die Anreize jedoch verschieben, da Hersteller künftig stärker an Sammlung, Sortierung und Verwertung beteiligt werden (EC 2025).

*Automatisierte
Sortiersysteme zeigen
Skalierungspotenzial*

*Recycling momentan
nicht wettbewerbsfähig
gegenüber Verbrennung*

Herausforderungen

³ umweltbundesamt.de/publikationen/chemisches-recycling.

⁴ cordis.europa.eu/project/id/101181132;
circulareconomy.europa.eu; autoloop-project.eu; recyc-elit.com; databeyond.com;

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Eine Umstellung auf ein kreislauforientiertes Produktions- und Verbrauchssystem für Textilien mit längerer Nutzung, mehr Wiederverwendung, Reparatur und Recycling sowie geringeren Verbrauch ist notwendig. Die österreichische Textil-, Bekleidungs-, Schuh- und Lederindustrie umfasst 294 Unternehmen, etwa 18.000 Beschäftigte und 2 Mrd. Euro Jahresumsatz.⁵ Sie steht unter erheblichem Wettbewerbsdruck und war in den letzten Jahrzehnten durch Verlagerungen der Wertschöpfungsketten nach Asien betroffen. Heimische Unternehmen setzen auf Qualität, sodass Produkte österreichischer Hersteller oft im höheren Preissegment liegen. Verschiedene Instrumente könnten eine zirkuläre Textilwirtschaft fördern und Chancen durch nachhaltige öffentliche Beschaffung nutzen.⁶ Zu diesen Instrumenten zählen nun insbesondere EPR, digitale Produktpässe und neue Vorgaben zum Umgang mit unverkaufter Ware (EC 2025; EC 2026). Dieser große Hebel, könnte in Zukunft eventuell noch besser genutzt werden.⁷ Auch die erweiterte Herstellerverantwortung für Textilien und Schuhe ist auf EU-Ebene beschlossen. Mitgliedstaaten müssen bis Juni 2027 Regelungen umsetzen; funktionsfähige EPR-Systeme sollen ab April 2028 existieren (Richtlinie EU 2025/1892). Auf Basis der EU-Vorgaben soll eine österreichische Folgeanalyse EPR, Sortierarchitektur, Dateninfrastruktur und Re-Use-Priorisierung untersuchen, inklusive Governance, Verteilung und Umsetzung. Das Umweltbundesamt und der Textildialog empfehlen ein EPR-System, das auf bestehender Infrastruktur aufbaut, Re-Use und Reparatur priorisiert und durch ökomodulierte Beiträge sowie klare Verantwortlichkeiten finanziert wird. Als am besten umsetzbar gelten ein herstellernetragenes Modell oder Systeme im Wettbewerb. Zudem sollen sozial-ökonomische Betriebe, Gemeinden und der Handel eingebunden werden (Stoifl, Gold, 2024).

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Eine auf Österreich fokussierende Analyse könnte zur Klärung folgender Fragen beitragen: Welche technischen, organisatorischen, und normativen Standards braucht es für Sortieranlagen, damit Textilien zuverlässig nach Wiederverwendung und Recycling getrennt werden können? Welche Dateninfrastruktur braucht Österreich, um Produktpässe für Textilien sinnvoll für Sammlung, Sortierung und Recycling nutzbar zu machen? Wie wirken EPR, Sortierpflichten und Exportregeln auf soziale Re-Use-Betriebe, gemeinnützige Vereine und regionale Wertschöpfung aus?

*Politischer Kontext
und dringende Fragen*

⁵ wko.at/oe/industrie/textil-bekleidung-schuh-leder/factsheet-textil-bekleidungs-schuh-leder, Stand 2025.

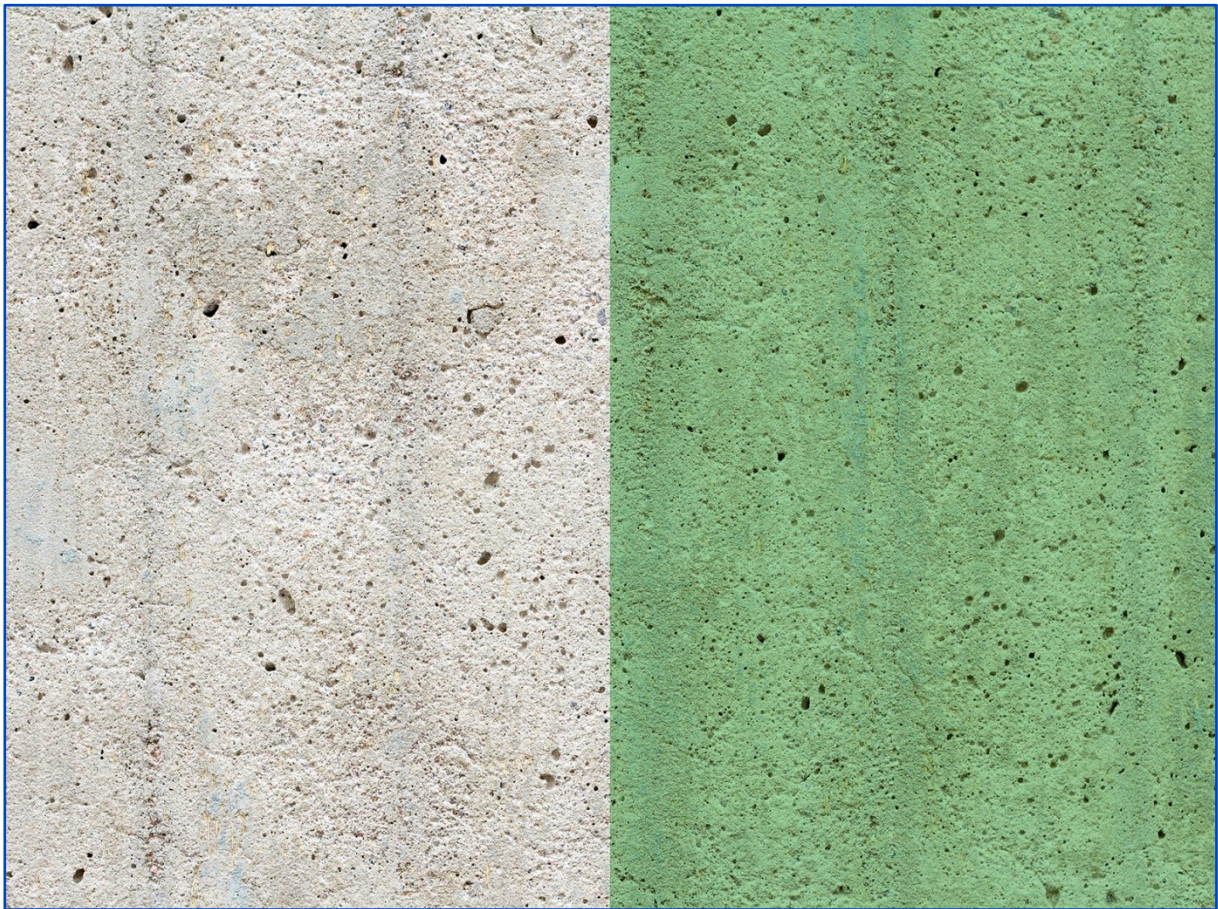
⁶ iwi.ac.at/wp-content/uploads/2021/11/BMK-Kreislaufwirtschaft-im-Textilsektor.pdf.

⁷ nabe.gv.at/textilien-miettextilien-services;
bmz.de/resource/blob/147140/leitfaden-nachhaltige-textilbeschaffung.pdf.

ZITIERTE LITERATUR

- Bernhardt, A., et al. (2024). Die Bestandsaufnahme der Abfallwirtschaft in Österreich – Statusbericht 2024 für das Referenzjahr 2022, bmluk.gv.at/dam/jcr:715ce7e9-c10b-43a4-a186-d304360df529/BAWP_Statusbericht_2024.pdf.
- Bernhardt, A., et al. (2022). Aufkommen und Behandlung von Textilabfällen in Österreich, umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/rep0788.pdf.
- BMK 2023. Ist-Stand, Rahmen und Potentialabschätzung der Alttextilienbewirtschaftung in Österreich. Grundlagenstudie. Bundesministerium für Land- und Forstwirtschaft, Klima- und Umwelt. [bmluk.gv.at/dam/jcr:54e1142d-2a27-4c19-a13c-c9b56f405e92/Alttextilien-Grundlagenstudie2023%20\(1\).pdf](https://bmluk.gv.at/dam/jcr:54e1142d-2a27-4c19-a13c-c9b56f405e92/Alttextilien-Grundlagenstudie2023%20(1).pdf).
- Duhoux, T. et al. (2021). Study on the technical, regulatory, economic and environmental effectiveness of textile fibres recycling. Final Report to the European Commission, Directorate-General for Internal Market, Industry, Entrepreneurship and SMEs. op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/739a1cca-6145-11ec-9c6c-01aa75ed71a1.
- Dzhengiz, T., et al. (2023). (Un)Sustainable transitions towards fast and ultra-fast fashion. Fashion and Textiles, 10(1), 19, doi.org/10.1186/s40691-023-00337-9.
- EC (2022). EU Strategy for Sustainable and Circular Textiles, environment.ec.europa.eu/document/download/74126c90-5cbf-46d0-ab6b-60878644b395_en?filename=COM_2022_141_1_EN_ACT_part1_v8.pdf.
- EC (2025). Revised Waste Framework Directive enters into force, environment.ec.europa.eu/news/revised-waste-framework-directive-enters-force-2025-10-16_en.
- EC (2026). New EU rules to stop destruction of unsold clothes and shoes, environment.ec.europa.eu/news/new-eu-rules-stop-destruction-unsold-clothes-and-shoes-2026-02-09_en.
- EEA (2022). Textiles and the environment: the role of design in Europe's circular economy, eea.europa.eu/publications/textiles-and-the-environment-the.
- GAO (2024). Science & Tech Spotlight: Textile Recycling Technologies, gao.gov/products/gao-24-107486.
- Kehl, C., & Rioussel, P. (2024). Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes. Mit Fallstudien zu Kunststoffverpackungen, Elektrogeräten sowie Baustoffen. Endbericht zum TA-Projekt.
- Lanz, I. E., et al. (2024). A Mapping of Textile Waste Recycling Technologies in Europe and Spain. Textiles, 4(3), 359-390. doi.org/10.3390/textiles4030022.
- Niinimäki, K., et al. (2020). The environmental price of fast fashion. Nature Reviews Earth & Environment, 1(4), 189-200, doi.org/10.1038/s43017-020-0039-9.
- Richtlinie (EU) 2025/1892. Zur Änderung der Richtlinie 2008/98/EG über Abfälle, ABl. L 2025/1892 vom 26.09.2025.
- Solis, M., et al. (2024). Management of textile waste in Europe: An environmental and a socio-economic assessment of current and future scenarios. Resources, Conservation and Recycling, 207, 107693, doi.org/10.1016/j.resconrec.2024.107693.
- Stoifl, B., Gold, C. 2024. EPR-Modelle für Textilien. Hintergrunddokument Textildialog 2024. Umweltbundesamt, Wien. umweltbundesamt.at/fileadmin/site/publikationen/dp194.pdf.
- Tang, K. H. (2023). State of the Art in Textile Waste Management: A Review. Textiles, 3(4), 454-467. doi:10.3390/textiles3040027.

GRÜNER BETON (AKTUALISIERT)



© unsplash.com/K8 Thomas Bayer

ZUSAMMENFASSUNG

Die Herstellung von herkömmlichem Zement, dem Hauptbestandteil von Beton, verursacht etwa 8 % der weltweiten CO₂-Emissionen und verbraucht immense Mengen an natürlichen Ressourcen. Angesichts des steigenden Bedarfs an Beton ist es entscheidend, nachhaltigere Alternativen für die Betonherstellung zu finden. Grüner Beton umfasst verschiedene Ansätze zur Herstellung von umweltfreundlicherem Beton. Dazu gehören: Ersatz von herkömmlichem Zement durch Industrieabfälle wie Flugasche oder Hüttensand, Verwendung von recycelten Materialien im Beton, oder energieeffiziente Herstellungsprozesse. Dazu kommen weitere Innovationen um den Betonbau umweltfreundlicher zu gestalten, wie selbstheilender, 3D-gedruckter oder photokatalytischer Beton, Nutzung elektrifizierter Maschinen sowie Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung. Die größten Herausforderungen liegen derzeit in der Verfügbarkeit alternativer Materialien und Technologien, bei den Kosten für erneuerbare Energien und recycelte Materialien und bei fehlenden Anreizen und Förderungen für die Verwendung von grünem Beton.

*Beton muss
nachhaltiger werden*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Beton ist, aufgrund der vielen Anwendungsbereiche, nach Wasser das am zweithäufigsten verbrauchte Material auf der Erde, mit einer weltweiten Produktion von etwa 4,1 Milliarden Tonnen Zement im Jahr 2021 und einem jährlichen Betonverbrauch, der etwa siebenmal höher ist (Nilimaa, 2023). Die Betonindustrie steht unter zunehmendem Druck, große Schritte in Richtung Nachhaltigkeit zu setzen, denn die Herstellung von gewöhnlichem Portlandzement, dem Hauptbindemittel von Beton, trägt mit etwa 8 % zu den weltweiten, vom Menschen verursachten Kohlendioxidemissionen bei. Darüber hinaus verbraucht die Herstellung von Beton immense natürliche Rohstoffvorkommen. Es ist daher entscheidend, die Betonherstellung umweltfreundlicher zu gestalten (Sivakrishna et al., 2020).

Beton verursacht etwa 8 % der weltweiten CO₂-Emissionen

Neben Wasser und Sand oder Kies ist Zement der Hauptbestandteil von Beton. Bei der konventionellen Zementherstellung wird im ersten Schritt ein Rohstoffgemisch aus feingemahlenem Kalkstein und Ton bei Temperaturen von 1.450 °C zu Portlandzementklinker gebrannt. Im Kalkstein gebundenes CO₂ wird dabei freigesetzt, was etwa zwei Drittel der Gesamtemissionen der Zementherstellung verursacht, ein Drittel entsteht durch den Ofenbetrieb mit fossilen Brennstoffen. Im zweiten Schritt wird der Klinker mit den Zusatzstoffen Kalkstein, Hüttensand, Flugasche und Gips zu Zement gemahlen. Die Zusammensetzung bestimmt Eigenschaften des späteren Betons, wie z. B. Festigkeit, Erstarrungsverhalten und Dauerhaftigkeit (Caviezel et al., 2023).

Konventionelle Zementproduktion

Aktuelle Trends im nachhaltigen Betonbau umfassen grünen Beton, zementähnliche Zusatzstoffe, durchlässigen Beton, kühlenden Beton und die Verwendung lokaler und nachhaltiger Materialien. Außerdem wird an Innovationen, wie selbstheilendem Beton, 3D-gedrucktem Beton (siehe [Häuser aus dem 3-D Drucker](#)), selbst- und luftreinigenden Beton, elektrifizierten Maschinen sowie Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung geforscht (CCUS, siehe [Negativemissionstechnologien](#)) (Nilimaa, 2023).

Aktuelle Umwelttrends und -innovationen im Betonbau

Der Begriff *grüner Beton* ist relativ unscharf. Einerseits bezeichnet er den teilweisen Ersatz von Zuschlagstoffen herkömmlichen Zements durch Industrieabfälle wie Flugasche etwa aus Kohlekraftwerken, Hüttensand aus der Stahlproduktion oder Silikastaub. Andererseits werden darunter auch die Verlängerung der Nutzungsdauer von Betonstrukturen, materialeffiziente Bauweisen, die Verwendung recycelter Materialien und recycelten Betons, die allgemeine Verringerung des CO₂-Fußabdrucks oder eine energieeffizientere Herstellung verstanden.

Grüner Beton ist ein unscharfes Konzept

Auch bei der Herstellung neuer klinkerarmer Normzemente entsteht unvermeidbar CO₂, welches teilweise mit einer Absenkung des Klinkeranteils im Zement vermieden werden kann. In Deutschland sind seit 2021 solche neuen Zementarten genormt, die gegenüber dem herkömmlichen Portlandzement den Klinkeranteil auf etwa 35 % halbieren können (Caviezel et al., 2023). Der fehlende Klinker muss durch größere Anteile an Zuschlagstoffen ersetzt werden, was die Zusammensetzung der klinkerarmen Zemente komplexer macht. Außerdem hängen die beton-technischen Eigenschaften (und damit die Anwendungsbereiche) in immer stärkerem Maße von der Leistungsfähigkeit der verwendeten Zuschlagstoffe ab. Ge-

Klinkerarme Zemente mit neuen Ersatzstoffen, wie Flugasche, Hüttensand, Tonminerale oder Biokohle

nau diese hochwertigen Zuschlagstoffe könnten in Zukunft aber zu Mangelware werden: Hüttensand durch die Transformation der Stahlindustrie und Flugasche als Folge des Ausstiegs aus der Kohleverstromung (Caviezel et al., 2023). Große Hoffnungen werden daher auf neue Zuschlagstoffe wie Tonminerale gesetzt. An der Normierung und Einführung entsprechender Zemente wird derzeit gearbeitet. In Bezug auf ihre Leistungsfähigkeit und die Realisierungsbedingungen für einen Masseneinsatz bestehen allerdings noch offene Fragen (Caviezel et al., 2023). Auch der Zusatz von Biokohle (siehe *Negativemissionstechnologien*) in Beton bringt mehrere Vorteile mit sich, wie z. B. eine verbesserte Festigkeit und Haltbarkeit, verbesserte thermische Eigenschaften und das Potenzial zur längerfristigen Kohlenstoffbindung in Bauteilen (Barbhuiya, Bhusan Das, et al., 2024). Die TU Wien untersucht gemeinsam mit der Stadt Wien und Industriepartnern die Nutzung mineralischer Rückstände aus der Müllverbrennung als Ersatz für Sand und Kies im Beton.¹

Im Betonrecycling wird schon beim Abriss von Gebäuden auf die sortenreine Trennung geachtet werden, danach werden Betonreste zerkleinert und vom Bewehrungsstahl getrennt, der eingeschmolzen wird. Seit 2024 dürfen in Österreich keine mineralischen Baurestmassen, zu denen Beton gehört, mehr deponiert werden. Altbeton wird daher nahezu vollständig recycelt, allerdings meistens als Downcycling, d. h. etwa als ungebundene Tragschicht im Straßenbau. Werden Betonreste klassiert, d. h. nach Korngröße getrennt, kann das Material als Ersatz für natürlich Gesteinskörnung bei neuem Beton verwendet werden, was erhebliche Ressourcen im Abbau und Transport einspart². Pilotanlagen können bereits aus recyceltem Beton Belit-Zementklinker herstellen, ein hochwertiger Zuschlagstoff für neuen Beton. Entstehende CO₂-Emissionen werden im Prozess aufgefangen und im Zement wieder gebunden³.

Außerdem gibt es verschiedenste Ansätze, Beton mit neuen Eigenschaften zu versehen um ihn bei seiner Verwendung nachhaltiger zu machen. Die Reife der Technologien ist sehr unterschiedlich (Nilimaa, 2023):

- Durchlässiger Beton ist so konzipiert, dass er Wasser durch seine Struktur durchlässt, wodurch der Oberflächenabfluss von Regenwasser verringert und die Grundwasserneubildung gefördert wird. Er könnte eine entscheidende Rolle bei der Abschwächung der Auswirkungen städtischer Hitzeinseln spielen, Überschwemmungsrisiken verringern und Wasserqualität verbessern.
- Kühlender Beton enthält reflektierende oder helle Komponenten, die die Oberflächentemperatur von Betonstrukturen senken, um Hitzebelastungen abzuschwächen und den Energieverbrauch von Gebäudekühlung zu verringern.
- Photokatalytische Materialien, wie Titandioxid, verleihen Beton selbstreinigende und luftreinigende Eigenschaften, die in Städten zu besserer Luftqualität beitragen können.
- Ultrahochleistungsbeton (UHPC – Ultra-high-performance concrete), ein zementhaltiger Verbundwerkstoff kann die eingesetzte Materialmenge erheblich verringern, bei gleichzeitiger Verlängerung der Lebensdauer von Bautei-

Altbeton-Recycling

Neue Eigenschaften mit Auswirkungen auf die Nachhaltigkeit von Betonstrukturen:

... durchlässiger Beton

... kühlender Beton

... Luft- und selbstreinigender Beton

... Ultrahochleistungsbeton

¹ noe.orf.at/stories/3313186.

² abfallwirtschaft.steiermark.at/cms/dokumente/10024917_46569/5f8aa150/Recyclingbeton_2.3.pdf.

³ vdi-nachrichten.com/technik/umwelt/kit-pilotanlage-fuer-klimafreundlichen-zement/.

len und Gebäuden. Studien belegen eine Verringerung der CO₂-Emissionen um 17 % und der Kosten um 8 % bei vergleichbaren mechanischen Eigenschaften (Wu et al., 2025).

Selbstheilender Beton soll, wie andere *selbstheilende Materialien*, Dauerhaftigkeit und Leistung verbessern, indem Risse und Schäden selbstständig repariert werden, was Inspektion, Wartung und Reparaturen verringert. Dies kann durch den Einsatz spezifischer Bakterienstämme erreicht werden, die gezielt Kalziumkarbonat ausscheiden, durch die Beimischung von Mikrokapseln mit polymeren oder mineralischen Verbindungen, durch Polymerfasern mit Formgedächtnis sowie durch superabsorbierende Polymere. Eine zentrale offene Frage bei allen Arten von Kompositmaterialien bleibt jedoch ihre Recyclingfähigkeit.

Selbstheilender Beton

Die Infrastruktur zur Kalzinierung von Kalkstein zur Herstellung von Portlandzementklinker kann elektrifiziert werden, wodurch die damit verbundenen CO₂-Emissionen bei Anwendung erneuerbarer Energien um bis zu 40 % reduziert werden. Alternativ kann Wasserstoff eingesetzt werden, um die erforderlichen Prozesstemperaturen zu erreichen. Zudem lässt sich der Brennprozess vollständig durch Elektrolyse ersetzen, wodurch die CO₂-Emissionen um bis zu 60 % gesenkt werden können. Die Elektrolyse vermeidet den Einsatz fossiler Energieträger, und das aus der chemischen Reaktion entstehende CO₂ kann effizient zurückgewonnen werden (Volaity, 2025).

*Elektrifizierung des
Herstellungsprozesses*

Generell ist es noch ein weiter Weg zu einem Netto-Null Betonsektor, die größten Herausforderungen lassen sich wie folgt zusammenfassen (Al-Otaibi, 2024; Barbhuiya, Bhusan, et al., 2024):

*Zentrale
Herausforderungen
für einen Netto-Null
Betonsektor*

- *Technisch*: Verfügbarkeit alternativer Energiequellen, Effizienz bestehender Anlagen und das Fehlen klarer Normen für recycelte Materialien.
- *Wirtschaftlich*: wie z.B. nicht-einheitliche CO₂-Steuern zwischen Ländern oder fehlender Emissionshandel was zur Unterstützung des etablierten kohlenstoffintensiven Systems führt. Kosten und Verfügbarkeit erneuerbarer Energien und recycelter Materialien.
- *Umsetzung*: restriktive Zementnormen, Ausrüstungs- und Betriebsfragen sowie Personalverfügbarkeit und Personalkompetenz.
- *Unterstützung und Förderung*: Mangel an politischer Unterstützung und Anreize für die Verwendung recycelter Materialien im Bauwesen

Aus heutiger Sicht ist das Ziel einer (weitgehend) klimaneutralen Zementindustrie nur mit Hilfe des Einsatzes von CO₂-Abscheidung und -Speicherung bzw. -Nutzung zu erreichen (s. *Negativemissionstechnologien*). CO₂ soll direkt an den Punktquellen, wie Zementwerken, abgefangen und unterirdisch gespeichert werden. Dazu wurde die Österreichische Carbon Management Strategie im Juni 2024 im Ministerrat beschlossen, die unter anderem „die Aufhebung des Verbots der geologischen CO₂-Speicherung im Bundesgebiet und die zeitgleiche Schaffung des notwendigen Rechtsrahmens für die geologische CO₂-Speicherung durch vollumfängliche Umsetzung der EU CCS-Richtlinie“ vorsieht⁴. Auch die Rechtslage für den rohrliniengebundenen Transport soll angepasst werden. In der Strategie werden die strengen Sicherheits- und Umweltauflagen betont unter de-

*Vermindern
nicht-vermeidbarer
Emissionen durch
CCUS*

⁴ bmf.gv.at/themen/klimapolitik/carbon_management.html.

nen CCS umgesetzt werden soll. Weltweit verfolgen etliche Nationen Speicherprojekte, einige davon kommerziell. Da aber sehr lange Lagerzeiten angepeilt werden (mehrere Jahrhunderte, bzw. Jahrtausende) können Unsicherheiten, vor allem in der Frage wie langfristig die Lagerstätten ohne Leck bestehen können nicht ausgeräumt werden (Bashir et al., 2024). An Zementwerken abgeschiedener Kohlenstoff soll auch für die Grundstoffindustrie nutzbar gemacht werden (CCU, siehe *CO₂ als Ressource*).

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

In Österreich sind einige Forschungseinrichtungen mit der Entwicklung und Umsetzung von grünem Beton beschäftigt⁵. Insgesamt gibt es österreichweit acht aktive Zementwerke mit betriebsbereiten Ofenanlagen, die etwa 4,5 Mio. Tonnen Zement pro Jahr produzieren (2024)⁶. Einige Unternehmen bieten klimafreundlicheren Beton an, mit CO₂-Reduktionen nach eigenen Angaben von 10-70% gegenüber dem Branchenstandard⁷, etwa durch Klinkerersatzstoffe und dem Einsatz von Recyclingbeton. 2024 wurde in Wien erstmals ein Haus aus Recyclingbeton errichtet.⁸ Seit Anfang 2025 wird im Rahmen des GREEN-Stone-Projekts die Substitution von Zement durch Geopolymeren als Bindemittel in Kombination mit Recyclingmaterialien untersucht.⁹ Erste Schritte in Richtung Nachhaltigkeit sind mit der Normierung der Beurteilung von Betonprodukten gesetzt, in der Herstellungsphase (von der Wiege bis zum Werkstor) oder dem gesamten Lebenszyklus (von der Wiege bis zur Bahre)¹⁰.

Einige Ansatzpunkte für die Umsetzung und Förderung eines nachhaltigeren Betonbaus: Einführung und Durchsetzung von Regeln und Anreizen zur Förderung der Nachhaltigkeit; Bildung von öffentlich-privaten Partnerschaften zur gemeinsamen Nutzung von Ressourcen und Verantwortlichkeiten für nachhaltige Projekte; Aus- und Weiterbildungsangebote, um Fachleute mit den notwendigen Kompetenzen auszustatten; Unterstützung von Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, um nachhaltige Innovationen voranzutreiben; die Durchführung von Pilotprojekten zur Erprobung und Verfeinerung nachhaltiger Praktiken in realen Szenarien (Khan & McNally, 2023).

*Vielfältige
Ansatzpunkte für
eine Strategie hin zu
nachhaltigerem Beton
in Österreich*

⁵ Z. B. tugraz.at/tu-graz/services/news-stories/tu-graz-dossiers/nachhaltig-bauen-mit-beton; klimaneutralerstadt.at/resources/pdf/schriftenreihe-2024-26-rcc2.pdf.

⁶ zement.at/archiv/kennzahlen-der-zementindustrie-2024.

⁷ Z. B. wopfinger.com/produkte/oekobetone.html; rohrdorfer.at/strapi/uploads/Produktfolder_Nachhaltige_Betone_intranet_4068a8fe21.pdf; holcim.at/produkte-services/ecopact.

⁸ smartcity.wien.gv.at/48eralsvorreiter.

⁹ klimaneutralerstadt.at/de/projekte/tiks/green-stone-entwicklung-eines-zementfreien-betons-mit-recyclinganteil.php.

¹⁰ austrian-standards.at/de/shop/onorm-en-16757-2023-05-15-p2660618.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

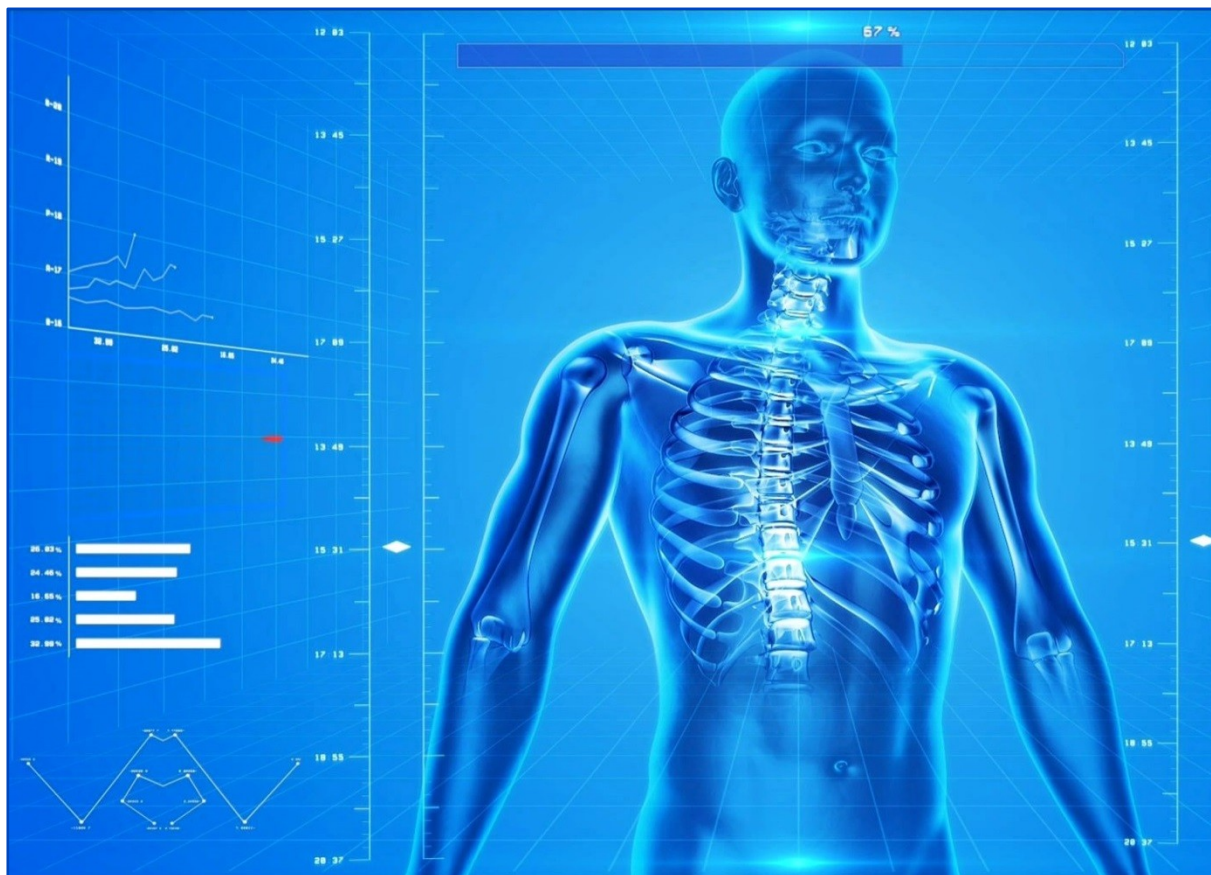
Die Überwindung der oben aufgezählten Hindernisse erfordert ein umfassendes Verständnis für die Notwendigkeit den Betonbau nachhaltiger zu machen und damit eine gemeinsame Anstrengung aller Beteiligten in der Bauindustrie. Forschung sollte dringend offene Fragen in Bezug auf nachhaltigeren Betonbau klären. Alle relevanten Stakeholder müssen in die Formulierung klarer Leitfäden und der Verbesserung technischer Normen mitwirken sowie ein größeres Bewusstsein über die Vorteile von grünem Beton schaffen (Al-Otaibi, 2024). Auch kann eine vertiefende Literaturstudie, angereichert durch Expert:inneninterviews zu Nachhaltigkeitsbewertungen einzelner oben angesprochener Technologien eine bessere Entscheidungsgrundlage geben. Eine TA-Studie könnte hier politische Entscheidungsträger:innen unterstützen, gemeinsam mit allen Stakeholdern Schlüsselstrategien zu den oben genannten Punkten zu erarbeiten. Strategien, die entscheidend dazu beitragen könnten den Betonbau über den gesamten Lebenszyklus umweltfreundlicher zu gestalten.

*Klare Leitfäden,
verbesserte Normen*

ZITIERTE LITERATUR

- Al-Otaibi, A. (2024). Barriers and Enablers for Green Concrete Adoption: A Scientometric Aided Literature Review Approach. *Sustainability*, 16(12), 5093. doi: [10.3390/su16125093](https://doi.org/10.3390/su16125093).
- Barbhuiya, S., et al. (2024). Biochar-concrete: A comprehensive review of properties, production and sustainability. *Case Studies in Construction Materials*, 20, e02859. doi: [10.1016/j.cscm.2024.e02859](https://doi.org/10.1016/j.cscm.2024.e02859).
- Barbhuiya, S., et al. (2024). Roadmap to a net-zero carbon cement sector: Strategies, innovations and policy imperatives. *Journal of Environmental Management*, 359, 121052. doi: [10.1016/j.jenvman.2024.121052](https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.121052).
- Bashir, A., et al. (2024). Comprehensive review of CO2 geological storage: Exploring principles, mechanisms, and prospects. *Earth-Science Reviews*, 249, 104672. doi: [10.1016/j.earscirev.2023.104672](https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2023.104672).
- Caviezel, C., et al. (2023). Alternative Technologiepfade für die Emissionsreduktion in der Grundstoffindustrie - Endbericht zum TA-Projekt (Ergebnisbericht). *Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag, Berlin*, publikationen.bibliothek.kit.edu/1000170905/152949637.
- Khan, M., & McNally, C. (2023). A holistic review on the contribution of civil engineers for driving sustainable concrete construction in the built environment. *Developments in the Built Environment*, 16, 100273. doi: [10.1016/j.dibe.2023.100273](https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100273).
- Nilimaa, J. (2023). Smart materials and technologies for sustainable concrete construction. *Developments in the Built Environment*, 15, 100177. doi: [10.1016/j.dibe.2023.100177](https://doi.org/10.1016/j.dibe.2023.100177).
- Sivakrishna, A., et al. (2020). Green concrete: A review of recent developments. *Materials Today: Proceedings*, 27, 54-58. doi: [10.1016/j.matpr.2019.08.202](https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.08.202).
- Volaity, S., et al. (2025). Towards decarbonization of cement industry: a critical review of electrification technologies for sustainable cement production. *npj Materials Sustainability*, 3 (23), [10.1038/s44296-025-00068-6](https://doi.org/10.1038/s44296-025-00068-6).
- Wu, C., et al. (2025). Assessing the carbon reduction potential of high-performance concrete in urban construction. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, 102170, [10.1016/j.scp.2025.102170](https://doi.org/10.1016/j.scp.2025.102170).

DIGITALE ZWILLINGE IM GESUNDHEITSWESEN (AKTUALISIERT)



© pixabay.com/PublicDomainPicture

ZUSAMMENFASSUNG

Das Konzept der Digitalen Zwillinge (digital twins) beschreibt eine Repräsentanz eines realen Objekts in der virtuellen Welt und kann als Weiterentwicklung bestehender Modellierungen verstanden werden, die es ermöglicht, den Zustand des realen Objekts in Echtzeit zu überwachen und nötigenfalls steuernd einzugreifen. Darüber hinaus können an Digitalen Zwillingen die Auswirkungen von Veränderungen am realen Objekt getestet werden. Dazu gibt es bereits viele Anwendungen, etwa in Laboren, der Stadt- und Verkehrsplanung oder der Logistik. Während in diesen Bereichen die Digitalen Zwillinge in einem frühen Entwicklungsstand schon seit einigen Jahren im Einsatz sind, wird ihre Anwendung nunmehr zunehmend für medizinische Zwecke erforscht. Dort gibt es bereits Demonstrationen und frühklinische Versionen Digitaler Zwillinge bestimmter Organe, wie Herz oder Leber. Die Vision für die Zukunft ist jedoch die Modellierung des gesamten menschlichen Organismus.

*Digitale Zwillinge
als Instrument zur
Bewältigung vieler
komplexer
Herausforderungen*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Digitale Zwillinge sind ein Konzept zur Modellierung realer Objekte in digitalen Systemen. Sie sollen eine gesamte oder auf Teilbereiche fokussierte Darstellung der Realität ermöglichen. Das Ziel ist, die relevanten Aspekte der Wirklichkeit möglichst detailgetreu wiederzugeben, um in weiterer Folge Veränderungen oder Anpassungen zunächst am Modell ausprobieren zu können, bevor man kostspielige oder riskante Veränderungen in der Realität vornimmt.

Das Konzept findet in verschiedenen Bereichen Anwendung: in der Medizin¹, in der Stadtplanung, in industriellen Fertigungsprozessen u.v.m. Der wichtigste Unterschied zu bisher genutzten Modellen besteht in dem in (nahezu) Echtzeit erfolgenden Datenaustausch mit dem realen Objekt, dessen Darstellung der Digitale Zwilling ist. In herkömmlichen, statischen Modellen werden zwar die Eigenschaften aus der Realität übernommen, es erfolgen aber keine (bidirektionalen) kontinuierlichen Updates der Parameter; auch ist eine Steuerung des realen Objekts über ein statisches Modell nicht vorgesehen. Im Vergleich dazu beschreibt der Begriff des Digitalen Schattens eine virtuelle Darstellung eines realen Objekts, das nur unidirektional, von der Realität zum Modell, mit Daten versorgt wird.² Allein das Messen von Parametern eines Objekts oder Prozesses und deren anschließende Visualisierung genügen jedoch nicht, um von einem Digitalen Zwilling zu sprechen, da es sich hierbei um kein Modell handelt. Der Unterschied zu einer Simulation mag fließend sein, wird jedoch meist über den Maßstab bestimmt. So spezialisiert sich eine Simulation auf einen ganz bestimmten, veränderlichen Aspekt, wohingegen Digitale Zwillinge umfassender sein sollen, also auch unterschiedliche oder mehrere Simulationen parallel durchführen könnten.³

In der Medizin werden Digitale Zwillinge im Gesundheitswesen oder Human/Health Digital Twins, HDT, vor allem dahingehend erforscht, Individuen mit persönlichen Messdaten digital abzubilden, um durch Früherkennung frühzeitige Behandlung zu ermöglichen, und um komplexe Zusammenhänge und Wechselwirkungen zu simulieren. So sollen Effektivität und Nebenwirkungen von Behandlungen getestet werden, ohne die Person damit unnötig zu belasten (Burr et al., 2026). Dabei sind weitreichende Verknüpfungen denkbar, z. B. über automatisierte Messungen von physiologischen Parametern und individuellem Verhalten, wobei auch das Internet of Things (IoT) zum Einsatz kommen kann (ibid.). Auch digitale Zwillinge von Gesundheitseinrichtungen, z. B. um rasch auf Dynamiken im Zustrom von Personen zu reagieren, werden untersucht (ibid.). Die Erhebung, Verarbeitung und Verknüpfung der Daten und andere automatisierbare Schritte könnten mit *KI-Agenten* unterstützt werden.⁴ Quanten-Computing, möglicherweise in Verbindung mit *Quantensensoren*, könnte die Präzision und die Sicherheit der Datenübertragung erhöhen (Jameil, Al-Raveshidi 2025).

Was sind Digitale Zwillinge ...

... und wie werden diese von ähnlichen Konzepten abgegrenzt?

z. B. Digitaler Schatten

z. B. Simulation

Digitale Zwillinge im Gesundheitswesen

¹ Siehe auch: *Datengetriebene Medizin* und *Automatisiertes Gesundheitsdatenmonitoring*.

² Bisweilen wird auch die Summe aller über eine Person verfügbaren und in einem Profil gespeicherten Daten als Digitaler Schatten bezeichnet.

³ Zum Verhältnis von Smart Spaces und Digitalen Zwillingen siehe hier: *Smart Spaces und Digital Twins*.

⁴ *diepresse.com/20800755/agent-ai-einsatz-im-gesundheitswesen*.

Bspw. in der Therapie bestimmter Krebsarten verspricht man sich große Erfolge davon, dass Daten über den Tumor, z. B. seine Gewebebeschaffenheit, gemeinsam mit anderen Daten der zu behandelnden Personen in einen Digitalen Zwilling eingespeist werden, sodass sich letztendlich im Modell erproben lässt, welche pharmazeutische oder Strahlentherapie den größten Effekt in der Behandlung hätte. Ein klinischer Versuch demonstrierte die Möglichkeit, durch gezieltere Dosierung von Medikamenten Therapieresistenzen hinauszuzögern (Olawade et al., 2026). Digitale Zwillinge könnten dabei helfen, Strahlentherapie gezielter einzusetzen, Biomarker zu identifizieren und die Entwicklung neuer Medikamente zu unterstützen; auch Remissionen nach erfolgreichen Behandlungen könnten mithilfe Digitaler Zwillinge leichter erkannt werden (ibid.) Für Personen mit Diabetes soll es auf Grund individueller Daten möglich werden, Folgeschäden der Krankheit schon frühzeitig erkennen und damit weitere Schädigungen auch vermeiden zu können.⁵ Weitere Hoffungsgebiete sind Dermatologie und Kardiologie.

*Hoffnungen
in den Bereichen:*

Krebsbekämpfung

Diabetes

*Dermatologie und
Kardiologie*

Es besteht die Hoffnung, dass es eines Tages über geeignete Sensoren möglich sein wird, den gesamten Organismus eines Menschen in Echtzeit zu modellieren, um genetische Faktoren ebenso zu berücksichtigen wie bspw. Umwelteinflüsse, Vorerkrankungen oder die Wechselwirkungen mit anderen Substanzen (Tang et al 2024). Dazu fehlt jedoch noch in vielen Bereichen ein genaueres Verständnis über die komplexen Zusammenhänge im menschlichen Körper. Eine andere Vision für die Zukunft wäre bspw. die *Vorbereitung auf komplizierte Operationen*. Das Gesundheitspersonal könnten sich anhand der Modelldaten ein Bild von den Spezifika der zu operierenden Person machen, verschiedene Ansätze ausprobieren und z. B. auch Prothesen bereits präzise vorab anfertigen lassen. Damit wären eine höhere Qualität des Operationsausgangs und eine raschere Heilung zu erwarten. In der *Prävention* könnte der Digitale Zwilling alle verfügbaren Messdaten eines Menschen gemeinsam mit statistischen Bevölkerungsdaten, individuellen Krankheitsverläufen, den Daten zu bestimmten Krankheitsbildern und Informationen über Therapieerfolge bei anderen verbinden und daraus präventive Maßnahmen ableiten, die insgesamt zu deutlich geringeren Behandlungskosten und einer gesünderen Bevölkerung beitragen könnten.⁶

Große Hoffnungen

Bereits heute kommen Digitale Zwillinge in der Medizin bei der Entwicklung von Medikamenten zur Anwendung, wo sie analog zu Virtual Prototyping in der Industrie den Ressourcenaufwand bei der Entwicklung neuer Produkte, hier pharmazeutische Therapien, senken sollen. Durch den Digitalen Zwilling eines Organs oder Organsystems kann die Wechselwirkung mit dem Medikament vorab unter unterschiedlichen Rahmenbedingungen erprobt werden. Ziel ist es, die Präparate, die in klinische Tests kommen, auf wenige, vielversprechende zu reduzieren, womit die Ablehnungsrate (bspw. durch die Federal Drug Administration in den USA, wo sie bei 90 % liegt), sinken würde. Es ist auch angedacht, in klinischen Studien weniger Personen und mehr Digitale Zwillinge für Kontrollgruppen einzusetzen, sog. „in silico clinical trials“ (Venkatesh et al 2024).

*Medikamenten-
entwicklung*

⁵ pwc.de/de/gesundheitswesen-und-pharma/pwc-studie-der-digitale-zwilling.pdf.

⁶ siemens-healthineers.com/deu/perspectives/digital-patient-twin.

Die Steigerung dessen wäre eine digitalisierte Bevölkerung, die sich aus Digitalen Zwillingen aller in einem Land wohnenden Menschen ergäbe. Davon erhofft man sich bei Krankheitswellen, dem Ausbruch einer Pandemie u.dgl.m. bessere Entscheidungsgrundlagen zu haben, weil neue Erkenntnisse sofort auf die Gesamtbevölkerung umgelegt werden könnten und damit bspw. Vorerkrankungen, Komorbiditäten oder genetische Prädispositionen sichtbar würden, die eine Person zum Mitglied einer Risikogruppe macht (Venkatesh et al 2024).

Die Funktionsweise Digitaler Zwillinge erfordert allerdings eine gewisse kritische Masse an abgebildeten Personen, mit entsprechenden Investitionen (Burr et al., 2026). Erforderlich sind – und versprochen werden – eine reibungslose Integration von Daten aus verschiedensten Geräten, Dateiformaten und institutionellen Umgebungen, deren Verfügbarkeit, stetiges Monitoring der Personen, sichere Datenökosysteme und KI-gesteuerte Präzisionsmedizin, bei welcher die Bedürfnisse des Individuums im Vordergrund stehen (ibid.). Demgegenüber stehen sehr unterschiedliche Systeme, Dateiformate und alles andere als reibungslose Abläufe im klinischen Alltag, Mangel an Ressourcen, geringe empirische Evidenz für die tatsächliche Effektivität der personalisierten Behandlung, das Risiko beunruhigender und verfrühter Diagnosen ohne Behandlungsoptionen, welche u. U. durch Sorge und Verhaltensänderungen zu selbsterfüllenden Prophezeiungen werden, sowie mangelnde Verfügbarkeit des IoT, kontinuierlicher Internetverbindung und Bandbreite (ibid.). Auf übergeordneter Ebene stellen sich enorme, in der Regulierungspraxis neuartige Herausforderungen, welche Überlappungen zur allgemeinen KI-Problematik haben: Datenschutz und -sicherheit auf individueller Ebene ist nicht gleich wie auf gesellschaftlicher Ebene – im Hinblick auf die Datenverknüpfungen und auf die Digitalen Zwillinge Verstorbener – wird aber immer noch nur auf individueller Ebene reguliert, die für ein informiertes Einverständnis erforderliche digitale Kompetenz fehlt auf vielen Ebenen, die Zuordnung der Haftung zu den vielen involvierten Akteuren ist ungeklärt und komplex, und akzeptierte Standards sowie die Kriterien für deren Validierung und Monitoring fehlen (ibid.). Das Prinzip der Datensparsamkeit⁷ wäre in so einem Fall vermutlich kaum mehr zu erfüllen, weil das System aus heutiger Sicht bessere Ergebnisse liefern wird, wenn möglichst umfangreich Daten eingespeist werden – insbesondere so lange, wie die relevanten Prozesse oder die verantwortlichen Kriterien für bestimmte Entwicklungen im menschlichen Körper noch unbekannt sind. Eine große Gefahr und Ironie ist, dass, wie woanders in der Medizin auch, am wenigsten behandelt wird, wo der größte Bedarf liegt – so bei seltenen Krankheiten, von denen zwar durch die vielen verschiedenen Krankheiten in Österreich ca. eine halbe Million betroffen sind⁸, aber bei denen zu den einzelnen Krankheiten wenige Daten vorliegen, und bei traditionell in der Medizin marginalisierten, unter-beforschten und unterbehandelten Gruppen; etwa je nach Geschlecht und Hautfarbe (Burr et al., 2026). Bei einem System, das auch die selbst generierten Daten stetig weiterverarbeitet, könnten sich benachteiligende Muster weiter verstärken, ohne dass klar wäre, wie und wo eingegriffen werden kann (ibid.). Ebenso könnten neuere Entwicklungen wie etwa neuartige Krankheitsbilder durch Schadstoffbelastung aufgrund mangelnder Trainingsdaten vernachlässigt werden. Hinzu kommt, dass Versicherungen nun auch auf Grundlage

*Vision:
vollständig
digitalisierte
Bevölkerung*

*Viele potenzielle
Chancen ...*

*... aber mangelnde
Voraussetzungen ...*

*... ungeklärte Fragen
zu Datenschutz,
informiertem
Einverständnis und
Haftung ...*

*... ungleich verteilte
Chancen und ungleich
verteilte Risiken*

⁷ Es werden nur so viele Daten erhoben und verarbeitet, wie zur Erreichung des Zwecks unbedingt erforderlich sind.

⁸ sozialministerium.gov.at/Themen/Gesundheit/Seltene-Krankheiten.html.

potenzieller genetischer, physiologischer und verhaltensbasierter Risikoindikatoren diskriminieren könnten (ibid.) – wobei bekanntlich auch deren Aussagekraft unsicher sein kann. Möglich wäre eine Kommerzialisierung der Daten, während man von den Personen, die diese zur Verfügung stellen, Geld verlangt und so medizinische Leistungen noch stärker vom individuellen Wohlstand abhängig macht (ibid.). Ein übermäßiges Vertrauen in die digitalen Empfehlungen könnte auch die so wichtige Beziehung zwischen Gesundheitspersonal und die Unterstützung, Beratung und Behandlung Suchenden belasten, ebenso wie das Vertrauen des Personals in die eigene Kompetenz (ibid.). Bei sehr zeitkritischen Entscheidungen wie in der Krebstherapie wären die bis zu Wochen dauernden Berechnungen ein Problem (Olawade et al., 2026).

Wie werden die Datenerhebung und -verarbeitung im European Health Data Space⁹ geregelt? Wie kann gesichert werden, dass Menschen, die aus Datenschutzgründen digitale Zwillinge für sich selbst ablehnen, nicht benachteiligt werden, etwa bei der Zuerkennung gesundheitsbezogener Sozialleistungen? Ist ein konsequentes Erfüllen der Versprechungen möglich, und wenn ja, wie? Wie sieht ein gerechtes, inklusives, zukunftsfähiges Gesundheitswesen aus und wie soll es mit knappen Ressourcen umgehen? Dies müsste in einer breiten gesellschaftlichen Diskussion erörtert werden.

Breite gesellschaftliche Diskussion ist unerlässlich

Weiters ist zu fragen, wie ein Plan B aussehen könnte und wie man sich darauf vorbereiten würde. Bei einer so weitgehenden Integration dieser Systeme ins Gesundheitswesen ist jedenfalls zu überlegen, was bei unzuverlässigem Funktionieren die Rückfallebene darstellt.

Neue Abhängigkeiten

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Österreich kann von den Möglichkeiten Digitaler Zwillinge und deren Entwicklung profitieren. Die Forschung dazu wird durch die Forschungsförderungsgesellschaft unterstützt und kann Österreich als Forschungsstandort attraktiver machen. Dabei böte sich die Gelegenheit, die Kompetenzen im Bereich KI, medizinischer Forschung und Systemmodellierung zusammenzuführen. Auch die molekular-biologische/medizinische Forschung könnte profitieren. Es gibt Potential für Effektivitäts- und Effizienzsteigerungen im Gesundheitswesen, jedoch braucht es dafür Rahmenbedingungen, welche umfassende Koordinierung erfordern. Österreichs Engagement auf dem Gebiet Digitaler Humanismus und Demokratie wäre für die österreichischer und europäischer Ebene unerlässliche gesellschaftliche Debatte zur Ausrichtung des Gesundheitswesens im Kontext der durch Digitale Zwillinge aufgeworfenen komplexen und brisanten Fragestellungen besonders relevant.

Mehr Lebensqualität für Patient:innen und geringere Kosten im Gesundheitsbereich

⁹ EU-Kommission zum EHDS: European Health Data Space: health.ec.europa.eu/ehealth-digital-health-and-care/european-health-data-space_en.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

In einem ersten Schritt könnte das in Österreich zu dem Thema vorhandene Wissen und Potenzial erhoben werden. Eine bessere Vernetzung der relevanten Akteure erscheint ebenfalls sinnvoll. Dazu wäre es wichtig, gesellschaftliche Erwartungen an ein digitalisiertes Gesundheitswesen, die Möglichkeit eines gleichberechtigten Zugangs aller Menschen zu den Vorteilen dieser Technologie, Datenschutz und Nicht-Diskriminierung zu erheben, um diese Erkenntnisse von Anfang an in die Entwicklung einzubinden. Dazu gehört die Frage, wie der regulatorische Rahmen innovativ erweitert werden kann, um durch Digitale Zwillinge und nicht zuletzt durch die darin eine so wichtige Rolle spielende KI und das IoT entstandene vernetzte Fragestellungen von Datenschutz, Datensicherheit, informiertem Einverständnis und Haftung auf gesellschaftlicher und individueller Ebene zu meistern. Dies könnte in einer vertiefenden Studie für Österreich unter Einbindung aller Stakeholder erarbeitet werden. Sollte der Gesetzgeber oder die Verwaltung das Thema zu einem Forschungsschwerpunkt in Österreich machen wollen, wäre auch die Erstellung einer Strategie zu Digitalen Zwillingen und einer damit verbundenen Roadmap zur Erreichung der gesteckten Ziele in allen Bereichen sinnvoll.

Ist-Zustandserfassung und Einsatzrichtlinien wären für eine Weiterentwicklung von großer Bedeutung ...

... dazu könnten Faktoren für Effektivität und Akzeptanz Digitaler Zwillinge erforscht werden

ZITIERTE LITERATUR

- Burr, C. et al. Realising the digital twin: a thematic review and analysis of the ethical, legal, and social issues for digital twins in healthcare. *AI & Soc* (2026). doi.org/10.1007/s00146-025-02833-6.
- Grieves, M.W. (2005). Product lifecycle management: the new paradigm for enterprises. *Int. J. Product Development*, vol. 2:1, 2. doi.org/10.1504/IJPD.2005.006669.
- Jameil, A.K., Al-Raweshidy, H. (2025). Quantum-enhanced digital twin IoT for efficient healthcare task offloading. *Discov Appl Sci* 7, 525. doi.org/10.1007/s42452-025-07101-2.
- Olawade et al. (2026). Digital twins in oncology: From predictive modelling to personalised treatment strategies, *Critical Reviews in Oncology/Hematology*, 220, 105171. doi.org/10.1016/j.critrevonc.2026.105171.
- Singh, M., et al. (2021). Digital Twin: Origin to Future. *Appl. Syst. Innov.*, 4, 36., doi.org/10.3390/asi4020036.
- Sun T., He X., Li Z. (2023). Digital twin in healthcare: Recent updates and challenges. *Digital Health* 2023/9. [doi:10.1177/20552076221149651](https://doi.org/10.1177/20552076221149651).
- Tang, C., et al. (2024). A roadmap for the development of human body digital twins. *Nat Rev Electr Eng* 1, 199–207. doi.org/10.1038/s44287-024-00025-w.
- Venkatesh, K.P., et al. (2024). Health Digital Twins in Life Science and Health Care Innovation. *Annual Review of Pharmacology and Toxicology*, Vol. 64, 159-170. doi.org/10.1146/annurev-pharmtox-022123-022046.

KÜNSTLICHE GEBÄRMUTTERSYSTEME UND SYNTHETISCHE EMBRYONEN (AKTUALISIERT)



© unsplash.com/85GB photo

ZUSAMMENFASSUNG

Techniken, um die Entwicklung von Embryonen oder Föten (auch des Menschen) außerhalb des Körpers in künstlichen Systemen zu ermöglichen (Ektogenese), haben sich in den letzten Jahren stark weiterentwickelt. Zu diesen Fortschritten kommen jüngste bahnbrechende Experimente zur Erzeugung von Embryonen ohne Ei- oder Samenzellen, sog. „synthetische Embryonen“, sowie deren In-vitro-Kultivierung, um fundamentale Prozesse der (Selbst-)Organisation und Entwicklung von Embryonen entschlüsseln zu können. Solche Embryomodelle werfen bereits heute tiefgreifende rechtliche Fragen auf. Auch kurz- bis mittelfristig dürften es insbesondere die Entwicklungen bei der Erzeugung und Kultivierung von Embryonen sein, die eine gesellschaftliche Diskussion der Chancen sowie ethischer Herausforderungen erfordern, um neues Wissen und mögliche biomedizinische Anwendungen verantwortungsvoll entwickeln und nutzen zu können.

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Forschungsarbeiten mit dem Ziel der Entwicklung von Embryonen oder Föten¹ außerhalb des Körpers – einer sogenannten Ektogenese – haben in den letzten Jahren große Fortschritte gemacht. Aufsehenerregende Ergebnisse solcher Arbeiten wurden an beiden Enden des „Entwicklungsspektrums“ von der Befruchtung bis zur Geburt berichtet.

So zeigte Partridge et al. (2017), dass die Entwicklung von Lammföten, bei denen die Nabelschnur mit einem artifiziellen Kreislaufsystem (künstliche Plazenta) verbunden wurde, in einer sogenannten künstlichen Gebärmutter über mehrere Wochen bis zum Erreichen der Geburtsreife fortgesetzt werden kann. Die künstliche Gebärmutter bestand dabei aus einer Art flüssigkeitsgefülltem Plastikbeutel.² Zuvor konnten Föten in solchen Systemen – an denen in verschiedener Form seit Ende der 1950er-Jahre (zunächst mit menschlichen Föten; Westin, Nyberg, & Enhorning, 1958) gearbeitet wurde – nur Stunden bis wenige Tage überleben. Ursache dafür waren v. a. Probleme (wie Kreislaufversagen) aufgrund der verwendeten künstlichen Plazentasysteme (Bie et al., 2021; Partridge et al., 2017). Die Experimente wurden mit dem Ziel durchgeführt, die Überlebenschancen von extrem Frühgeborenen verbessern bzw. Gesundheitsschäden vermeiden zu können.³ Derzeit haben vor der 22. Schwangerschaftswoche geborene Kinder keine reelle Chance zu überleben. Von der 22. bis zur 25. Woche steigt die Überlebensquote von ca. 24 % auf 76 % an. Das Risiko, schwere gesundheitliche Schäden zurückzubehalten, bleibt jedoch beträchtlich (AWMF, 2020), da die Lungen von extrem Frühgeborenen zu unreif sind, um einen ausreichenden (sowie ohne Schädigung der Lungen durchführbaren) Gasaustausch durch Beatmungsverfahren zu ermöglichen. Dieses Problem scheint über die künstlichen Gebärmuttersysteme lösbar, bei denen die Föten über die Nabelschnur mit Sauerstoff (im Blut) versorgt werden. Entsprechend könnten v. a. extrem frühgeborene Kinder von solchen Systemen profitieren. Darüber hinaus erscheint auch ein gesundheitsökonomischer Nutzen, in Form von Kosteneinsparungen aufgrund geringerer Langzeitbeeinträchtigungen solcher Kinder, möglich. Wann und unter welchen medizin-ethischen bzw. regulatorischen Bedingungen, d. h. in klinischen Studien oder über experimentelle Behandlungen, solche Systeme getestet bzw. (erstmalig) angewendet werden könnten, erscheint derzeit unklar. In beiden Fällen würden (unterschiedlich) strenge Regelungen bzw. ethische Leitlinien greifen (Romanis, 2020). In den USA beschäftigt sich die zuständige Behörde FDA seit kurzem damit, wie mögliche klinische Studien aussehen könnten (Hunter, 2024).

Künstliche Gebärmuttersysteme – mögliche Versorgung von Frühgeborenen

Sozusagen am anderen Ende des Entwicklungsspektrums gab es jüngst eine Reihe bahnbrechender Experimente zur Generierung und Kultivierung von Maus-, Affen- und menschlichen Embryonen in vitro („im Reagenzglas“). Diese zeigen zum

Immer längere Kultivierung von Embryonen in vitro

¹ Embryonen werden ab Ende der 8. Woche nach der Befruchtung als Fötus bezeichnet, einem Zeitpunkt, an dem sich die Organanlagen (zur weiteren Reifung) gebildet haben.

² [youtube.com/watch?v=dt7twXzNEsQ](https://www.youtube.com/watch?v=dt7twXzNEsQ).

³ Ein 5-jähriges Forschungsprojekt in der EU zur Entwicklung von Prototypen für ein künstliches Gebärmuttersystem wurde von 2019 bis 2024 über das Horizon 2020-Programm gefördert; perinatallifesupport.eu/project/. Die Entwicklung wird in dem Startup-Unternehmen AquaWomb fortgeführt; aquawomb.eu.

einen, dass Embryonen über das Stadium hinaus, in dem sie sich in die Gebärmutter einnisten würden (beim Menschen ca. eine Woche nach der Befruchtung), kultiviert werden können. Mausembryonen konnten dabei in einer Nährlösung in rotierenden Glasgefäßen (mit einem speziellen Gasaustauschsystem)⁴ bis zu Stadien kultiviert werden, die solchen nach über der Hälfte der normalen Schwangerschaftszeit (von 19 Tagen) entsprechen und die alle Organe gebildet haben (Aguilera-Castrejon et al., 2021). Beim Menschen scheint die Entwicklung über 14 Tage hinaus durchaus möglich – eine international empfohlene Zeitspanne, die in einigen Länder (z. B. Frankreich, Vereinigtes Königreich) als gesetzliche Grenze zur Kultivierung menschlicher Embryonen für Forschungszwecke gilt⁵ (Powell, 2021, u. Ref. darin). Ab diesem Zeitpunkt bildet der Embryo eine Körperachse sowie unterschiedliche Gewebeschichten, aus denen sich die Organe entwickeln.

Zum anderen wurde gezeigt, dass sog. synthetische Embryonen bzw. Embryomodelle („stem cell-based embryo models“, SCBEMs), die natürlichen Embryonen extrem ähnlich sind, unabhängig von Keimzellen oder befruchteten Eizellen erzeugt werden können. Synthetische Mausembryonen wurden ausgehend von embryonalen Stammzellen, teilweise in Kombination mit anderen Stammzellen (u. a. für die spätere Plazenta), hergestellt und entwickelten sich bis zu Stadien der Organbildung, einschließlich des zentralen Nervensystems (Amadei et al., 2022; Tarazi et al., 2022). Beim Menschen konnten auf diese Weise bisher dem Blastozysten-Stadium (dem Stadium, in dem sich der Embryo in die Gebärmutter einnistet) entsprechende sog. Blastoide (z. B. Kagawa et al., 2022)⁶ sowie Embryomodelle generiert werden, die in vielen Aspekten Embryostadien nach der Gebärmuttereinnistung von bis zu 14 Tage nach der Befruchtung entsprechen (Mallapaty, 2024; Wu & Wang, 2026). Synthetische Affenblastoide wurden in Muttertiere transferiert, stellten die Entwicklung aber nach 20 Tagen ein (Li et al., 2023). In vitro kultivierte Stadien, die denen nach der Einnistung in die Gebärmutter entsprechen, könnten es beispielsweise erlauben, die Ursachen für Schwangerschaftsverluste und angeborene Fehlbildungen zu untersuchen, die häufig in dieser Entwicklungsphase auftreten. Darüber hinaus könnten über synthetische Embryonen die Wirkung von Medikamenten getestet sowie Gewebe oder Organe für Transplantationen erhalten werden. Da synthetische Embryonen ohne Verwendung befruchteter Eizellen erzeugt werden, könnten die Ansätze eine ethisch weniger problematische Alternative zur Forschung mit *natürlichen Embryonen* darstellen. Je weiter sich entsprechende Embryonen entwickeln werden (bis hin zur Entwicklung des Nervensystems), desto stärker dürften sich jedoch auch für diese ethische, und damit verbundene rechtliche und regulatorische, Fragen stellen (z. B. Mallapaty, 2024; Moris et al., 2026; Rivron et al., 2023). Die jüngeren Fortschritte zur Herstellung komplexerer menschlicher synthetischer Embryomodelle

*Embryonen ohne
Befruchtung –
synthetische
Embryomodelle*

⁴ [youtube.com/watch?v=mKh6wYDsTBg](https://www.youtube.com/watch?v=mKh6wYDsTBg). Die Sauerstoff- und Nährstoffversorgung kann aufgrund der kleinen Dimensionen der Embryonalstadien (einige Millimeter) rein über Diffusionsprozesse erfolgen.

⁵ Die Internationale Gesellschaft für Stammzellenforschung (ISSCR) hat im Mai 2021 die sog. 14-Tage-Regel gelockert. Vorhaben, um Embryonen über 14 Tage hinaus zu kultivieren, sollen von Fall zu Fall, unter Berücksichtigung nationaler Regulierungen, geprüft werden können.

⁶ Die Erzeugung der Blastoide durch Kagawa et al. (2022) erfolgte am Institut für Molekulare Biotechnologie in Wien und wurde von der Kommission für Wissenschaftsethik der ÖAW genehmigt.

hat die Internationale Gesellschaft für Stammzellenforschung (ISSCR) im August 2025 dazu veranlasst, ihre Leitlinien für menschliche SCBEMs anzupassen (Clark et al., 2025; ISSCR, 2025). So sollen nun Arbeiten mit allen Arten solcher Modelle eine klare wissenschaftliche Begründung haben, einen definierten zeitlichen Endpunkt aufweisen und einem angemessenen, kontinuierlichen Aufsichtsmechanismus hinsichtlich wissenschaftlicher und ethischer Fragen unterliegen (z.B. in Form institutioneller oder nationaler Gremien). Kein Modell soll in die Gebärmutter eines lebenden Tieres oder Menschen transplantiert werden dürfen und die Kultivierung in künstlichen In-vitro-Systemen bis zum Punkt der potenziellen Lebensfähigkeit – eine Ektogenese – soll verboten sein.

Obwohl somit zunehmend längere Abschnitte des vorgeburtlichen Entwicklungsspektrums außerhalb des Körpers stattfinden können, gilt eine komplette Ektogenese (für die kleine und sich sehr schnell entwickelnde Entwicklungsstadien mit künstlichen Plazentasystemen verbunden werden müssten) unter Expert:innen auf absehbare Zeit als unrealistisch (z. B. Bie et al., 2022, u. Ref. darin). Mit der kompletten Ektogenese verbunden ist die Vision von der Fortpflanzung ohne Schwangerschaft. Entsprechend dürften breitere soziale Implikationen, die in Zusammenhang damit diskutiert werden, wie insbesondere in Bezug auf reproduktive und darauf aufbauende soziale Ungleichheiten von Frauen sowie den Zugang zu solchen Technologien (z. B. Bie et al., 2022, Bie et al., 2026), auf längere Zeit kaum relevant werden.

*Vollständige
Ektogenese – derzeit
nur eine Vision*

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Eine vollständige Ektogenese dürfte für lange Zeit eine Vision bleiben und so auf absehbare Zeit keinen politischen Handlungsbedarf erfordern. Mögliche künstliche Gebärmutterssysteme könnten in näherer Zukunft in der Klinik zur Versorgung von extrem Frühgeborenen getestet werden. Jedoch wäre dies nur unter strengen bestehenden Regelungen wahrscheinlich und dürfte zu keinen wirklich neuen ethischen oder rechtlichen Herausforderungen führen (vgl. Hunter, 2024; Wozniak, Fernandes & Kukora, 2025). Dagegen ergeben sich solche Herausforderungen aus den rasanten Entwicklungen und Fortschritten in der Generierung und In-vitro-Kultivierung synthetischer menschlicher Embryomodelle (Clark et al., 2025; Moris et al., 2026; Rivron et al., 2023). Bereits heute absehbar sind insbesondere mögliche Implikationen für den Gültigkeitsbereich des österreichischen Fortpflanzungsmedizingesetzes, das synthetische Embryomodelle bzw. Embryonen nicht erfasst und deren Rechtsstatus unklar lässt (z. B. Körtner, 2022). Darüber hinaus stellt sich als wichtige gesellschaftliche Herausforderung die Frage, welchen ethischen Status mögliche synthetische Embryomodelle (mit potenziell weitreichenderen Entwicklungspotenzialen als bisher oder auch solche, die nur bestimmte Organe entwickeln könnten) haben sollten – und wie ihre Verwendung für Forschungszwecke und Anwendungen, wie die Generierung von Organen oder ggf. in der Reproduktionsmedizin, reguliert werden könnten bzw. sollten. Die Schaffung entsprechender ethisch-rechtlicher Sicherheit sowie von öffentlichem Vertrauen wäre nicht zuletzt auch relevant mit Blick auf das vorhandene Potenzial Österreichs – mit Spitzenforschung in diesem Bereich sowie dem Enga-

*Herausforderungen
und Chancen durch
synthetische
Embryomodelle*

gement führender pharmazeutischer Unternehmen im Land – Erkenntnisse aus solcher Forschung in biomedizinische Anwendungen mit gesellschaftlichem Nutzen umsetzen zu können.

VORSCHLAG FÜR DAS WEITERE VORGEHEN

Die Klärung aktueller und möglicher zukünftiger rechtlicher Implikationen dürfte insbesondere den Austausch zwischen Rechtsexpert:innen und dem Parlament erfordern, um einen gesetzgeberischen Handlungsbedarf zu eruieren. Darüber hinaus könnte zur ethischen Einordnung möglicher synthetischer Embryomodelle und Fragen zu Bedingungen ihrer zukünftigen Nutzung für die Forschung und potenzielle Anwendungen ein gesellschaftlicher Dialogprozess unter Beteiligung der Öffentlichkeit initiiert werden. Dieser sollte zum einen gegenseitige Lernprozesse – insbesondere in Bezug auf unterschiedliche Werte, Perspektiven oder Interessen – ermöglichen, indem möglichst viele relevante Akteure aus Bereichen wie Wissenschaft, Medizin und Ethik, Behörden und Politik sowie zivilgesellschaftliche Organisationen und die allgemeine Öffentlichkeit involviert werden. Zum anderen könnten Ergebnisse regelmäßig an das Parlament zurückgespielt werden. Ein solcher Prozess sollte idealerweise über vereinzelte Veranstaltungen, z. B. im Rahmen verschiedener Forschungsprojekte, hinausgehen können und national (ggf. unter der Schirmherrschaft des Parlaments) initiiert und organisiert werden.

*Klärung rechtlicher
Fragen und nationaler
Dialogprozess*

ZITIERTE LITERATUR

- Aguilera-Castrejon, A. et al. (2021). Ex utero mouse embryogenesis from pre-gastrulation to late organogenesis. *Nature*, 593, 119-124.
doi.org/10.1038/s41586-021-03416-3.
- Amadei, G., et al. (2022). Embryo model completes gastrulation to neurulation and organogenesis. *Nature*, 610(7930), 143–153.
doi.org/10.1038/s41586-022-05246-3.
- AWMF (2020). *Frühgeborene an der Grenze der Lebensfähigkeit*. AWMF-Leitlinien-Register Nr. 024/019. Arbeitsgemeinschaft der Wissenschaftlichen Medizinischen Fachgesellschaften e. V. register.awmf.org/assets/guidelines/024-019_S2k_Frühgeburt_Grenze_Lebensfähigkeit_2021-01.pdf.
- Bie, F. R. de, et al. (2021). Artificial placenta and womb technology: Past, current, and future challenges towards clinical translation. *Prenatal Diagnosis*, 41(1), 145–158. doi.org/10.1002/pd.5821.
- Bie, F. R. de, et al. (2022). Ethics Considerations Regarding Artificial Womb Technology for the Fetotate. *The American Journal of Bioethics: AJOB*, 1–12.
doi.org/10.1080/15265161.2022.2048738.
- Bie, F. R., et al. (2026). Artificial womb technology; a scoping review of ethical considerations. *Journal of Perinatology*,
doi.org/10.1038/s41372-026-02657-2.
- Clark, A. T., et al. (2025). Stem cell-based embryo models: The 2021 ISSCR stem cell guidelines revisited. *Stem Cell Reports*, 20(6), 102514.
doi.org/10.1016/j.stemcr.2025.102514.

- Hunter P. (2024). Exogestation for treating premature births and congenital diseases: Artificial womb technology edges towards first trials in humans. *EMBO Rep.*, 25(1),17-20. doi.org/10.1038/s44319-023-00022-4.
- ISSCR (2025). Guidelines for Stem Cell Research and Clinical Translation. Version 1. 2 August. [isscr.org/guidelines](https://www.isscr.org/guidelines).
- Kagawa, H., et al. (2022). Human blastoids model blastocyst development and implantation. *Nature*, 601(7894), 600–605. doi.org/10.1038/s41586-021-04267-8.
- Körtner, U. H. (2022). Synthetische Embryonen. Ungeklärter Rechtsstatus. Österreichischer Rundfunk (ORF), 26. August 2022. [science.orf.at/stories/3214803/](https://www.science.orf.at/stories/3214803/).
- Li, J., et al. (2023). Cynomolgus monkey embryo model captures gastrulation and early pregnancy. *Cell Stem Cell*, 30(4), 362-377.e7. doi.org/10.1016/j.stem.2023.03.009.
- Mallapaty S. (2024). Human embryo models are getting more realistic – raising ethical questions. *Nature*, 633 (8029), 268-271. doi.org/10.1038/d41586-024-02915-3.
- Moris, N., et al. (2026). Morally relevant features warranting ethical oversight in human stem cell-based embryo models. *Nature Cell Biology*, 28, 659–664. doi.org/10.1038/s41556-026-01881-4.
- Partridge, E. A., et al. (2017). An extra-uterine system to physiologically support the extreme premature lamb. *Nature Communications*, 8(1), 15112. doi.org/10.1038/ncomms15112.
- Powell, K. (2021). What’s next for lab-grown human embryos? *Nature*, 597(7874), 22–24. doi.org/10.1038/d41586-021-02343-7.
- Rivron, N.C. et al. (2023) An Ethical Framework for Human Embryology with Embryo Models, *Cell* 186(17), 3548, [cell.com/cell/fulltext/S0092-8674\(23\)00807-3?dgcid=raven_jbs_etoc_email](https://www.cell.com/cell/fulltext/S0092-8674(23)00807-3?dgcid=raven_jbs_etoc_email).
- Romanis, E. C. (2020). Artificial womb technology and clinical translation: Innovative treatment or medical research? *Bioethics*, 34(4), 392–402. doi.org/10.1111/bioe.12701.
- Tarazi, S., et al. (2022). Post-gastrulation synthetic embryos generated ex utero from mouse naive ESCs. *Cell*, 185(18), 3290-3306.e25. doi.org/10.1016/j.cell.2022.07.028.
- Westin, B., Nyberg, R., & Enhörning, G. (1958). A technique for perfusion of the pre-viable human fetus. *Acta Paediatrica*, 47(4), 339–349. doi.org/10.1111/j.1651-2227.1958.tb07643.x.
- Wozniak, P.S., Fernandes, A.K. & Kukora, S.K. (2025). Defining the threshold of birth: ethical introduction of artificial placenta and artificial womb technology in the neonatal intensive care unit. *Journal of Perinatology*, doi.org/10.1038/s41372-025-02456-1.
- Wu, H. & Wang, H. (2026). Progress in stem cell-based embryo models and their applications in developmental biology and biomedicine. *Nature Reviews Molecular Cell Biology*, 27, 178–193. doi.org/10.1038/s41580-025-00942-0.

MEDIKAMENTE GEGEN ÜBERGEWICHT (AKTUALISIERT)



© unsplash.com/Dennis Klicker

ZUSAMMENFASSUNG

Übergewicht ist ein ernsthaftes, weltweites Gesundheitsproblem, das Diabetes, Herz-Kreislauf-Erkrankungen und Krebs verursachen kann. Bis 2035 könnten über 4 Milliarden Menschen von Übergewicht betroffen sein. Seit einigen Jahren gibt es eine ernstzunehmende pharmazeutische Behandlung mit Wirkstoffen wie Semaglutid und Tirzepatid (EU 2023/24), die als Meilenstein im Kampf gegen Adipositas gilt. Langzeitstudien zeigen, dass das Gewicht nach Absetzen meist wieder zunimmt, was eine dauerhafte Einnahme notwendig macht. Neben den Fragen zur Sicherheit und Wirksamkeit wirft der Gebrauch der Medikamente auch tiefgreifende Fragen zu den gesellschaftlichen Konsequenzen medikamentöser Behandlungsoptionen auf, die eine breite Diskussion der Chancen, der sozialen und ethischen Herausforderungen sowie möglicher Risiken erfordern. Hierbei sollten die sozio-ökonomischen und kulturellen Faktoren von Übergewicht nicht aus dem Auge verloren werden.

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Übergewicht betrifft einen großen Teil der Weltbevölkerung. Die World Obesity Federation (WOF) schätzt, dass bis 2035 mehr als 4 Milliarden Menschen betroffen sein könnten (2020: 2,6 Milliarden) (WOF 2023). Besonders bei Kindern und Jugendlichen wird ein starker Anstieg erwartet (WOF 2023). Darüber hinaus wird die Prävalenz von Übergewicht und Adipositas¹ sowohl in den Industrie- als auch in den Entwicklungsländern weiter ansteigen (WHO 2021). Übergewicht wird mit einer Reihe schwerwiegender Gesundheitsprobleme in Verbindung gebracht, darunter z. B. ein erhöhtes Risiko für Schlaganfälle, Herzinfarkte, Krebs und Typ-2-Diabetes. Neben gesundheitlichen Folgen entstehen auch erhebliche wirtschaftliche Konsequenzen sowohl für den Einzelnen als auch für die Gesellschaft: die weltweiten wirtschaftlichen Auswirkungen² beliefen sich im Jahr 2020 auf 1,96 Billionen US-Dollar, die bis 2035 auf über 4 Billionen US-Dollar im Jahr 2035 steigen könnten (Okunogbe et al. 2022; 2021; zitiert nach WOF 2023).

Übergewicht hat vielfältige Ursachen (siehe hierzu z. B. NIH 2021), darunter Genetik, Lebensstil und sozioökonomische Faktoren. So zeigen bspw. Studien, dass Menschen mit geringem Einkommen häufiger betroffen sind (vgl. neben anderen WOF 2023; McLaren 2007). Eine Rolle spielt auch das Lebensmittelmarketing, da (eher) ungesunde/verarbeitete Lebensmittel beworben werden (vgl. Chester, Montgomery & Kopp 2021). Auch staatliche Maßnahmen beeinflussen die Verfügbarkeit und Erschwinglichkeit gesunder Lebensmittel (z. B. Subventionen für ungesunde Lebensmittel vs. Förderung der lokalen Landwirtschaft) (u. a. Hawkes et al. 2012). Die Bekämpfung von Übergewicht erfordert daher einen vielschichtigen Ansatz, der öffentliche Gesundheitsmaßnahmen, politische Veränderungen und Maßnahmen auf individueller Ebene umfasst. Lange beschränkte sich die medizinische Behandlung rein auf Diäten, in schweren Fällen auf Magenverkleinerungen. Zudem wurden verschreibungspflichtige Medikamente zugelassen (wie z. B. Appetitzügler mit Amphetaminen oder sog. Lipasehemmer; vgl. u. a. Schäffler & Raether-Buscham 2020; Wirth et al. 2017; Lenzen-Schulte 2016), deren Wirksamkeit jedoch umstritten ist und die teilweise aufgrund von Nebenwirkungen wieder vom Markt genommen wurden. Inzwischen hat sich jedoch der Wirkstoff Semaglutid als pharmazeutische Behandlungsoption etabliert (vgl. u. a. Spektrum 2022). Ursprünglich für die Behandlung von Typ-2-Diabetes entwickelt, erhöhen sog. Glucagon-like peptide-1 (GLP-1) Agonisten³ die Insulinproduktion und wirken auf den Fettstoffwechsel sowie das Sättigungsgefühl, was zu einer starken Gewichtsreduktion führen kann. Studien zeigen bspw. mittlere Gewichtsverluste von bis zu 17 % innerhalb von rund 68 Wochen (Wilding et al. 2021). Neuere Studien deuten zudem auf kardiovaskuläre Vorteile hin, da Sema-

*Übergewicht –
ein ernstes
Gesundheitsproblem
weltweit*

*Komplexe Ursachen –
vielschichtiger Ansatz
erforderlich*

¹ Menschen gelten im Allgemeinen ab einem Body-Mass-Index (BMI) $\geq 25 \text{ kg/m}^2$ als übergewichtig und ab einem Body-Max-Index $\geq 30 \text{ kg/m}^2$ als adipös, wobei der BMI aus Körpergewicht/Körpergröße² berechnet wird. Um zu einer genauen Beurteilung zu kommen, ist der individuelle Körperaufbau (Verhältnis Muskelmasse/Fettmasse) zu berücksichtigen, sowie Alter und Geschlecht.

² Die wirtschaftlichen Auswirkungen umfassen sowohl die Gesundheitskosten für die Behandlung von Übergewicht und Adipositas und deren Folgen als auch die Auswirkungen eines hohen BMI auf die wirtschaftliche Produktivität, wobei ein hoher BMI zu Fehlzeiten, Präsentismus (verringerte Produktivität während der Arbeit) und vorzeitigem Ruhestand oder Tod führen kann.

³ Die Wirkstoffe ahmen das Darmhormon GLP-1 nach.

glutid das Risiko für Herzinfarkte und Schlaganfälle um 20 % senken kann, unabhängig vom Gewichtsverlust (Price 2024). Mit Tirzepatid (Mounjaro) ist seit Dezember 2023 neben Semaglutid und dem älteren Liraglutid ein weiterer Wirkstoff in der EU für das Gewichtsmanagement zugelassen, der als dualer GLP-1/ GIP-Agonist in Studien Gewichtsreduktionen von bis zu 21 % erzielte (Lenharo 2024; 2023; Wadden et al. 2023). Tirzepatid zeigt außerdem positive Effekte bei Schlafapnoe und es scheint chronische Nierenerkrankungen zu reduzieren; in den USA wurde es dafür 2024 eigens zugelassen, während die EMA diese Indikation als durch die bestehende Adipositas-Zulassung abgedeckt betrachtet.⁴

In den USA wurde Wegovy (Wirkstoff Semaglutide) 2021 von der Food and Drug Administration (FDA) für das Gewichtsmanagement bei Erwachsenen mit Übergewicht oder Adipositas und mindestens einer gewichtsbedingten Erkrankung (wie Bluthochdruck, Diabetes Typ 2 oder hoher Cholesterinspiegel) zugelassen (FDA 2021), 2023 dann auch für 12-18-Jährige ab einem bestimmten BMI.⁵ Eine Zulassung für Kinder ab 6 Jahren wird derzeit diskutiert (Lischka et al. 2025). Auch in der EU sind beide Wirkstoffe inzwischen zugelassen – trotz einiger Nebenwirkungen, wie Erbrechen und Durchfall. Langzeitdaten über drei bis vier Jahre liegen nun vor, zeigen aber, dass das Gewicht nach Absetzen in der Regel wieder zunimmt („Rebound-Effekt“), was eine dauerhafte Einnahme erforderlich macht. Tierversuche deuten sogar auf ein erhöhtes Risiko für Schilddrüsenkrebs hin (Lenharo 2024; Medline Plus 2023).

Die Kosten von rund 250 bis 300 Euro pro Monat für Wegovy (Semaglutid) oder Mounjaro (Tirzepatid),⁶ die seit September 2025 auch in Österreich regulär erhältlich sind, werden nur bei medizinischer Indikation erstattet⁷. In Österreich übernimmt die Sozialversicherung die Kosten bislang nur in eng begrenzten Ausnahmefällen. In Deutschland wurde 2024 eine Erstattung durch die gesetzliche Krankenversicherung eingeführt, allerdings nur bei Adipositas mit ernsthaftem kardiovaskulärem Risiko.⁸ Damit ergeben sich Fragen zur Verteilungs- und Zugangsgerechtigkeit, da Essstörungen und Übergewicht stark von psychischen Faktoren und subjektiven Körperwahrnehmungen abhängen. Zudem besteht die Gefahr, dass durch die breite Verfügbarkeit von Medikamenten der gesellschaftliche Druck, einem Schönheitsideal zu entsprechen, zunehmen und übergewichtige Menschen noch mehr stigmatisiert werden könnten (vgl. u. a. Phelan et al. 2015). In Großbritannien wird bspw. diskutiert, „übergewichtigen Arbeitslosen Abnehmspritzen“ zu verschreiben, um deren Chancen auf dem Arbeitsmarkt zu verbessern.⁹

Darauf deutet auch der Umstand hin, dass GLP-1-Agonisten neben der regulierten Anwendung im medizinischen Kontext zunehmend auch von normalgewichtigen und untergewichtigen Menschen (mit Essstörungen) genutzt werden, um

*Neue pharmazeutische
Behandlungsmöglichkeit von
Übergewicht*

*Gesellschaftliche
Konsequenzen unklar*

*Ein Medikament wird
Life-Style-Produkt*

⁴ economist.com/briefing/2024/10/24/glp-1s-like-ozempic-are-among-the-most-important-drug-breakthroughs-ever.

⁵ diatribe.org/fda-approves-weight-loss-drug-wegovy-teens.

⁶ de.euronews.com/my-europe/2025/06/04/die-schlankheitsspritze-welchen-preiszahlen-die-europaer-fur-einen-traumkorper.

⁷ derstandard.at/story/3000000285745/populaere-abnehmspritze-wegovy-nun-auch-in-oesterreich-verfuegbar.

⁸ g-ba.de/downloads/39-261-6513/2024-03-21_AM-RL-II_Semaglutid_BAnz.pdf.

⁹ spiegel.de/ausland/grossbritannien-abnehmspritze-fuer-arbeitslose-regierung-will-nhs-entlasten-a-f226bcb1-6cb1-4fb5-9098-6c674f79aed2.

noch schlanker zu werden.¹⁰ So gibt es einen regelrechten Hype um die „Abnehmspritze“.¹¹ In den sozialen Medien werden Erfolgsgeschichten geteilt und Nebenwirkungen beklagt. In einigen Ländern hat der Off-Label Gebrauch, also die Anwendung ohne Zulassung, dazu geführt, dass Diabetiker:innen kaum mehr ausreichend versorgt werden.¹² Außerdem wird offenbar in den USA nicht systematisch kontrolliert, ob Zugangskriterien wie ein bestimmter BMI erfüllt sind. Daher prüfen Arzneimittelaufsichtsbehörden in verschiedenen Ländern nun strengere Vorschriften (Price 2024). Zudem gibt es viele Internet Fakeshops, die gefälschte Schlankheitsmittel illegal anbieten.¹³

Generell zu beachten ist, dass diese Medikamente ‚nur‘ die körperlichen Symptome von Übergewicht, nicht jedoch die Ursachen angehen, die oft auch gesellschaftlich bedingt sind. Daher besteht die Gefahr, dass durch die verstärkte medikamentöse Behandlung sozioökonomische und kulturelle Faktoren sowie die Prävention aus dem Blick geraten. Zu debattieren wären also auch der gesellschaftliche Umgang mit Übergewicht, die normierende Wirkung von Körperbildern und Kennziffern wie der BMI („The Bizarre and Racist History of the BMI“¹⁴) sowie die medizinische Definition von Übergewicht und Adipositas (vgl. u. a. BMJ 2006).

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Übergewicht ist auch in Österreich ein Problem für die öffentliche Gesundheit. 2019 waren rund 3,8 Mio. Personen ab 15 Jahren von Übergewicht betroffen. 16,6 % der Bevölkerung wiesen eine Adipositas auf (BMSGPK 2020). *So stieg der altersstandardisierte Anteil an Übergewichtigen und Adipösen von 48,7 % in den Jahren 2006/07 auf 50,8 % in 2019* (ebd). Eine aktuelle Studie des IHS zeigt, dass über 8 % aller Todesfälle unter 85 Jahren in Österreich auf Adipositas zurückzuführen sind, Tendenz steigend.¹⁵ Daher werden in Österreich neben einem Aktionsplan gegen Übergewicht, Adipositas und Essstörungen bei Kindern und Jugendlichen¹⁶ auch Medikamente zur Bekämpfung von Übergewicht diskutiert. Ein 2023 veröffentlichtes Konsensuspapier der Österreichischen Adipositas Gesellschaft betont bspw. die medikamentöse Therapie als wichtigen Bestandteil der Adipositasbehandlung (Itariu 2023; Brix et al. 2023). Das Österreichische Parlament könnte sich mit Fragen der Sicherheit und Wirksamkeit sowie Zugangsgerechtigkeit befassen. Zudem sollten Rahmenbedingungen für eine systematische Analyse der Risiken

*Herausforderungen
und Chancen durch
Medikamente gegen
Übergewicht*

¹⁰ Diätmedikamente werden aber auch auf ihre Anti-Aging-Wirkung untersucht (parlament.gv.at/dokument/fachinfos/zukunftsthemen/123_laenger_leben.pdf).

¹¹ derstandard.at/story/2000144566185/fachleute-lobten-abnehmspritze-und-verschwiegen-bezahlung-vom-hersteller.

¹² tagesspiegel.de/gesellschaft/schlank-per-spritze-was-den-hype-um-das-medikament-ozempic-gefahrllich-macht-9627842.html und tagesschau.de/ausland/ozempic-101.html.

¹³ onlinesicherheit.gv.at/Services/News/Vorsicht-vor-Fake-Shops-mit-Schlankheitsmitteln.html.

¹⁴ elemental.medium.com/the-bizarre-and-racist-history-of-the-bmi-7d8dc2aa33bb.

¹⁵ ihs.ac.at/de/news-and-events/media/press-releases/adipositas-verursacht-bereits-8-aller-todesfaelle-in-oesterreich-tendenz-steigend/.

¹⁶ parlament.gv.at/aktuelles/pk/jahr_2022/pk0316.

und ethischen, sozialen und rechtlichen Fragen geschaffen werden. Entscheidend ist hierbei auch eine Auseinandersetzung mit den sozio-ökonomischen und kulturellen Dimensionen der Übergewichtsproblematik. Ebenso sollten Rechtsvorschriften oder politische Maßnahmen für einen uneingeschränkten Zugang zu Gesundheitsinformationen und -ressourcen sowie zur Förderung einer gesunden Lebensweise in Betracht gezogen werden. Maßnahmen zu Lebensstil- und Verhaltensinterventionen (z. B. mehr körperliche Aktivität, Änderung von Ernährungsgewohnheiten, Psychotherapie) sowie die Kontrolle des Lebensmittelangebots und der Lebensmittelvermarktung sowie die Verbesserung des öffentlichen Bewusstseins für die Risiken von Übergewicht sollten nicht aus den Augen verloren werden.

VORSCHLAG FÜR DAS WEITERE VORGEHEN

Die Bekämpfung von Übergewicht ist ein komplexes globales Problem, das die Zusammenarbeit vieler unterschiedlicher Akteure und Sektoren (Öffentlichkeit, Forschung, Gesundheitsberufe, Politik, pharmazeutische Industrie etc.) erfordert. Die Technikfolgenabschätzung kann im Rahmen von inter- und transdisziplinären Prozessen alle relevanten Akteure beteiligen und die öffentliche Aufmerksamkeit auf das Problemfeld von Übergewicht, sowie die Chancen, aber auch mögliche Konsequenzen eines Einsatzes von Medikamenten richten. Dabei würden ein ausführlicher Bericht zum Forschungs- und Entwicklungsstand sowie zu Herausforderungen und Forschungsbedarf und eine Risikoanalyse zu aktuellen Entwicklungen unter Einbindung von Expert:innen und Stakeholdern einen wichtigen Beitrag zur gesellschaftspolitischen Debatte leisten.

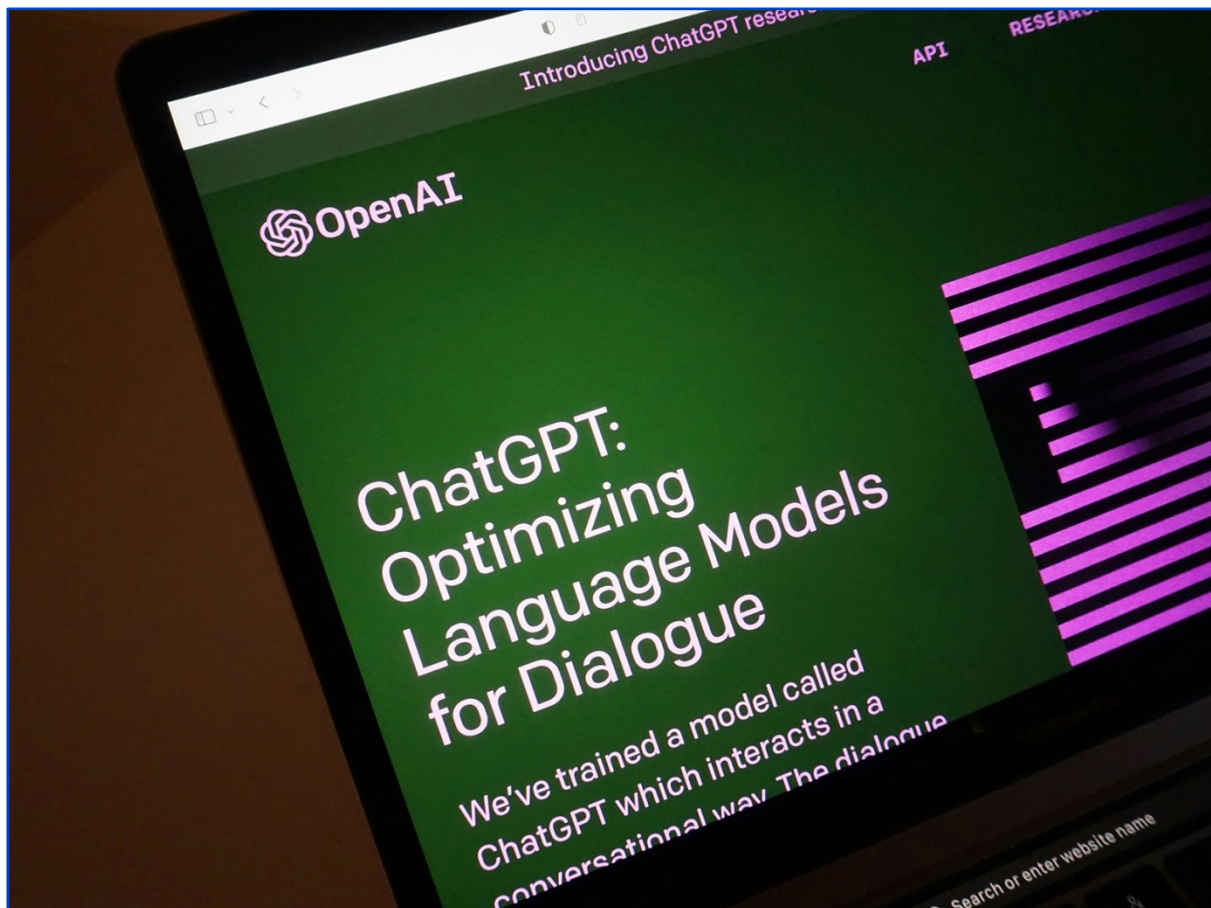
Inter- und transdisziplinäre Auseinandersetzung mit offenen Fragen

ZITIERTE LITERATUR

- BMJ (2006). Obesity task force linked to WHO takes „millions“ from drug firms. News 15. Juni 2006, 332, 1412. [bmj.com/content/332/7555/1412.2](https://www.bmj.com/content/332/7555/1412.2).
- Brix, J.M., et al. (2023). Übergewicht und Adipositas bei Erwachsenen: allgemeine Behandlungsgrundsätze und konservatives Management. *Wien Klin Wochenschr* 135 (Suppl 6), 706–720.
- Bundesministerium für Soziales, Gesundheit, Pflege und Konsumentenschutz (2020). Österreichische Gesundheitsbefragung 2019. Hauptergebnisse des Austrian Health Interview Survey und methodische Dokumentation. statistik.at/fileadmin/publications/Oesterreichische-Gesundheitsbefragung2019_Hauptergebnisse.pdf.
- Chester, J., Montgomery, K.C., Kopp, K. (2021). Big Food, Big Tech, and the Global Childhood Obesity Pandemic. Executive Summary. Center for Digital Democracy.
- Delcan, P. (2023). A new class of drugs for weight loss could end obesity. The Economist. 02.03.2023. [economist.com/briefing/2023/03/02/a-new-class-of-drugs-for-weight-loss-could-end-obesity](https://www.economist.com/briefing/2023/03/02/a-new-class-of-drugs-for-weight-loss-could-end-obesity).
- FDA (US Food and Drug Administration) (2021). FDA Approves New Drug Treatment for Chronic Weight Management, First Since 2014. Press Announcement. [web.archive.org/web/20210604203251/fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-new-drug-treatment-chronic-weight-management-first-2014](https://www.web.archive.org/web/20210604203251/fda.gov/news-events/press-announcements/fda-approves-new-drug-treatment-chronic-weight-management-first-2014).

- Hawkes, C., et al. (2012). Linking agricultural policies with obesity and noncommunicable diseases: A new perspective for a globalising world, *Food Policy*, 37(3), 343-353.
- Itariu, B.K. (2023). Konsensuspapier der Österreichischen Adipositasgesellschaft zur Diagnose und Behandlung von Menschen mit Adipositas. *Wien Klin Wochenschr*, 135 (Suppl 6), 705.
- Lenharo, M. (2024). Why do obesity drugs seem to treat so many other ailments. *Nature*. 633, 858-760.
- Lenharo, M. (2023). What Scientists are learning about potent new obesity drugs. *Nature*. 618, 17+18.
- Lenzen-Schulte, M. (2016). Appetitzügler: Die „magic bullet“ zum Abnehmen ist immer noch Utopie. *Deutsches Ärzteblatt*, 113(43): A-1922/B-1619/C-1607.
- Lischka, J., Torbahn, G., Mörwald, K. et al. (2025). Medikamentöse Therapie der Adipositas bei Kindern und Jugendlichen. *Monatsschrift Kinderheilkunde*, 173, 396–402. doi.org/10.1007/s00112-025-02149-1.
- McLaren, L. (2007). Socioeconomic status and obesity. *Epidemiologic Reviews*, 29, 29-48.
- MedlinePlus (2023). Semaglutide Injection. Artikel vom 15.02.2023. MedlinePlus is a service of the National Library of Medicine (NLM), the world's largest medical library. medlineplus.gov/druginfo/meds/a618008.html.
- NIH (National Institutes of Health) (2021). What causes obesity & overweight? nichd.nih.gov/health/topics/obesity/conditioninfo/cause.
- Okunogbe, A., et al. (2022). Economic impacts of overweight and obesity: current and future estimates for 161 countries. *BMJ Global Health*, 7(9), e009773.
- Okunogbe, A., et al. (2021). Economic impacts of overweight and obesity: current and future estimates for eight countries. *BMJ Global Health*, 6(10), e006351.
- Phelan, S.M., et al. (2015). Impact of weight bias and stigma on quality of care and outcomes for patients with obesity. *Obesity Reviews*, 16(4), 319-326.
- Price, K. (2024). 'Beyond weight loss': what is the future of semaglutide? *The Pharmaceutical Journal*, 312(7986), 312.
- Schäffler, A., Raether-Buscham, K. (2020). Rezeptpflichtige Medikamente zur Gewichtsreduktion. apotheken.de/krankheiten/hintergrundwissen/12564-rezeptpflichtige-medikamente-zur-gewichtsreduktion.
- Stöckl, D., Horvath, K., & Rieder, A. (2019). Obesity and its impact on healthcare utilization and costs in Austria. *Obesity facts*, 12(1), 71-80.
- WHO (World Health Organization) (2021). Obesity and overweight. Fact Sheets. who.int/news-room/fact-sheets/detail/obesity-and-overweight.
- Wadden, T.A. et al. (2023). Tirzepatide after intensive lifestyle intervention in adults with overweight or obesity: the SURMOUNT-3 phase 3 trial. *Nat Med* 29, 2909–2918.
- Wilding, JPH., Batterham, RL, Calanna, S., Davies, M., et al. (2021). Once-Weekly Semaglutide in Adults with Overweight or Obesity. *New England Journal of Medicine*, 384:989-1002.
- Wirth, A., Krause, J., Riedel, O., & Schmidtmann, M. (2017). Appetitzügler – Medikamente zur Behandlung von Übergewicht und Adipositas. *Deutsches Ärzteblatt*, 114(21), 375-382.
- WOF (World Obesity Federation) (2023). World Obesity Atlas. data.worldobesity.org/publications/?cat=19.

GENERATIVE KI UND DEMOKRATIE (AKTUALISIERT)



© unsplash.com/Rolf van Root

ZUSAMMENFASSUNG

Seit ChatGPT im November 2022 veröffentlicht wurde, sorgen Systeme generativer Künstlicher Intelligenz (genKI) für Aufsehen und alte Träume. Hoffnungen und Ängste in Bezug auf die Leistungsfähigkeit von KI werden ebenso angefacht wie ganz konkrete Befürchtungen zu den Auswirkungen auf demokratische Gesellschaften und den Arbeitsmarkt. GenKI verspricht enorme Arbeitserleichterungen, Produktivitätsgewinne und uneingeschränkten Zugang zu Informationen. Bei genauerer Betrachtung offenbaren sich jedoch viele, nach wie vor ungelöste, Schwierigkeiten. Zusätzlich bergen generative KI-Systeme das Risiko, zu großen Sicherheitsproblemen zu führen, da genKI-Systeme bspw. auch genutzt werden, um im großen Maßstab Sicherheitslücken zu finden und passenden Schadcode zu schreiben oder auf Millionen Bürgerinnen und Bürger individuell zugeschnittene Betrugsversuche zu starten.

*Generative KI –
Herausforderung
für die Gesellschaft,
große Hoffnungen*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Vom sog. „Schachtürken“ 1769 über Joseph Weizenbaums Programm ELIZA 1966 war die Idee denkender, intelligenter Maschinen sowohl mit hohen Erwartungen, aber auch mit bedrohlichen Szenarien verbunden. Es ging oft darum, den Menschen mächtiger zu machen, seine „Makel“ auszugleichen, bis hin zu seiner Rettung, wenn wir uns aktuelle Vorstellungen davon ansehen, wie KI-Systeme uns von den Folgen des Klimawandels befreien sollen.¹

Eng verbunden mit den Überlegungen zur Nützlichkeit denkender Systeme ist die Frage nach dem Vertrauen. Sollen wir Maschinen vertrauen, wenn es um lebenswichtige Entscheidungen geht? Besonders Rechenmaschinen und Computern, wird unterstellt, dass sie nicht irren, somit ihre Ergebnisse zweifelsfrei richtig und – übertragen auf KI-Systeme – auch ihre Entscheidungen richtig seien (Kate Goddard 2014). Das liegt einerseits daran, dass sie auf mathematischen Prinzipien basieren, denen die Eigenschaften Korrektheit und Präzision anhaften. Andererseits liegt es daran, dass Menschen zu wenig nachvollziehen können, wie diese Systeme funktionieren, und deshalb vielleicht vertrauen, wo kein Vertrauen angebracht ist. Zugleich neigen Menschen dazu, in Technik menschliche Wesenszüge zu erkennen, was eng mit dem Verständnis für die Mechanismen von KI zusammenhängt (Mara et al., 2026). Dazu muss man sich auch vor Augen halten, dass diese Systeme von Menschen entworfen und gebaut werden und mit Daten trainiert werden, die nicht neutral sind – oft etwa *primär vor dem Hintergrund des englischen Sprachraums*. Wir wissen heute, dass Technik allgemein nicht neutral ist. Sie trägt die Werte und Wertvorstellungen ihrer Entwicklerinnen und Entwickler in sich. Diese Erkenntnis ist ganz besonders dann relevant, wenn es um Automation und KI geht. Diese Systeme reproduzieren die (diskriminierenden) Strukturen, von denen sie (selbst wieder) lernen.

Es gibt auch warnende Stimmen, die davon ausgehen, dass eine lernende, sich selbst optimierende Maschine, in weiterer Folge mit eigenem Bewusstsein, die Entwicklung der Intelligenz und denkender Maschinen derart beschleunigen würde, dass der Mensch in so einer Welt keinen Platz mehr hätte. Maschinen würden Menschen in allen Belangen übertrumpfen und *sukzessive ersetzen*. Diesen Punkt, an dem die Maschinen in allem weitaus besser wären als der Mensch, wird auch als „technische Singularität“ bezeichnet (Kurzweil 2005; Bostrom 2016). Insbesondere das Aufkommen von *KI-Agenten*, prominent etwa das von einem Österreicher entwickelte OpenClaw,² nährt diese Sorgen ebenso wie die extremen Sicherheitsrisiken, die mit den neuen Modellen einhergehen.

Die KI-Systeme, die seit der Vorstellung von ChatGPT Ende 2022 Menschen auf der ganzen Welt faszinieren, sind sog. genKI-Systeme, die über Texteingaben weitere Texte erstellen oder andere audiovisuelle Inhalte produzieren. Sie simulieren mit Wahrscheinlichkeiten und extrem großen Mengen an Trainingsdaten Intelligenz und Verständnis. Es werden statistische Methoden und (Trainings-) Daten sowie die daraus gewonnenen Informationen über Wahrscheinlichkeiten genutzt, um Antworten auf Anfragen zu entwickeln, die aufgrund statistischer Verteilungen Wortteile (Token) aneinanderreihen (oder Bildelemente errechnen

Den Wunsch nach denkenden, dienstbaren Maschinen gibt es schon lange

Wem sollen wir vertrauen?

Befürchtungen rund um (generative) KI-Systeme

Die Funktionsweise ...

¹ derstandard.at/story/2000142852407/wie-kuenstliche-intelligenz-im-kampf-gegen-die-klimakrise-hilft.

² futurezone.at/b2b/oesterreicher-ki-openclaw-arbeitet-openai-peter-steinberger-clawdbot/403131932.

usw.). Dabei entstehen sinnvoll klingende Sätze, Bilder, Videos oder Programmcodes, die sich auf die gestellte Aufgabe (Prompt) beziehen. Bei der Nutzung entsteht dadurch der Eindruck, verstanden zu werden und eine inhaltlich passende Antwort erhalten zu haben. Das System hat jedoch zu keinem Zeitpunkt wirklich ein Verständnis entwickelt, nachgedacht oder darauf basierend eine Antwort formuliert. Trotz rasanter Entwicklungen sind diese Antworten noch immer von Fehlern geplagt, sog. Halluzinationen. Auch sog. „denkende“ Modelle („chain-of-thought“) simulieren dieses Denken nur – und teils widersprechen die Antworten schließlich sogar diesen „Gedankengängen“ (Chen et al., 2025).

Die Funktionsweise dieser Systeme ist für Menschen schwer nachzuvollziehen und lässt keine verlässliche Auskunft über z. B. wissenschaftliche Fragestellungen erwarten. Sie stehen auch im Widerspruch zur oben erwähnten, mit Computern assoziierten mathematischen Präzision und Korrektheit (da jede Antwort anders ausfallen kann). Die Stringenz und der mittelmäßige Wahrheitsgehalt der generierten Antworten reichen jedoch aus, um für viele Menschen täuschend korrekt erscheinende Antworten bis hin zu Fake News zu produzieren. Hierin liegt eine große Gefahr für die Gesellschaft, deren Aushandlungsprozesse und *die Demokratie* – etwa durch die *Fälschung von Bildern und Videos*. Wie einfach es mittlerweile wurde, per KI generierte Fälschungen von Bildern herzustellen, zeigte die Schwemme kinderpornografischer Inhalte durch den Chatbot Grok auf X.³

Auch in der Wissenschaft sind Publikationen und Gutachten, die ohne oder mit nur minimaler menschlicher Mitwirkung erstellt wurden, ein zunehmendes Problem.⁴ Nachdem lange besonders bei Gutachten in der Wissenschaft (die z. B. über den Zuschlag von Fördergeldern entscheiden) genKI untersagt wurde, wurde im März 2026 von der Deutschen Forschungsgemeinschaft die Nutzung genKI auch in der Begutachtung in gewissem Maße zugelassen.⁵ Beim österreichischen Wissenschaftsfonds (FWF) ist das derzeit untersagt.⁶ Der Nutzen wird vielfach überschätzt (Strauß 2026).

Chatbots werden auch zunehmend bei seelischen, psychischen und medizinischen Fragestellungen konsultiert (siehe dazu auch *Soziale Agenten*): Sie sind niederschwellig und günstig, was sie als (erste) Anlaufstelle für Betroffene attraktiv macht. Chatbots geben auch bereitwillig Antworten, sind aber nicht für Diagnostik gemacht und liefern immer wieder irreführende und inkorrekte Antworten (APA, 2025). Darüber hinaus können sie zwar eine therapeutische Beziehung simulieren, de facto ist diese aber einseitig. Hier ist entscheidend, dass Chatbots darauf trainiert werden, den Nutzenden zuzustimmen und ihnen zu schmeicheln (Malmqvist, 2025). Das ist insbesondere bei Personen in Ausnahmezuständen ein enormes Risiko, da sie etwa in selbst- oder fremdverletzendem Verhalten oder Psychosen bestärkt werden (Dohnány et al., 2025) oder gar bei der Planung von Gewalttaten unterstützt werden können.⁷

Die (möglichen) *Auswirkungen auf liberale Demokratien* wurde umfangreich in der entsprechenden Parlamentsstudie aufgearbeitet. Eine darin weniger beleuch-

... und daraus
resultierende Gefahren

Herausforderungen im
Wissenschaftsbetrieb

Psychische Gesundheit

Gefahren für
liberale Demokratien

³ orf.at/stories/3418259/; digital.uni-passau.de/beitraege/2026/ki-und-kinderpornografie

⁴ theatlantic.com/science/2026/01/ai-slop-science-publishing/685704/.

⁵ dfg.de/de/grundlagen-themen/digitale-themen/ki/begutachtung.

⁶ derstandard.at/story/3000000307506/47-faelle-von-fehlverhalten-bei-fwf-forschungsprojekten.

⁷ npr.org/2026/04/23/nx-s1-5794016/openai-is-under-scrutiny-after-two-mass-shooters-used-chatgpt-to-plan-attacks.

tete Frage ist, inwiefern der zunehmende Einsatz von Chatbots als Informationsquelle und zur Aufbereitung von Informationen einen Einfluss auf die Entscheidungen von Politikerinnen und Politikern sowie Verwaltungsbediensteten haben kann: Denn je nachdem, wie der Prompt an die KI formuliert wird, kommen teilweise erheblich abweichende Antworten heraus – und können damit auf subtile aber weitreichende Weise politische Prozesse beeinflussen (Loi & Marsh, 2026). Wie hier verhindert werden kann, dass unbewusst Wertvorstellungen aus der KI in die Politikgestaltung und den Verwaltungsvollzug einfließen, ist noch offen – eine relativ vage „menschliche Aufsicht“ könnte dabei zu kurz greifen. Und auch in der Politikberatung hat KI Einzug gehalten – teilweise mit fragwürdigem Umgang.⁸

Es gibt auch bereits erste explizit durch KI getriebene politische Vorhaben: So wurde in Albanien mit „Diella“ eine KI als Beschaffungsministerin eingesetzt: Sie soll – weil KI – unbestechlich sein und damit gegen Korruption in der Beschaffung wirksam werden.⁹ Es gibt aber auch erste Bestrebungen, KI-Parteien aufzubauen, auch wenn diese aktuell noch als Kunstprojekte angelegt sind: die synthetische Partei in Dänemark und eine ähnlich angelegte in Linz.¹⁰ Hier ist die Idee, durch aktuelle Parteien kaum repräsentierte Wählerschichten abzubilden.

Die deutlichen Auswirkungen des KI-Booms auf die Wirtschaft bergen durchaus das Potential für gesellschaftliche Spannungen. So haben KI-Investments bei manchen Firmen zu neuen Höchstbewertungen geführt, allen voran dem Chipanbieter Nvidia. Dabei sorgen zirkuläre Investitionen für offene Fragen, inwiefern dieser Boom nachhaltig sein kann: So investiert insbesondere Nvidia stark in KI-Anbieter, die mit diesem Geld wiederum Hardware von Nvidia kaufen.¹¹ Sollten die hohen Erwartungen nicht erfüllt werden, könnten ganze Industriesparten wie Kartenhäuser zusammenfallen. Die hohen Erwartungen und die begrenzte Verfügbarkeit von Rechenleistung hat außerdem seit Herbst 2025 dazu geführt, dass Speicherbauteile – von Grafikkarten über Arbeitsspeicher bis hin zu Solid-State-Disks – massiv verteuert wurden, – was die Anschaffung von IT-Infrastruktur und -Geräten sowohl für Verbraucherinnen und Verbraucher als auch für Unternehmen teilweise unleistbar macht.¹²

Auf dem *Arbeitsmarkt* zeichnen sich Veränderungen durch den Einsatz von KI ab, insbesondere in der langjährig als Zukunftsmarkt gesehenen IT-Branche: Gerade große IT-Firmen haben in den letzten Monaten umfangreiche Kündigungswellen durchgeführt, häufig mit Verweis auf KI.¹³ Dabei ist unklar, ob dies tatsächlich auf KI-Automatisierung zurückzuführen ist oder ob es sich um eine praktische „Ausrede“ handelt, die dem eigenen Marketing hilft. Eine besondere Herausforderung stellt generative KI teilweise für Berufseinsteigerinnen und -einsteiger dar: Gerade Menschen mit wenig Expertise könnten es zunehmend schwerer haben, eine Stelle zu bekommen – und damit die Chance, Erfahrung zu sammeln. Ohne diese Erfahrung könnten sie aber oft Fehler in KI-generierten Inhalten nicht bemerken (Butollo et al., 2025). Gleichzeitig könnte genKI auch den Jobein-

KI-Ministerin

KI-Parteien

Sorge vor KI-Blase

Explodierende Kosten für Hardware

Auswirkungen auf den Arbeitsmarkt ...

... besonders beim Berufseinstieg

⁸ fortune.com/2025/10/07/deloitte-ai-australia-government-report-hallucinations-technology-290000-refund/.

⁹ reuters.com/technology/albania-appoints-ai-bot-minister-tackle-corruption-2025-09-11/ooe.orf.at/stories/3341485/.

¹⁰ bloomberg.com/graphics/2026-ai-circular-deals/.

¹² So hat ein 8-GB-Speicherriegel im Juli 2025 etwa 25 Euro gekostet – von Jänner bis Mai 2026 lag der Preis dafür bei ca. 120 Euro – beinahe das Fünffache.

¹³ theguardian.com/technology/2026/apr/06/tech-layoffs-ai-work/.

stieg erleichtern. Wichtig ist, Möglichkeiten zum Jobeinstieg zu erhalten und der Dequalifizierung entgegenzuwirken. Auch ist nicht zu unterschätzen, wie sich die durch KI ausgelösten Veränderungen auf die Belastung am Arbeitsplatz auswirken können.¹⁴

GenKI fordert das Bildungssystem heraus (UNESCO, 2025). Vordergründig wird gefragt, wie in Zeiten von KI-generierten Aufsätzen und Hausübungen sinnvoll Leistung festgestellt werden kann. Gleichzeitig rückt die Frage in den Mittelpunkt, welche Rolle der direkte Austausch zwischen Menschen – also der soziale Aspekt des Lernens – spielt und spielen soll.

Die ethischen Anforderungen an genKI-Systeme sind weitgehend mit denen an andere KI-Systeme vergleichbar. Es sollte der Mensch im Mittelpunkt stehen, Entscheidungen müssten transparent, nachvollziehbar, begründbar und reproduzierbar sein.¹⁵ Besonders bemängelt werden die Machtasymmetrien, die durch mangelnde Transparenz über Funktionsweise und Datenverwendung entstehen, sowie die Machtkonzentrationen durch große Datensammlungen und proprietäre Systeme von US-IT-Konzernen. Die Arbeitsbedingungen, unter denen Menschen in Niedriglohnländern die Systeme trainieren sind ebenso problematisch wie der nicht nachhaltige Betrieb und der *hohe Ressourcenverbrauch* der Systeme.¹⁶

*Generative KI
und Bildung*

*Ethische
Anforderungen*

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

GenKI hält in vielen Bereichen Einzug. Im Bildungsbereich spiegeln sich die Änderungen im Plan wider, KI verstärkt im Lehrplan zu verankern.¹⁷ Mit der AI Factory Austria entstehen ein Wissenshub und eine technische Infrastruktur rund um das Thema KI, die Angebote für Wissenschaft, Wirtschaft und Verwaltung bieten soll.¹⁸ Mit der Public AI soll KI auch verstärkt in der öffentlichen Verwaltung Einzug finden¹⁹ – zu diesem Thema läuft aktuell auch eine vertiefende Studie für das österreichische Parlament.²⁰ Besondere Stärken hat Österreich auch in innovativen Formen, generative KI mit robusteren und fakzentreuen Wissensrepräsentationen zu verknüpfen – Expertise, die im FWF-Exzellenzcluster Bilateral AI vernetzt wird.²¹

*In vielen Bereichen
relevant*

AI Factory

KI in der Verwaltung

*Exzellenzcluster
Bilateral AI*

¹⁴ Belastungsmatrix der Arbeitsinspektion: arbeitsinspektion.gv.at/Gesundheit_im_Betrieb/psychische_Belastungen/Digitalisierung_Belastungsmatrix.html.

¹⁵ Stellvertretend die Stellungnahme des deutschen Ethikrates: ethikrat.org/fileadmin/Publikationen/Stellungnahmen/deutsch/stellungnahme-mensch-und-maschine.pdf.

¹⁶ Siehe: ta-swiss.ch/chatgpt und heise.de/news/Wasserbilanz-von-KI-Modellen-Halber-Liter-Wasser-pro-Unterhaltung-mit-ChatGPT-8973680.html.

¹⁷ schule.at/bildungsnews/detail/wiederkehr-praesentiert-neuen-lehrplan-fuer-ahs-oberstufe.

¹⁸ ai-at.eu.

¹⁹ digitalaustria.gv.at/themen/kuenstliche-intelligenz/publicai/ergebnispapierkikonklave.html.

²⁰ oeaw.ac.at/ita/projekte/digitale-transformation-der-oeffentlichen-verwaltung.

²¹ bilateral-ai.net.

VORSCHLAG FÜR DAS WEITERE VORGEHEN

Da die Auswirkungen auf die Gesellschaft vielfältig und teilweise rasant sind, empfiehlt sich eine kontinuierliche, wissenschaftlich fundierte und unabhängige Begleitung, die nicht von Marketing getrieben ist. Vorbild könnte das National Centre for Artificial Intelligence in Society (Dänemark) sein, das interdisziplinäre Forschung durchführt und regelmäßig einen Überblick über neue (wissenschaftliche) Durchbrüche und Entwicklungen im Bereich der KI gibt – als Entscheidungsgrundlage und Orientierung für Politik wie Bürgerschaft. Weiter sollten Fehler bei sozialen Medien der Vergangenheit nicht mit Chatbots und anderen KI-Angeboten wiederholt werden: Sowohl die Marktkonzentration als auch das Bestreben der Anbieter, möglichst viele an sich zu binden, deutet darauf hin, dass auch hier süchtigmachendes Design verstärkt Einzug halten wird. Eine vertiefende TA der Auswirkung genKI auf mentale Gesundheit und sozialen Zusammenhalt ist daher zu empfehlen.

*Fundierte Expertise
für Politik und
Öffentlichkeit*

*Auswirkungen auf
Gesundheit und
Zusammenhalt*

ZITIERTE LITERATUR

- American Psychological Association (2025). *APA Health Advisory on the Use of Generative AI Chatbots and Wellness Applications for Mental Health*. apa.org/topics/artificial-intelligence-machine-learning/health-advisory-ai-chatbots-wellness-apps-mental-health.pdf.
- Bostrom, N. (2016). *Superintelligenz. Szenarien einer kommenden Revolution*. Suhrkamp, Frankfurt am Main.
- Butollo, F., et al. (2025). *Generative AI and Changes to Knowledge Work*. doi.org/10.34669/WI.WJDS/5.4.1.
- Goddard K, Roudsari A, Wyatt JC (2014). Automation bias: empirical results assessing influencing factors. *International Journal of Medical Informatics*. 2014 May; Vol 83 (Issue 5): pages 368-75. doi.org/10.1016/j.ijmedinf.2014.01.001
- Kurzweil, R. (2005). *The Singularity Is Near. When Humans Transcend Biology*. Viking, New York.
- Chen, Y., et al. (2025). *Reasoning Models Don't Always Say What They Think*. Anthropic.
- Dohnány, S., et al. (2025). *Technological folie à deux: Feedback Loops Between AI Chatbots and Mental Illness*. arxiv.org/abs/2507.19218v3.
- Loi, M., & Marsh, O. (2026). Was bedeutet es für die Demokratie, wenn Menschen in Politik und Verwaltung zulassen, dass KI ihre Entscheidungen beeinflusst? algorithmwatch.org/de/politik-verwaltung-ki-entscheidungen/.
- Malmqvist, L. (2025). Sycophancy in Large Language Models: Causes and Mitigations. In K. Arai (Hg.), *Intelligent Computing* (S. 61–74). Springer Nature Switzerland. doi.org/10.1007/978-3-031-92611-2_5.
- Mara, M., et al. (2026). Beyond Disposition: AI Knowledge Predicts Anthropomorphization of a Language Model Better Than Personality Traits in Lay and Expert Populations. *Proceedings of the 2026 CHI*, 1–17. doi.org/10.1145/3772318.3791005.
- Strauß, S. (2026). KI versus Wissensarbeit? Widersprüche, Herausforderungen und Konzepte zur Vermittlung von Critical AI Literacy. *SWS - Rundschau*, 65 (Heft 4), 391-409, sws-rundschau.at/ausgaben/jahrgang-2025/heft-4#c2248.
- UNESCO. (2025). *AI and the future of education: Disruptions, dilemmas and directions*. UNESCO. doi.org/10.54675/KECK1261.

GROSSWÄRMEPUMPEN (AKTUALISIERT)



© Wien Energie

ZUSAMMENFASSUNG

In der notwendigen Wärmewende und einer entsprechenden Raus-aus-Gas-Strategie spielen Wärmepumpen eine zentrale Rolle. Bisher wurden diese jedoch hauptsächlich im Neubau und in Ein-Parteien-Haushalten eingesetzt. Mit der Entwicklung von Großwärmepumpen mit Leistungen von mehreren Megawatt besteht die Möglichkeit, eine große Anzahl von (Ab-)Wärmequellen aus der Industrie sowie Umgebungswärme aus Geothermie und Gewässern zu nutzen und so Wärmepumpen auch im Altbestand und vorhandenen Wärmenetzen einzusetzen. Der Ausbau und die Weiterentwicklung von Fernwärme und lokalen Wärmenetzen auf Basis von Großwärmepumpen erhöhen die Resilienz der Wärmeversorgung und verringern die Abhängigkeit gegenüber Preisschwankungen fossiler Energieträger. Notwendig erscheinen Forschung zur qualitativen und quantitativen Abschätzung der Nutzungsmöglichkeiten in Österreich sowie stabile Rahmenbedingungen, die für Investitionssicherheit und soziale Abfederung beim Umstieg sorgen.

*Großwärmepumpen
als wichtiges Element
in der Wärmewende*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Zur Erreichung der Klimaziele, ausgedrückt auch im Bekenntnis der österreichischen Bundesregierung im Regierungsprogramm zur Klimaneutralität bis 2040, ist es wichtig, so schnell wie möglich die Energieversorgung in den Bereichen Strom, Industrie, Mobilität und Wärme klimaneutral zu gestalten. Außerdem haben der Angriffskrieg auf die Ukraine seit 2022 sowie der Irankrieg 2026 und die daraus resultierenden Versorgungsengpässe bei fossilen Brennstoffen das politische Ziel der energetischen Unabhängigkeit, insbesondere auch von Gas, deutlich an Bedeutung gewinnen lassen. Die entsprechenden Lösungen für Strom sind durch die Erzeugung mittels erneuerbarer Energiequellen wie Wasser, Sonne und Windkraft sowie für die Mobilität durch Umstellung auf E-Mobilität, integrierte Mobilitätskonzepte mit Ausbau des Öffentlichen Verkehrs und Verringerung des Individualverkehrs weitgehend klar und werden teilweise schon umgesetzt. Im Bereich Wärmeversorgung spielen Wärmepumpen eine zentrale Rolle, werden bisher zumeist aber eher im Bereich privater Haushalte eingesetzt.

*Wärmepumpen
als zentrales Element
in der Wärmewende*

Kürzlich erschienene Berechnungen für Deutschland haben gezeigt, dass der Ersatz von Gasheizungen durch Wärmepumpen den Gasverbrauch am schnellsten senken würde und bis zu 60 % der Gasmenge reduzieren könnte, die vormals durch russisches Gas abgedeckt wurde (Altermatt et al., 2023). In Österreich wird immer weniger mit fossilen Energieträgern geheizt: der Anteil sank von 54 % des Heizbedarfs im Jahr 2010 auf 33 % im Jahr 2024. Gas und Heizöl werden in etwa in gleicher Größenordnung eingesetzt. Fernwärme und Wärmepumpen haben deutlich zugelegt, von 9,5 % bzw. 1 % auf 17 % bzw. 6,5 %. Den Rest decken Holz (34 %), Strom (8,5 %) und Solarwärme (1 %) ab.¹

*Es wird immer weniger
mit fossilen
Energieträgern geheizt*

Während neu errichtete Einfamilienhäuser in der Regel mit heutigen Wärmepumpen gut versorgt werden können, ist die gesicherte Wärmeversorgung von größeren und älteren Gebäuden, die heute vornehmlich mit Gas oder Öl versorgt werden, deutlich schwieriger. Allgemein ist anerkannt, dass hierfür in der Regel Wärmenetze die beste Wahl sind, da sie unterschiedliche Wärmequellen nutzen und die Energie vom Ort der Quelle direkt in Form von Wärme zu den einzelnen Gebäuden transportieren können. Die dekarbonisierte Wärmeversorgung kann an entsprechenden Standorten durch verschiedene Arten der Geothermienutzung erfolgen, aber auch durch Biomassekraftwerke. Diese Nutzungsmöglichkeiten sind allerdings nicht überall realisierbar. Zur Schließung der Wärmelücke bietet sich der Einsatz von Großwärmepumpen an. Diese Anlagen von 100 kW bis mehrere MW thermischer Leistung nutzen Abwärme aus heißen Abgasen von Industrieanlagen, aus dem Abwasser, Rechenzentren, Industrieprozessen aber auch Umgebungswärme aus Seen und Flüssen. In Großbritannien², in Deutschland³ und in der Schweiz⁴ werden derartige Anlagen aufgebaut bzw. schon genutzt. Schweden war auf diesem Gebiet seit den 1980er-Jahren Vorreiter und hat mittlerweile sieben Großwärmepumpen mit 225 MW Gesamtleistung aus Ab-

*Großwärmepumpen
mit bis zu mehreren
MW Leistung als
nächster Schritt*

¹ statistik.at/statistiken/energie-und-umwelt/energie/energieeinsatz-der-haushalte.

² [bbc.com/future/article/20230131-can-city-dwellers-ever-have-heat-pumps](https://www.bbc.com/future/article/20230131-can-city-dwellers-ever-have-heat-pumps).

³ energie-experten.org/projekte/waermepumpe-nutzt-rhein-fuer-mannheimer-fernwaerme.

⁴ aew.ch/publikationen/magazin-aew-on/fruehling-2020/waermeverbund-uetikon-am-see.

wasser in Stockholm in Betrieb.⁵ In Mannheim wird bereits die weltweit größte Flusswärmepumpe gebaut. Mit einer thermischen Leistung von 165 MW kann sie bis zu 40.000 Haushalte mit Wärme versorgen.⁶ Zusammen mit Wärmespeichersystemen bilden Großwärmepumpen im Rahmen der „Smart Thermal Networks“ das Herzstück der europäischen Strategie zur Dekarbonisierung des Wärmesektors.⁷ Die europäische Fernwärmeindustrie ist besonders wettbewerbsfähig. Eine Umstellung von fossilen Energieträgern auf Großwärmepumpen würde die Wertschöpfungskette nach Europa verlagern sowie die Energiesicherheit und Resilienz des Wärmesektors erhöhen.⁸

Auch in Österreich werden seit einiger Zeit Pilotprojekte mit Großwärmepumpen erprobt. In Wien ist seit Dezember 2023 eine der leistungsstärksten Wärmepumpen Europas in einer ersten Ausbaustufe in Betrieb. Sie steht bei der Kläranlage Simmering und entzieht dem bereits gereinigten Abwasser 6 °C und kann damit etwa 90 °C warmes Wasser für die Fernwärme Wien bereitstellen. Der für den Betrieb notwendige Strom kommt über eine eigene Leitung direkt aus dem naheliegenden Donaukraftwerk Freudenau. Ein Vorgängermodell arbeitet seit 2019 an diesem Standort, das neue System liefert aktuell 55 MW an 56.000 Haushalte und soll im Vollausbau 2027 mit einer Leistung von 110 MW bis zu 112.000 Haushalte mit Wärme versorgen.⁹ Seit Anfang 2026 werden rund 16.000 Wiener Haushalte mithilfe einer an eine Müllverbrennungsanlage gekoppelten Großwärmepumpe, die die Abwärme der Abgase nutzt, mit Heizwärme und Warmwasser versorgt.¹⁰

*Pilotprojekte
in Österreich*

Wärmepumpen sind hocheffizient, da sie i. d. R. mehr als das Dreifache der eingesetzten Antriebsenergie in Form von Strom als Wärmeenergie abgeben können. Grundsätzlich funktioniert eine Wärmepumpe wie ein Kühlschrank, nur umgekehrt: statt Kälte zu erzeugen, produziert sie Wärme. Dies basiert auf der Eigenschaft eines Kältemittels, bei Zustandsänderung zwischen flüssig und gasförmig gezielt Wärme aufzunehmen und wieder abzugeben. In der Wärmepumpe wird Umweltwärme extrahiert und in das zu beheizende System transportiert. Wärmepumpen nutzen zudem unterschiedlichste, bisher zumeist ungenutzte Wärmequellen für die Wärmeerzeugung. Dazu zählen Umweltwärmequellen wie Umgebungsluft, Geothermie oder Gewässer, aber auch Abwärmequellen industrieller Prozesse. Damit können Großwärmepumpen einen wichtigen Beitrag zur Sektorkopplung leisten.¹¹ Die Forschung an und Entwicklung von Großwärmepumpen schreitet voran und hat einerseits die Vermeidung *klimaschädlicher Kälte-*

*Großwärmepumpen
wichtig für die
Sektorkopplung*

⁵ heatpumpingtechnologies.org/annex47/wp-content/uploads/sites/54/2018/12/annex-47hammarbyverket.pdf.

⁶ tga.at/branche/strabag-baut-groesste-flusswaermepumpe-der-welt.

⁷ op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/d606ca28-df42-11f0-8439-01aa75ed71a1/language-en.

⁸ agora-energiewende.org/fileadmin/Projekte/2025/Events_other/Presentation_Webinar_heat_pump_toolkit_Agora_15042025.pdf.

⁹ infothek.bmimi.gv.at/umweltfoerderung-im-inland-staerkste-grosswaermepumpe-europas-entsteht-in-wien/ und positionen.wienenergie.at/projekte/waerme-kalte/grosswaermepumpe/.

¹⁰ wien.orf.at/stories/3339818.

¹¹ agfw.de/technik-sicherheit/erzeugung-sektorkopplung-speicher/aktuelles-aus-dem-bereich/newsdetail/agfw-veroeffentlicht-praxisleitfaden-zu-grosswaermepumpen-in-zweiter-auflage.

mittel,¹² aber auch die Erzielung höherer Systemtemperaturen zum Ziel.¹³ Der sogenannte Temperaturhub – der Unterschied zwischen Temperatur der Wärmequelle und der Output-Temperatur der Wärmepumpe – wird immer größer, so dass mittlerweile Wärmepumpen mit einer Prozesstemperatur von bis zu 160°C in Betrieb sind.¹⁴

Die Entwicklung der künstlichen Intelligenz und der damit verbundene steigende Bedarf an Rechenkapazität erschließen eine neue Wärmequelle: *Rechenzentren* werden in den kommenden Jahren immer mehr Abwärme erzeugen. Seit Jänner 2024 deckt die Klinik Florisdorf durch eine mit dem Kühlsystem des benachbarten Rechenzentrums verbundene Wärmepumpenanlage (Gesamtleistung 3 MW) zwischen 50 und 70 % ihres Wärmebedarfs.¹⁵ Das in einem Kreislauf zirkulierende Wasser wird im Rechenzentrum erwärmt, die Wärme wird durch eine Wärmepumpe entzogen und in das Heizsystem der Klinik eingespeist. Dadurch entsteht abgekühltes Wasser, das zum Rechenzentrum zurückfließt.

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Die österreichische Wärmestrategie¹⁶ soll einen gemeinsamen Rahmen von Bund und Bundesländern schaffen, um in einem Stufenplan bis zum Jahr 2040 die gesamte Wärmeversorgung Österreichs zu dekarbonisieren. Der Einsatz von Wärmepumpen spielt dabei eine zentrale Rolle. Großwärmepumpen gelten als wichtiges Element, um den Ersatz fossiler Heizungstechnik durch den Ausbau der Wärmenetze klimaneutral zu gestalten (Gerhardt et al., 2021). Mit über 1.300 Kilometern Länge ist das Wiener Fernwärmenetz eines des größten Europas. Wien Energie versorgt derzeit etwa 440.000 Wiener Haushalte und 7.800 Großkunden mit Fernwärme¹⁷, und strebt an, bis 2040 600.000 Haushalte zu versorgen.¹⁸ Dabei werden Großwärmepumpen eine bedeutende Rolle spielen. Daneben gibt es in Österreich noch große Fernwärmenetze in insgesamt neun Städten,¹⁹ wobei Linz als „Fernwärmehauptstadt“ gilt. Hier sind fast drei Viertel aller Wohnungen angeschlossen, was das dichteste Fernwärmenetz in Österreich ergibt. Der Anteil soll bis 2030 auf 80 % erhöht werden.²⁰

*Österreichische
Wärmestrategie*

¹² Siehe auch [OTS_20230330_OTS0125/spoe-sidl-eu-parlament-fuer-stroengere-regulierung-von-klimakiller-gasen](#).

¹³ [gruene-fernwaerme.de/gruene-fernwaerme/erneuerbare-energien/grosswaermepumpen](#).

¹⁴ [dryficiency.eu](#).

¹⁵ [wien.orf.at/stories/3242962](#).

¹⁶ [bmwet.gv.at/Themen/Energie/Gebaeudeeffizienz_Waermeversorgung/Waermestrategie.html](#).

¹⁷ [ots.at/presseaussendung/OTS_20230203_OTS0044/baufortschritt-europas-leistungsstaerkste-grosswaermepumpen-in-wien-angekommen](#). Details zur umfassenden Strategie finden sich hier: [wien.gv.at/umwelt/waerme-und-kaelte-2040](#).

¹⁸ [wien.gv.at/spezial/wien-plan/strategien-fur-das-planen-fur-die-energiewende/dekarbonisierung-der-waermeversorgung-und-gebäudekühlung-in-der-bestandsstadt](#).

¹⁹ Wien, Graz, Linz, Salzburg, St. Pölten, Klagenfurt, Lienz, Wels, Villach.

²⁰ [orf.at/stories/3266222/](#).

In der Energieaufbringung für Fernwärme stand im Jahre 2022 Erdgas mit 33 % nach den biogenen Energien mit 53 % an zweiter Stelle (BMK, 2024, S. 16). Es zeigt sich demnach ein entsprechendes Ausbaupotential für (Groß-)Wärmepumpen, wenn man bedenkt, dass z. B. Umgebungswärme mit 1,2 % bisher nur einen geringen Beitrag leistet. Da aber in Österreich knapp 70 % der Bevölkerung in kleineren Städten und Gemeinden mit bis zu 100.000 Einwohner leben, stellt der Ausbau von Nahwärmenetzen unter Nutzung von Großwärmepumpen eine besondere Herausforderung dar. Hinsichtlich der Energieträger zeigt sich, dass je kleiner die Gemeinde, desto häufiger mit Brennholz, Heizöl oder Holzpellets geheizt wird, und je größer die Gemeinde, desto häufiger finden Gas und Fernwärme Verwendung (Lechinger & Matzinger, 2020, S. 8f).

*Siedlungsstruktur
als Herausforderung*

Dezentralisierte lokale Wärmenetze spielen bei der Dekarbonisierung des Wärmesektors eine wichtige Rolle. Der Umstieg von zentralisierten Fernwärmenetzen auf erneuerbare Energien lässt sich mit Anreizen und Förderungen einfacher und effizienter steuern als der Wechsel in mehr als vier Millionen Wohnungen mit jeweils eigenem Wärmesystem. Durch die gemeinschaftliche Nutzung lokaler Ressourcen, wie z. B. Geothermie, Biomasse und industrielle Abwärme sowie Infrastrukturen wie Wärmespeicher kann ein effizienteres Wärmesystem entstehen (Jeandaux et al., 2021). In diesem Rahmen können künftig auch Großwärmepumpen in kleineren Gemeinden eine Rolle übernehmen. Damit wird sichergestellt, dass Wärme auch in kleineren Gemeinden unabhängig von Gas und Öl wird, und dadurch nicht nur nachhaltiger, sondern auch resilienter und weniger anfällig für Preisschwankungen fossiler Energieträger.

Im Einfamilienhaus hat sich die Wärmepumpe im Neubau bereits durchgesetzt. Seit 29. Februar 2024 ist das Erneuerbare-Wärme-Gesetz in Kraft.²¹ Es untersagt (mit Übergangsbestimmungen) die Nutzung fossiler Brennstoffe als Heizquelle und für Warmwasseraufbereitung im Gebäudebau. Dadurch ist davon auszugehen, dass sich der Ausbau von Wärmepumpen beschleunigen wird.

Besonderes Augenmerk ist auch auf die sozialen Aspekte der Wärmewende zu legen. Änderungen der Heizungsform verändern auch oft Abhängigkeiten bzw. verringern individuelle Spielräume. Darüber hinaus zeigt sich, dass etwa für die einkommensschwächeren Teile der Bevölkerung die notwendigen Investitionen für den Umstieg kaum finanzierbar sind, selbst wenn sich im Laufe der Nutzung sowohl der Energieverbrauch als auch die Kosten reduzieren sollten. Sogar müssen eine erweiterte Förderpolitik und eventuell auch steuerliche Anpassungen überlegt werden, die unter anderem auch stabile Rahmenbedingungen als Grundlage für Investitionssicherheit beinhalten sollten. Die Aktion „Sauber Heizen für Alle“ fördert seit Anfang 2024 den Umstieg von fossilen Energieträgern auf eine Holzzentralheizung oder Wärmepumpe für Haushalte ohne Anschlussmöglichkeit an Nah- oder Fernwärme.²²

*Wärmewende im
Altbestand unter
Berücksichtigung
sozialer Aspekte*

²¹ bmwv.gv.at/Themen/Energie/Gebaeudeeffizienz_Waermeversorgung/Waerme-strategie.html.

²² umweltfoerderung.at/privatpersonen/sauber-heizen-fuer-alle-2024.

VORSCHLAG FÜR DAS WEITERE VORGEHEN

Zum weiteren Vorgehen wird vorgeschlagen, eine TA-Studie durchzuführen, die das Potential der Anwendung von Großwärmepumpen in Österreich sowohl in qualitativer als auch in quantitativer Hinsicht erhebt, Alternativen gegenüberstellt und einen Kriterienkatalog erarbeitet, der Basis für mögliche Förderungen im Bereich Großwärmepumpen und (Nah-)Wärmenetzen sein könnte. Bei einer Implementierungsförderung sollten neben den notwendigen Rahmenbedingungen für potenzielle Investoren auch lokale und regionale Gegebenheiten sowie soziale Aspekte (Heizung als Grundbedürfnis) berücksichtigt werden. Zusätzlich könnte die Forschungsförderung zur Sektorkopplung sowie die Rolle von Großwärmepumpen als Flexibilitätstechnik beleuchtet werden.

*TA-Studie zu
Großwärmepumpen*

ZITIERTE LITERATUR

- Altermatt, P. P., et al. (2023). Replacing gas boilers with heat pumps is the fastest way to cut German gas consumption. *Communications Earth & Environment*, 4(1), 56, doi.org/10.1038/s43247-023-00715-7.
- BMK (2024) (Bundesministerium für Klimaschutz Umwelt Energie Mobilität Innovation und Technologie) (2024). *Energie in Österreich – Zahlen, Daten, Fakten*. bmwef.gv.at/Services/Publikationen/publikationen-energie/zahlen.html.
- Gerhardt, N., et al. (2021). *Transformationspfade der Fernwärme in Rückkopplung mit dem Energiesystem und notwendige Rahmenbedingungen*. iee.fraunhofer.de/content/dam/iee/energiesystemtechnik/de/Dokumente/Veroeffentlichungen/2019/2021_Jun_Bericht_Fraunhofer_IEE_Transformation_Waerme_2030_2050.pdf.
- Lechinger, V., & Matzinger, S. (2020). *So heizt Österreich – Heizungsarten und Energieträger in österreichischen Haushalten im Sozialen Kontext*. emedien.arbeiterkammer.at/viewer/image/AC12370441_2020_36/.
- Jeandaux, C., et al. (2021). Life Cycle Assessment of District Heating Systems in Europe: Case Study and Recommendations. *Sustainability*, 13, 11256. doi: [10.3390/su132011256](https://doi.org/10.3390/su132011256).

UMWELTWIRKUNGEN DER RAUMFAHRT (AKTUALISIERT)



© unsplash.com/Bill Jelen

ZUSAMMENFASSUNG

Schon jetzt gibt es über 10.000 aktive Satelliten im Orbit, bis 2030 sollen es 100.000 sein – eine Entwicklung, die vor allem durch die kommerzielle Raumfahrt und von Mega-Konstellationen angetrieben wird. Dazu kommen in absehbarer Zukunft die Raketenstarts zu geplanten Raumstationen und für Erkundungsmissionen zum Mond und Mars, Weltraumtourismus, Bergbau im All, Antisatellitenwaffen oder Solarkraftwerke. Satelliten bieten essentielle Dienste, haben aber problematische Umweltwirkungen, die bisher aufgrund der relativ geringen Startdichte wenig beachtet wurden: Dazu gehören ozonschädigende Emissionen (Aluminium, Chlor) in der oberen Atmosphäre; enorme Treibstoffmengen mit Treibhausgasemissionen (CO₂, Wasserdampf, Rußpartikel), auch bodennah beim Start; Weltraumschrott, mit Kollisionsgefahr und Emissionen beim Wiedereintritt; Gefährdung durch wiedereintretende Raketenteile/kaputte Satelliten; Beeinträchtigung der Astronomie. Es gibt für den Weltraum zwar völkerrechtliche Übereinkommen, die aber diese Emissionen ebenso wenig abdecken wie Umweltabkommen (z. B. Montreal-Protokoll).

*Vermehrte Nutzung
des Weltraums hat
zunehmende
Umweltfolgen auf
der Erde*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Derzeit befinden sich mehr als 10.000 aktive Satelliten in der Umlaufbahn der Erde, Schätzungen zufolge werden bis 2030 weitere 100.000 Satelliten gestartet¹. Durch gesunkene Kosten von Satelliten und Raketenstarts bringen vor allem private Unternehmen große Konstellationen von Satelliten in den Orbit, was momentan die Hauptursache für diesen Anstieg der Starts ist (GAO 2022). Während in den letzten Jahrzehnten die Zahl der gestarteten Objekte stetig bei wenigen Hundert pro Jahr lagen, waren es 2025 schon mehr als 4.500 Objekte.² Neben den ersten Starlink- und OneWeb-Konstellationen befinden sich weitere Netzwerke in der Start- oder Planungsphase.³

In Zukunft sind aber auch vermehrte Raketenstarts durch den Bau und die Versorgung von Raumstationen (ISS, China etc.), Mond- und Marserkundungsmissionen, Server im All, durch Weltraumtourismus, *Bergbau im All*, den Bau von Solarkraftwerken, aber auch durch die Beseitigung von *Weltraummüll*⁴ zu erwarten. Durch den *überfüllten Orbit* steigt auch das Konfliktrisiko, wobei der Einsatz von Antisatellitenwaffen (ASAT) und militarisierter Raumfahrt ein weiterer Grund für vermehrte Raketenstarts werden können.⁵ Bisher haben vier Länder bei Tests mit Antisatellitenwaffen eigene Satelliten zerstört (USA, China, Russland und Indien⁶). Österreich und zahlreiche andere Staaten haben sich klar gegen das Testen von ASAT-Raketen ausgesprochen, die Entwicklung von ASAT-Fähigkeiten wird aber stetig vorangetrieben.⁷

Satelliten bieten wichtige, teils essentielle Dienste (GPS, Internet, zivile und militärische *Fernerkundung*, Steuerung von Windkraftanlagen etc.), allerdings ist Weltraumschrott nicht das einzige Umweltproblem der Raumfahrt. Nachdem Treibhausgasemissionen und vor allem ozonschädigende Abgase bisher durch die überschaubare Zahl von Raketenstarts als vernachlässigbar galten und wenig beforscht wurden, könnte sich das bei dem anhaltenden Trend in Zukunft ändern. Eine Studie zeigt z. B., dass bereits eine Dekade eines Weltraumtourismusbooms ausreicht, um die Ozonschicht in einem Maß zu schädigen, dass die gesamte Erholung der Schicht seit dem Montreal-Protokoll zunichte gemacht würde (Ryan, Marais, Balhatchet, & Eastham, 2022). Auch wenn heutige Emissionen im Vergleich zu anderen Industriesektoren klein erscheinen, der zukünftige CO₂-Fußabdruck ist schwer abschätzbar, wird sich aber in einer nicht-vernachlässigbaren Größe bewegen (Dallas et al, 2020; Ross & Jones, 2022).

Insgesamt entstehen Umweltauswirkungen nicht nur beim Raketenstart, sondern an vielen Stellen im gesamten Lebenszyklus: (a) Abbau von Rohstoffen; (b) Ver-

*Raketenstarts
nehmen stark zu ...*

*... mit bisher
wenig beachteten
Umweltfolgen*

¹ esa.int/ESA_Multimedia/Images/2025/04/Around_100_000_satellites_are_expected_to_be_in_orbit_by_2030.

² ourworldindata.org/grapher/yearly-number-of-objects-launched-into-outer-space.

³ Dazu gehören Starlink Gen2 mit 29.988 Satelliten, OneWeb Gen2 mit 6.118 Satelliten, G60 mit 13.904 Satelliten, Guo Wang mit 12.992 Satelliten, Amazon Leo mit 3.236 Satelliten, SDA mit über 1.000 Satelliten, Telesat Lightspeed mit 300 Satelliten, AST Space-Mobile mit 243 Satelliten und IRIS2 mit 290 Satelliten (Wright et al. 2026).

⁴ esa.int/Space_Safety/ClearSpace-1.

⁵ tagesschau.de/ausland/amerika/krieg-satelliten-101.html.

⁶ space.com/anti-satellite-weapons-asats.

⁷ verteidigungspolitik.at/documents/475963/0/%C3%96sterreichische+Milit%C3%A4rische+Weltraumstrategie+2035%2B.pdf/2681f00c-2458-64b4-958a-0b93b3ebc806?version=1.0&t=1708438144625.

wendung von Seltenen Erden; (c) Herstellung von Satelliten; (d) Kalibrierungseinrichtungen für Satelliten; (e) horizontaler Start von Satelliten; (f) vertikaler Start von Satelliten; (g) Verschmutzung der Atmosphäre durch den Start; (h) Aktivitäten im Bodensegment; (i) Validierungskampagnen für Satelliten; (j) Auswirkungen der Helligkeit des Nachthimmels auf die Astronomie; (k) Auswirkungen der Helligkeit des Nachthimmels auf die Ökologie; (l) Zunahme des Weltraummülls; und (m) zunehmende Kollisionen von Weltraumobjekten (Gaston et al., 2023).

Schon in den 1990er-Jahren zeigte eine Studie, dass die Zusatztriebwerke (Booster) der US-amerikanischen Space-Shuttles kleine Ozonlöcher erzeugen (Ko et al. 1994). Diese sogenannten Feststofftriebwerke verteilen bei der Verbrennung von Aluminiumperchlorid feine Partikel, die beim Kreuzen der Stratosphäre als Katalysator für die Zersetzung von Ozon fungieren. Die Veränderung der Atmosphärenchemie wurde dann vor allem wegen der vergleichsweise wenigen Starts als vernachlässigbar eingestuft, auch weil vermutet wurde, dass sich die kleinen Löcher schnell wieder schlossen.

Der Schutz der Ozonschicht wurde mit dem Verbot von Fluorchlorkohlenwasserstoffen (FCKW) im Montreal-Protokoll völkerrechtlich geregelt, nachdem in den 1980er-Jahren die Forschung zeigen konnte, dass das antarktische Ozonloch saisonal auftrat. Eine ausgedünnte Ozonschicht lässt mehr ultraviolette Strahlung des Sonnenlichts durch die Atmosphäre, was auf Lebewesen krebserregend wirkt. Ohne Ozonschicht wäre das Leben auf der Erde, wie wir es heute kennen, nicht möglich. Auch wenn sich die Ozonschicht langsam erholt, treten heute Ozonlöcher saisonal an beiden Polen auf: Zwar wurden FCKWs verboten, aber eine Vielzahl anderer ozonschädigender Substanzen (z. B. Lachgas) werden weiter emittiert bzw. befinden sich als *langlebige Schadstoffe* auch nach dem Verbot noch lange in der Umwelt. Neben den Feststofftriebwerken verwenden heutige Raketen öfter Kerosin, Wasserstoff oder Methan. Feststofftriebwerke sind in ihrer Umweltwirkung besser untersucht und tragen stärker als andere Triebwerke zum Ozonverlust bei (Dallas et al., 2020). Aber alle Triebwerke, auch Flüssigtreibstoffe, emittieren eine Vielzahl von Partikeln und Gasen (wie Stickoxide) direkt in die mittlere und obere Atmosphäre und schädigen dort nachweislich die Ozonschicht (Brown, Bannister, & Revell, 2023).

Außerdem gibt es bei modernen Raketen einen Trend zu wiederverwendbaren Komponenten, die aber, genau wie wiedereintretende Trümmer, Stickstoffoxide beim Erhitzen durch den Wiedereintritt in die Atmosphäre erzeugen. Diese Emissionen tragen dann im gleichen Maß zum gesamten Ozon-Abbau in der Stratosphäre bei wie Chlor aus Feststofftriebwerken (Ryan et al., 2022). Die verglühenden Trümmer erzeugen nicht nur Stickoxide, sondern, da Aluminium ein Hauptbestandteil vieler Bauteile ist, auch Aluminiumoxid. Dies steht im Verdacht, wiederum chemische Prozesse in der Atmosphäre anzustoßen. Eine internationale Industrienorm sieht vor, dass Satelliten spätestens 25 Jahre nach Missionsende verglühen müssen, was bei dem starken Anstieg der Satellitenstarts eine nicht zu vernachlässigende Menge an Material darstellt. Neuere Satelliten sind auf kürzere Lebenszyklen ausgelegt (etwa 5 Jahre). Sie wiegen bis zu 2 Tonnen und beim Verglühen in der Atmosphäre wird eine Vielzahl von Schadstoffen freigesetzt, so z. B. 20 verschiedene Metallverbindungen (Murphy et al., 2023). Beim unkontrollierten Wiedereintritt einer Falcon-9-Rakete konnte, in der ersten Messung dieser Art, in 100 km Höhe über Irland eine Lithium-Schadstoffwolke nachgewiesen werden (Wing et al., 2026).

*Ozonschädigende
Wirkung bei Start und
Wiedereintritt in die
Atmosphäre*

Die Treibhausgasemissionen der Raumfahrt galten bisher immer als vernachlässigbar. Allerdings sind die gesamten Auswirkungen von Partikel- und Gasemissionen auf die Ozonschicht und Treibhauseffekt unbekannt. Hierbei werden aber Chlor- und Partikelemissionen, wie z. B. Ruß, als besorgniserregender eingeschätzt als Gasemissionen, wie Wasserdampf und Kohlendioxid. Allerdings gilt dies auch nur für das jetzige Startaufkommen. Insgesamt ist das Ausmaß der potenziellen Klimaauswirkungen der Partikelemissionen unbekannt, da es nur wenige Beobachtungsdaten gibt, die für die Validierung von Modellierungsstudien für Raketenemissionen herangezogen werden können; und diese Daten wurden oft nur in der unteren Stratosphäre gesammelt (GAO, 2022). Rußpartikel aus Raketenemissionen haben eine besondere Wirkung, da sie in Höhen ausgestoßen werden, wo sie die Atmosphäre pro Maßeinheit fast fünfhundertmal stärker erwärmen als alle anderen Rußquellen am Boden und in der Luftfahrt zusammen (Ryan et al., 2022).

Angesichts des prognostizierten Wachstums der Raumfahrtindustrie sind die atmosphärischen Auswirkungen nicht ausreichend untersucht, und internationale Umweltabkommen, wie das Montreal-Protokoll, befassen sich derzeit nicht mit Raketenemissionen; auf nationaler Ebene gibt es nur vereinzelte Maßnahmen, wie Steuern auf Weltraumtourismus in den USA (Sirieys, Gentgen, Jain, Milton, & de Weck, 2022). Die UN-Outer Space-Konvention fordert zumindest in einem Artikel, schädliche Kontaminationen des Weltraums und negative Auswirkungen auf die Umwelt der Erde zu vermeiden. Gleichzeitig konzentrieren sich die Richtlinien des Komitees für die Friedliche Nutzung des Weltraums auf das Management von Umweltgefahren im Zusammenhang mit Starts, Aktivitäten im Orbit und Wiedereintritt (UNEP-UNOOSA, 2025). Das unterstreicht die Notwendigkeit eines angemessenen Umweltmanagements für die obere Atmosphäre (Brown et al., 2023). Die Entwicklung eines Nachhaltigkeitsindex für Trägerraketen könnte als Grundlage für künftige Vorschriften dienen oder Anreize für den Sektor zu nachhaltigeren Designs schaffen, indem Emissionsreduzierung zu einem Wettbewerbsvorteil wird (Sirieys et al., 2022).

Bis zu 40 % der Masse von Satelliten der vorherigen Generation überleben den Wiedereintritt, gelangen als Fragmente zur Erde und verursachen dort Unfallrisiken sowie Risiken für Ökosysteme (Wright et al., 2026). Mit dem Trend zu immer größeren Raketen steigt zudem das Risiko, dass die Hauptstufen nach Ausbrennen beim unkontrollierten Wiedereintritt nicht vollständig verglüht. Bei der größten chinesischen Rakete „Langer Marsch“ stürzten ca. 20 Tonnen Metallschrott bei den Malediven ins Meer und überquerten vorher zahlreiche Ballungszentren von Europa bis Indien. Modelle der weltweit bisher größten Rakete (Space-X-Starship) explodierten bei mehreren Starts in den letzten Jahren.

Sie ist allerdings grundsätzlich so konstruiert, dass die Hauptstufe zur Startrampe zurückkehrt und damit wiederverwendbar ist. Eine erfolgreiche Rückkehr gelang im Oktober 2024 zum ersten Mal.⁸ Insgesamt ist ein Trend zu wiederverwertbaren Raketensystemen zu verzeichnen, z. B. kehrte auch Blue Origin bereits 2015 erfolgreich zurück zur Erde und auch die nationalen Weltraumprogramme in den USA und China arbeiten an RLV (reusable launch vehicles).⁹

*Raketenstarts und
Klimaerhitzung*

*Völkerrecht deckt
Raketenemissionen
nicht ab*

*Risiko durch
herabfallende Teile*

*Trend zu
wiederverwertbaren
Raketensystemen*

⁸ [orf.at/stories/3372657/](https://www.orf.at/stories/3372657/).

⁹ [researchgate.net/publication/383181934_Overview_on_Reusable_Space_Launch_System](https://www.researchgate.net/publication/383181934_Overview_on_Reusable_Space_Launch_System).

Satelliten reflektieren auch nach Sonnenuntergang das Sonnenlicht und können daher als helle Streifen in Bildern des Nachthimmels erscheinen. Satelliten können auch die Fernerkundungsdaten von anderen Satelliten in höheren Umlaufbahnen stören, wenn sie unter ihnen vorbeifliegen. Die Kommunikation mit Satelliten erfolgt mit Funksignalen, die viel stärker sind als die Signale von astronomischen Phänomenen. Deshalb können Satelliten die schwachen, für die Radioastronomie wichtigen Signale verdecken und so Beobachtungen von weit entfernten Objekten, wie Schwarzen Löchern oder entfernten Galaxien, behindern. Auch wenn diese Auswirkungen bei einzelnen Satelliten gering sind, sind die Auswirkungen von vielen Satelliten, die in großen Konstellationen betrieben werden, größer oder in einigen Fällen sogar unbekannt (GAO, 2022). Große Bedenken erregten die Ankündigungen von SpaceX, eine Million Datenzentren im Orbit betreiben zu wollen, sowie die von Reflect Orbital bzgl. 50.000 Spiegel zur Bündelung von Sonnenlicht für Solarkraftwerke auf der Erde.¹⁰ Neben der tiefgreifenden Veränderung des Nachthimmels, hätte die entstehende *Lichtverschmutzung* auch eklatante Auswirkungen auf Menschen und Tiere.

Störung der Erd- und Allbeobachtung durch Sonnenlichtreflexionen und Funkübertragung

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Österreichs Weltraumstrategie 2030+¹¹ hat sechs übergeordnete Ziele, von denen das erste die „Nachhaltige Entwicklung auf der Erde und im Weltall“ ist und sich klar den UN-Nachhaltigkeitszielen verpflichtet. Soll die Nutzung des Weltraums, auch durch die österreichische Weltraumforschung und -wirtschaft, nachhaltig erfolgen, müssen die offenen Fragen, etwa zur Schädigung der Ozonschicht durch Aluminium und andere Partikel und Gase, wissenschaftlich geklärt werden, ebenso wie die Frage, wie viele Starts für die Atmosphäre verkraftbar sind. Neben Agendasetting für diese Themen in der Forschungsförderung kann auch die Anpassung der in der Strategie genannten Nachhaltigkeitsindikatoren für Österreichs nationales Weltraumengagement Handlungsraum schaffen. Darüber hinaus könnte sich Österreich über die ESA sowie auf UN-Ebene beim „Greening“ des europäischen und internationalen Weltraumrechts einbringen.

Weltraumstrategie: Umweltwirkung vermehrter Raketenstarts erforschen

VORSCHLAG FÜR DAS WEITERE VORGEHEN

Dringend notwendig ist das weitere Zusammenführen und Erweitern des Wissensstandes zu Emissionen und anderen Umweltwirkungen der Raumfahrt und politischen Handlungsoptionen in einer ausführlichen TA-Studie. Zu begrüßen sind Initiativen, wie die der ESA, die in diese Richtung gehen.¹² U. a. wäre zu erörtern, wie die regulatorischen, technologischen und gesellschaftlichen Rahmenbedingungen für die Umsetzung des Ziels der Europäischen Raumfahrtagentur,

Auch ethische und rechtliche Fragen zu klären

¹⁰ space.com/space-exploration/satellites/this-is-really-intolerable-astronomers-protest-giant-orbiting-mirror-project-and-spacexs-million-ai-satellites.

¹¹ austria-in-space.at/de/austria-in-space/weltraumstrategie.php.

¹² indico.esa.int/event/579/.

die Raumfahrt bis 2040 nach den Prinzipien der Kreislaufwirtschaft zu gestalten¹³, geschaffen werden können. Beispielsweise muss rechtlich geklärt werden, inwiefern das Vorsorgeprinzip bei unsicherem Wissensstand zum Tragen kommen muss und inwieweit (private) Verursacher entstandene Schäden am Allgemeingut Atmosphäre kompensieren müssten. Außerdem werden weitreichende ethische Fragen aufgeworfen, z. B. nach der ungerechten Verteilung von Nutzen und Lasten (privater) Raumfahrt, etwa wenn ein nur wenigen Reichen zugänglicher Weltraumtourismus Weltklima und Ozonschicht beachtlich schädigt.

ZITIERTER LITERATUR

- Brown, T. F., et al. (2023). Envisioning a sustainable future for space launches: a review of current research and policy. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, 1-17.
- Dallas, J., et al. (2020). The environmental impact of emissions from space launches: A comprehensive review. *Journal of Cleaner Production*, 255, 120209.
- GAO (2022). *Technology Assessment – Large Constellations of Satellites. Mitigating Environmental and Other Effects*. [gao.gov/products/gao-22-105166](https://www.gao.gov/products/gao-22-105166).
- Gaston, K. J., et al. (2023). Environmental impacts of increasing numbers of artificial space objects. *Frontiers in Ecology and the Environment*, 21(6), 289-296, [esa.journals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fee.2624](https://esajournals.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/fee.2624).
- Murphy, D. M., et al. (2023). Metals from spacecraft reentry in stratospheric aerosol particles. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 120(43), e2313374120, [pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2313374120](https://www.pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.2313374120).
- Ross, M. N., & Jones, K. L. (2022). Implications of a growing spaceflight industry: Climate change. *Journal of Space Safety Engineering*, 9(3), 469-477. doi.org/10.1016/j.jsse.2022.04.004.
- Ryan, R. G., et al. (2022). Impact of rocket launch and space debris air pollutant emissions on stratospheric ozone and global climate. *Earth's Future*, 10(6), e2021EF002612.
- Sirieys, E., et al. (2022). Space sustainability isn't just about space debris: On the atmospheric impact of space launches: MIT Science Policy Review.
- UNEP-UNOOSA. (2025). *Safeguarding Space - Environmental issues, risks and responsibilities*, [unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2026/ilo_unoosain1_0_html/Safeguarding_Space_Issues_Note_final.pdf](https://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2026/ilo_unoosain1_0_html/Safeguarding_Space_Issues_Note_final.pdf).
- Wing, R., et al. (2026). Measurement of a lithium plume from the uncontrolled re-entry of a Falcon 9 rocket. *Communications Earth & Environment*, 7(1), 161, doi.org/10.1038/s43247-025-03154-8.
- Wright, E., et al. (2026). Satellite megaconstellations and collective casualty risks. *Space Policy*, 101749, doi.org/10.1016/j.spacepol.2026.101749.

¹³ esa.int/Enabling_Support/Preparing_for_the_Future/Discovery_and_Preparation/Building_a_circular_economy_in_space_ESA_studies_pave_the_way.

DÜRRERESILIENZ (AKTUALISIERT)



© Krieger-Lamina

ZUSAMMENFASSUNG

Regenverwöhnte Regionen wie Österreich sind auf Dürren wenig vorbereitet. Mittlerweile verursachen Dürren in Österreich aber mehr Schäden als alle anderen Naturkatastrophen zusammen. Bis 2050 wird eine Zunahme von Dürreschäden auf das Vierfache erwartet. Längst ist nicht nur mehr die Landwirtschaft von wenig Niederschlag, sinkenden Grundwasserspiegeln und Flusständen betroffen, sondern auch Trinkwasser, Industrie, Energieproduktion oder Transport. Jede weitere Dürre offenbart Nutzungskonkurrenz und Zielkonflikte. Da es historisch relativ wenig Erfahrung mit Trockenheit gibt, sind die vorhandenen Pläne nur teilweise zukunftstauglich. Monitoringsysteme sind vorhanden, aber Anpassungs- und Bewältigungsstrategien müssen verbessert werden. Erforschung und Aufbau von Dürresilienz und einer nationalen Wasserstrategie ist dringend notwendig, um österreichische Regionen zukunftssicher zu machen.

*Dürren nehmen zu
und verursachen hohe
Schäden*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

In Europa hat die Klimavariabilität stark zugenommen und damit klimabedingte Extremereignisse wie heiße Dürreperioden, große Hitzewellen sowie anhaltende Überschwemmungen und Sturzfluten (Kempf, 2023). Durchschnittlich waren in den Jahren 2019-2022 90% der bewässerten Fläche und 5% der kultivierten Fläche der EU von Dürre betroffen.¹ Die Verluste durch Dürre im Jahr 2022 betragen 50 Mill. Euro, u. a. verbunden mit einer Abnahme der Getreideproduktion um 10%. Die Studie „Wasserschatz Österreich“ bildet eine umfassende Grundlage für die nachhaltige Bewirtschaftung der Grundwasserressourcen und stellt fest: „Durch die Auswirkungen des Klimawandels können die verfügbaren Grundwasserressourcen in Österreich bis zum Zeithorizont 2050 um bis zu 23 % von derzeit 5,1 Mrd. m³ auf 3,9 Mrd. m³ abnehmen.“² Während Schwere und Häufigkeit vergangener Dürreereignisse eingehend untersucht wurden, ist wenig über die Effekte von Bewältigungsstrategien bekannt oder wie die Gefahr von den relevanten Interessengruppen wahrgenommen wird (Blauhut et al., 2022).

Dürre ist definiert als extremer, über einen längeren Zeitraum herrschender Zustand, in dem aus hydrologischer, landwirtschaftlicher oder ökologischer Sicht weniger Wasser verfügbar ist als erforderlich.³ Es werden folgende Abstufungen unterschieden: meteorologische Dürre (ein bis zwei Monate trockener als üblich), landwirtschaftliche Dürre (zwei Monate und länger trocken, Ernteeinbußen), hydrologische Dürre (ab vier Monaten, Grundwasser und Pegel betroffen), sozio-ökonomische Dürre (ab einem Jahr, Wassermangel bremst produzierende Wirtschaft).⁴

Da es mit Trockenheit historisch viel weniger Erfahrungen als beispielsweise mit Hochwasser gibt, sind vorhandene Pläne in historisch regenverwöhnten Regionen nur teilweise zukunftsgerecht. Für Österreich wird bei 3°C Erwärmung bis zum Jahr 2070 mit der Zunahme der Dürremonate von 2-3 auf 3-5 gerechnet – mit dem Anstieg in den Sommermonaten – auch werden die Dürren mit großer Sicherheit extremer (AAR2, 2025). Sie kommen nun im Spätsommer und Herbst am häufigsten vor, während sie im 19. Jahrhundert vor allem im Winter und Frühling auftraten (ibid.). Die Österreichische Hagelversicherung veranschlagt für 2024, das wärmste Jahr der bis dahin-jährigen Messesgeschichte, einen Schaden von 150 Millionen Euro durch Dürre.⁵

Zum Vergleich: der Schaden durch das Hochwasser im selben Jahr wurde auf 1.3 Millionen Euro geschätzt.⁶ Dürren führen zu Kaskadeneffekten: Dürren und Hitzewellen treten häufig gemeinsam auf und können *Waldbrände* auslösen. Durch den Vegetationsverlust können in Steillagen wie den Alpen Regenfälle eher zu *Erdbeben* führen (Abbate et al., 2019). Eine sich ausbreitende meteorologische

Dürren nehmen zu, mit hohen ökonomischen und ökologischen Schäden

Definition Dürre

Österreich galt lange als Wasserparadies

¹ discomap.eea.europa.eu/ClimatePreparedness2025/?page=Droughts.

² info.bml.gv.at/service/publikationen/wasser/wasserschatz-oesterreichs.html.

³ gerics.de/products_and_publications/publications/detail/062858/index.php.de.

⁴ dwd.de/DE/service/lexikon/Functions/glossar.html?lv2=100578&lv3=603288.

⁵ derstandard.de/story/3000000279814/duerreversicherung-senkung-des-staatlichen-zuschusses-erhoeht-kosten-fuer-bauern.

⁶ wifo.ac.at/news/hochwasser-verursachte-13-mrd-e-schaden/.

Dürre führt zu niedrigen Wasserständen in den Reservoirs und Flüssen, was die öffentliche Wasserversorgung beeinträchtigt, zu Teilabschaltungen von Kernkraftwerken führt und ein massives Fischsterben auslöst. Auf Ernteverluste folgen in der Regel ein Mangel an Futtermitteln für das Vieh und infolgedessen eine frühzeitige Schlachtung der Tiere (de Brito, 2021). Akute Dürre begünstigt auch Borkenkäferbefall (Netherer et al., 2019). Sinkende Pegelstände in Flüssen erschweren Transport und Energieproduktion in Flusskraftwerken, sinkende Grundwasserspiegel offenbaren Nutzungskonflikte zwischen Trinkwasserversorgung, industrieller und landwirtschaftlicher Nutzung und dem Tourismus (z. B. *Künstlicher Schnee*). Bislang speichern Gletscher in den Alpen enorme Wassermassen und gleichen teilweise fehlendes Wasser in heißen Jahren aus. Allerdings ist es nun sicher, dass die österreichischen Gletscher vollständig abschmelzen werden; gleichzeitig variieren durch die Erderhitzung die Niederschlagsmengen stärker (AAR2, 2025). Dürren können die Folgen von Wassermangel verstärken, indem sie die Porenstruktur des Bodens so beeinflussen, dass Pflanzen Wasser schlechter aufnehmen (Radolinski et al., 2025); auch können auf Dürre folgende starke Regenfälle durch die verringerte Aufnahmefähigkeit des Bodens zu Überflutungen führen.⁷

Kaskadeneffekte führen zu weitreichenden Folgen in Land- und Forstwirtschaft, Industrie, Energieproduktion, Trinkwasser und Freizeitgestaltung

In der Landwirtschaft treffen die Folgen des zunehmenden Risikos und der Unsicherheit Kleinbetriebe am schwersten; in diesem Fall sind Hilfeleistungen besonders wichtig (Birghila et al., 2022). Nicht von der Versicherung gedeckte Schäden könnten also kleinere Betriebe eher destabilisieren und die Marktkonzentration verstärken. Die Österreichische Hagelversicherung sieht einen Selbstbehalt von 30% vor.⁸ Überhaupt sind im europäischen Landwirtschaftssektor nur 20-30% der Verluste durch private und öffentliche Versicherungen oder EU-weite Ordnungen wie die Gemeinsame Agrarpolitik (GAP) gedeckt⁹. Grundsätzlich gibt es bereits viele landwirtschaftliche Anpassungsstrategien abseits von Bewässerung und Ernteausfallversicherung, wie veränderte Pflugintensität, Mulchen oder Pflanzenkulturanpassung (Hanger-Kopp & Palka, 2022).

Steigendes Risiko trifft nicht alle gleich

Stadt und Land sind unterschiedlich betroffen und erfordern teils unterschiedliche Strategien. Grundsätzlich gilt, dass die Wasserhaltekapazität von Landschaften und urbanen Gebieten gesteigert werden muss. Maßnahmen wie die Renaturierung und der Schutz von Flüssen, Mooren und Auenlandschaften helfen nicht nur dabei, mehr Wasser für Dürrezeiten zu speichern, sondern sind gleichzeitig auch hochrelevant für den Hochwasserschutz, da sie Überflutungsgebiete bereitstellen. Im Städtebau werden Konzepte wie die Schwammstadt schon länger diskutiert und finden erste Anwendung.¹⁰ Schwammstädte können Wasser absorbieren, filtrieren, zurückhalten und reinigen, wenn es Niederschläge gibt, und Wasser abgeben, wenn es trocken ist. Die Schwammstadt besteht aus Feuchtgebieten, Wäldern, Seen, Gründächern, biologischer Rückhaltung und durchlässigen Belägen usw. (Guan et al., 2021).

⁷ [bbc.com/news/science-environment-62554872](https://www.bbc.com/news/science-environment-62554872).

⁸ [derstandard.de/story/3000000279814/duerreversicherung-senkung-des-staatlichen-zuschusses-erhoehrt-kosten-fuer-bauern](https://www.derstandard.de/story/3000000279814/duerreversicherung-senkung-des-staatlichen-zuschusses-erhoehrt-kosten-fuer-bauern).

⁹ fi-compass, 20205. fi-compass.eu/library/market-analysis/insurance-and-risk-management-tools-agriculture-eu.

¹⁰ wien.gv.at/umwelt/parks/schwammstadt.html.

Nationale Bewältigungsstrategien sind wichtig, stoßen aber spätestens bei geteilten Wasserressourcen wie grenzüberschreitenden Flüssen an Grenzen. Eine gemeinsame Verwaltung der geteilten Wasserressourcen von Anrainerstaaten ist zwar in der EU gängig, um Konflikte zu vermeiden, und im weltweiten Vergleich vorbildlich¹¹. Die Frage ist aber, wie gut eine solche Aufteilung im extremen Krisenfall noch funktioniert. Hier zeigte etwa die Coronapandemie, wie schnell es einen Rückfall auf einzelstaatliche Interessen geben kann.

*Anpassungs- und
Bewältigungsstrategie
n benötigt*

Satellitengestützte *Fernerkundung* wird zur Überwachung von Bodenfeuchte genutzt.¹² Außerdem ist die EU-weite Überwachung im Projekt „European Drought Observatory for Resilience and Adaptation“ (EDORA) vorgesehen, das die Widerstandsfähigkeit gegen Dürren und die Anpassung in der gesamten EU verbessern soll.¹³ Zusätzlich gibt es ein eigenes Monitoring für die Alpenregion.¹⁴ Die Wasserresilienzstrategie der EU sieht Landwirtschaftsmethoden wie Tröpfchenbewässerung, die Reduktion von Verschmutzung mit Nährstoffen aus *Dünger* und *Pestiziden* sowie die Wiederverwendung von Wasser vor. Außerdem sollen Lecks in Wasserleitungen mittels Smart Meter und *Fernerkundung* schneller identifiziert werden, Wasser in der Energieproduktion wiederverwendet und wassersparende Praktiken in die Richtlinie über Industrieemissionen aufgenommen werden.¹⁵ Der Schutz von Gewässern, Feuchtgebieten und Böden ist Teil der nationalen Pläne für Gewässer,¹⁶ Feuchtgebiete und Moore,¹⁷ sowie Boden¹⁸. Der Aktionsplan der Österreichischen Strategie zur Anpassung an den Klimawandel sieht eine integrative Herangehensweise mit Renaturierung von Feuchtgebieten und Schutz von Retentionsräumen, einem adaptiven Trockenheitsrisikomanagement sowie der gezielten Bewusstseinsbildung der Bevölkerung zur Schonung der Wasserressourcen vor (BMK, 2024). Eine umfassende nationale Dürresilienzstrategie für Österreich fehlt jedoch derzeit. Abzusehen bleibt, inwiefern der Aktionsplan Wasser von 2025¹⁹ für den Wissenstransfer zu Wasserressourcen dazu beitragen kann. 2025 wurden zusätzliche Mittel für Trinkwasserversorgungsprojekte, die Sanierung der Abwasserkanäle und Kläranlagen, und die Renaturierung von Gewässern bewilligt.²⁰

*Strategischer und
systematischer
Umgang mit der
Ressource Wasser*

¹¹ read.oecd-ilibrary.org/governance/international-regulatory-co-operation-case-studies-vol-3/transboundary-water-management_9789264200524-4-en#page3.

¹² inbo-news.org/addressing-droughts-in-the-danube-river-basin-2/.

¹³ drought.emergency.copernicus.eu/tumbo/edo/map/.

¹⁴ ado.eurac.edu.

¹⁵ eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX%3A52025DC0280&qid=1750857768458.

¹⁶ bmluk.gv.at/themen/wasser/wisa/ngp/ngp-2021.html.

¹⁷ bmluk.gv.at/themen/wasser/wasser-eu-international/europaeische-und-internationale-wasserwirtschaft/feuchtgebiete/ramsar-strategien.html.

¹⁸ bmluk.gv.at/themen/regionen-raumentwicklung/raumordnung-und-bodenpolitik/beschlussbodenstrategie.html.

¹⁹ ffg.at/sites/default/files/2025-06/Aktionsplan_Waters%20Mission_Juni%202025.pdf.

²⁰ bmluk.gv.at/service/presse/wasser/2025/totschnig-171-millionen-euro-fuer-oesterreichs-wasserinfrastruktur.html.

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Es ist dringend notwendig, die Auswirkungen von Dürren weiter zu reduzieren, indem ein europäischer Ansatz zur Steuerung von Dürren auf internationaler Ebene entwickelt und umgesetzt wird, z. B. in Form einer Richtlinie, die das nationale Dürremanagement stärkt und die Schäden für Mensch und Natur abmildert (Blauhut et al., 2022). Dies könnte im Rahmen der seit Ende 2025 alle zwei Jahre stattfindenden Foren²¹ entwickelt werden.

Wichtig ist das Zusammenspiel aus Hochwasser- und Dürreschutz und der Einsatz naturbasierter Lösungen, wie z. B. naturnahe Fluss- und Auenlandschaften und Schwammstädte, wobei auch über den verbesserten Schutz unversiegelter Flächen beiden Problemlagen gleichzeitig begegnet werden kann.²² Längerfristig werden fast alle Flusseinzugsgebiete betroffen sein. Da die Alpen eine besonders wichtige Regulierungsfunktion haben (AAR2, 2025), wäre eine Zusammenarbeit im gesamten Alpenraum entscheidend. In der Landwirtschaft sind nachhaltige (Wieder-)Nutzung von Wasser, Bodenmanagement und Vegetationsdecke, trockenheitsresistente Kulturen, vertikale Landwirtschaft oder auch veränderte Landnutzungsplanung notwendig. In den Bereichen Energie und Verkehr müssen Vorbereitungen auf Störungen des Gütertransports auf Wasserstraßen sowie von Wasserkraftwerken und Kraftwerkskühlung getroffen werden. In der Trinkwasserversorgung sind die Förderung des Wassersparens in Haushalten und Industrie und zusätzliche Versorgungs- und Speicherinfrastrukturen nötig.²³ Eine langfristige Strategie sollte sich auch mit den möglichen Auswirkungen der unvollständigen Versicherung von Schäden sowie von Rückversicherungslücken auf die Marktzusammensetzung in der Landwirtschaft sowie die Lebensmittelsicherheit befassen.

*Einheitliches
Dürremanagement
in Europa gefordert*

*Naturbasierte
Lösungen – Synergien
aus Dürre- und
Hochwasserschutz
nutzen*

*Diverse
Anpassungsstrategien
notwendig*

VORSCHLAG FÜR DAS WEITERE VORGEHEN

Während akute Nothilfen in Dürren unabdingbar sind, könnten vor allem diverse vorausschauende Bewältigungs- und Anpassungsstrategien, die die Resilienz gegenüber Dürren in Stadt und Land stärken, entwickelt und regional angepasst werden. Auch das Lernen von anderen Weltregionen mit langer Erfahrung mit Dürren, wie Kalifornien, Singapur oder Spanien, könnte forciert werden. Eine vorausschauendes TA-Projekt, dass den Austausch aller relevanten Akteure aus Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft fördert, könnte hier ein Ansatzpunkt sein.

*Harmonisierte
Dürresilienz auf
EU-Ebene, spezifische
regionale Strategien*

²¹ commission.europa.eu/topics/environment/water-resilience-strategy_en.

²² donau-uni.ac.at/de/aktuelles/news/2023/praeventionsstrategien-fuer-extreme-ueberschwemmungsereignisse.html.

²³ eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=COM:2021:82:FIN.

ZITIERTE LITERATUR

- AAR2 (D. Huppmann, M. Keiler, K. Riahi, H. Rieder, eds.) (2025). Second Austrian Assessment Report on Climate Change of the Austrian Panel on Climate Change (APCC). Austrian Academy of Sciences Press, Vienna, Austria. aar2.ccca.ac.at.
- Abbate et al. (2019). Wildfire Impacts on Slope Stability Triggering in Mountain Areas. *Geosciences*, 9(10), 417. doi.org/10.3390/geosciences9100417.
- Birghila, C., et al. (2022). Risk-layering and optimal insurance uptake under ambiguity: With an application to farmers exposed to drought risk in hocAustria. *Risk Analysis*, 42(12), 2639-2655. doi:10.1111/risa.13884.
- Blauhut, V., et al. (2022). Lessons from the 2018–2019 European droughts: a collective need for unifying drought risk management. *Natural hazards and earth system sciences*, 22(6), 2201-2217.
- Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie (BMK). (2024). Österreichische Strategie zur Anpassung an den Klimawandel. Teil 2 – Aktionsplan. [bundeskanzleramt.gv.at/dam/jcr:084d09af-dcb9-43d7-adf2-10aac7b0e56/93_14_beilage_1_nb.pdf](https://www.bundeskanzleramt.gv.at/dam/jcr:084d09af-dcb9-43d7-adf2-10aac7b0e56/93_14_beilage_1_nb.pdf).
- de Brito, M. M. (2021). Compound and cascading drought impacts do not happen by chance: A proposal to quantify their relationships. *Science of The Total Environment*, 778, 146236. doi:10.1016/j.scitotenv.2021.146236.
- Guan, X., Wang, J., & Xiao, F. (2021). Sponge city strategy and application of pavement materials in sponge city. *Journal of Cleaner Production*, 303, 127022. doi:10.1016/j.jclepro.2021.127022.
- Hanger-Kopp, S., & Palka, M. (2022). Decision spaces in agricultural risk management: a mental model study of Austrian crop farmers. *Environment, Development and Sustainability*, 24(5), 6072-6098. doi:10.1007/s10668-021-01693-6.
- Kempf, M. (2023). Enhanced trends in spectral greening and climate anomalies across Europe. *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(2), 260. doi:10.1007/s10661-022-10853-8.
- Naumann, G., Cammalleri, C., Mentaschi, L., & Feyen, L. (2021). Increased economic drought impacts in Europe with anthropogenic warming. *Nature Climate Change*, 11(6), 485-491. doi:10.1038/s41558-021-01044-3.
- Netherer, S., Panassiti, B., Pennerstorfer, J., & Matthews, B. (2019). Acute Drought Is an Important Driver of Bark Beetle Infestation in Austrian Norway Spruce Stands. *Frontiers in Forests and Global Change*, 2. doi:10.3389/ffgc.2019.00039.
- Radolinski, J. et al. (2025). Drought in a warmer, CO2-rich climate restricts grassland water use and soil water mixing. *Science* 387, 290-296. DOI:10.1126/science.ado0734.
- Shah, J., et al. (2022). Increasing footprint of climate warming on flash droughts occurrence in Europe. *Environmental Research Letters*, 17(6), 064017. doi:10.1088/1748-9326/ac6888.

3 AKTUELLE EPTA-STUDIEN

European Parliamentary Technology Assessment (EPTA)¹ ist ein Netzwerk von Einrichtungen, die direkt für ihre jeweiligen Parlamente Studien im Bereich Technikfolgenabschätzung erstellen. Aktuell hat das Netzwerk weltweit 24 Mitglieder, darunter sehr viele Länder aus Europa, aber auch aus Nord- und Lateinamerika sowie Asien. Um potenziell auch für das österreichische Parlament relevante Studien zu finden, wurde für diesen Monitoringbericht die EPTA-Datenbank² ausgewertet. Die Suche nach Projektberichten und Policy Briefs im Zeitraum von 11/2025 bis 04/2026 ergab insgesamt 67 Einträge (ohne ITA und EPTA). Diese Dokumente wurden in der Folge anhand der im Abschnitt 1.2 beschriebenen Relevanzkriterien ausgewertet, wobei insbesondere die Österreichrelevanz eine Rolle spielte.

Auswertung der EPTA-Datenbank ergab für den Berichtszeitraum insgesamt 67 Themen

Folgende Themen wurden jüngst international behandelt:³

Jüngst behandelte Themen im Überblick

- *Bio-/Lebenswissenschaften*: Biosicherheit, Alternativen zu Tierversuchen
- *Energie*: Energie-Mix, Erneuerbare, CO₂-Neutralität, Natrium-Ionen-Batterien, Recycling von Windkraftanlagen, Smart Meter, Erneuerbarer Wasserstoff, Nordsee-Öl und -Gas
- *Gesundheit/Medizin*: Astronautengesundheit, Nährstoffneutralität, Seltene Krankheiten, Dyskalkulie, Pflege von Kindern, Hautkrankheiten, Geistige Gesundheit in der Schwangerschaft, Neurologische Entwicklungsstörungen, Sichelzellenanämie, Straßendrogen, Leihmutterschaft, Xenotransplantation
- *Industrie*: Industrieroboter, KI und Kollektivvertragsverhandlungen, Zukunft der Metallindustrie
- *Informationstechnologien*: Deepfakes, Regulatorische Vereinfachung, polizeiliche Gesichtserkennung, Quantentechnologien und Dekarbonisierung, Datenzentren und Nachhaltigkeit
- *Justiz/Inneres/Demokratie*: Prozesskostenhilfe, Grenzschutz: Fahrzeugdurchleuchtung, Deepfakes, Einwanderungspolitik, Empfehlungsalgorithmen und Wahlen, Digitalisierung und Sicherheit, Straßen-Drogen, Gesichtserkennung in der Polizeiarbeit
- *Künstliche Intelligenz*: Arbeitsmarkt, Betrug und unrechtmäßige Zahlungen, Kollektivvertragsverhandlungen, Robotik, Superintelligenz, Datenzentren im Weltraum, Grenzen von generativer KI
- *Landwirtschaft*: Zellbasierte Landwirtschaft, Technisch hergestellter Biodünger
- *Umwelt*: Kreislaufwirtschaft, Tiefseebergbau, Deponie-Altlasten, Quantentechnologie und Dekarbonisierung, Sonnen-Geoengineering, Weltraumwetter, Klimafreundliche Schifffahrt, Plastikabfall in Ozeanen, Wetterbeeinflussung, Datenzentren und Nachhaltigkeit
- *Verkehr*: Brückensanierung, Klimafreundliche Schifffahrt
- *Weltraum*: Astronautengesundheit, Weltraumwetter, Datenzentren im Weltraum
- *Wirtschaft*: Spieleindustrie, Wirtschaftswachstum und nationale Sicherheit, Zusammenarbeit Wissenschaft-Wirtschaft

¹ eptanetwork.org.

² eptanetwork.org/database/policy-briefs-reports.

³ Teils Mehrfachzuordnungen.

- *Wissenschaft allgemein*: Zusammenarbeit Wissenschaft-Wirtschaft, Geopolitik und Wissenschaftspolitik, Zukunft der weltweiten Wissenschaftskooperation, Methoden für strategische Foresight, Wissenschaft und Sport, Alternativen zu Tierversuchen; Elektronenbeobachtung

Zur näheren Betrachtung durch das österreichische Parlament werden aufgrund der Relevanz für Österreich, der Aktualität und weil es dazu für Österreich noch keine spezifischen Studien gibt, folgende internationale Studien vorgeschlagen:⁴

Thema	Titel der Studie	Land; Institution	Jahr
Gesichtserkennung	Facial recognition technology in policing [Gesichtserkennung in der Polizeiarbeit]	UK; POST	2026-04
Deepfakes	Rechtliche und gesellschaftliche Herausforderungen und Potenziale von Deepfakes	Deutschland; TAB	2026-03
Robotik	Robotics in the AI Era [Robotik im Zeitalter der KI]	Japan, RLRB	2026-03
Windkraft	Wiederverwertung und Entsorgung von Rotorblättern aus Windenergieanlagen	Deutschland; TAB	2026-03
Energiespeicher	Energiespeicher der nächsten Generation: Natrium-Ionen-Batterien im Fokus	Deutschland; TAB	2026-02
Datenzentren	What are data centres and how sustainable are they? [Was sind Datenzentren und wie nachhaltig sind sie?]	UK; POST	2026-03
Quantentechnologien	Quantum technologies: Can they boost Europe's decarbonisation? [Quantentechnologien: Können sie Europas Dekarbonisierung vorantreiben?]	EU; STOA	2026-02
Biotechnologie	Towards a Responsive Biotech Policy – Listening, Responding, and Collaborating for Safe and Responsible Biotechnology [In Richtung verantwortungsvoller Biotech-Politik – Zuhören, Antworten und Zusammenarbeiten für sichere und verantwortungsvolle Biotech]	Niederlande; RATH	2026-02
Biologische Sicherheit	Biosafety and Biosecurity: Comparing the U.S. and Selected G20 Members [Biologische Sicherheit und Biosicherheit: Ein Vergleich zwischen den USA und ausgewählten G20-Mitgliedstaaten]	USA; STAA	2026
Betrugsbekämpfung mit KI	Fraud and Improper Payments: Data Quality and a Skilled Workforce Are Essential for Realizing Artificial Intelligence's Benefits [Betrug und unrechtmäßige Zahlungen: Datenqualität und qualifizierte Fachkräfte sind entscheidend für die Nutzung der Vorteile KI]	USA; STAA	2026
Landwirtschaft ohne Tiere	Cell-Based Agriculture: Meat, Milk and Eggs Without Animals [Zellbasierte Landwirtschaft: Fleisch, Milch und Eier ohne Tiere]	Norwegen; NBT	2025-12
KI	Superintelligence, Power and Human Rights [Superintelligenz, Macht und Menschenrechte]	Norwegen; NBT	2025-12

⁴ Es besteht die Möglichkeit, dass das österreichische Parlament (gegebenenfalls die Über-
setzung sowie) eine Kurzfassung und Übertragung auf österreichische Verhältnisse der
genannten Studien von EPTA-Einrichtungen beauftragt.



ÖAW



WWW.OEAW.AC.AT