



ÖSTERREICHISCHE
AKADEMIE DER
WISSENSCHAFTEN



BERICHT

WIEN, NOVEMBER/2025

ITA-2025-05

WWW.OEAW.AC.AT/ITA

FORESIGHT UND TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG: MONITORING VON ZUKUNFTSTHEMEN FÜR DAS ÖSTERREICHISCHE PARLAMENT

NOVEMBER 2025



FORESIGHT UND TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG: MONITORING VON ZUKUNFTSTHEMEN FÜR DAS ÖSTERREICHISCHE PARLAMENT

NOVEMBER 2025

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*

Autor:innen *Fabian Fischer* [FF] (ITA)

Niklas Gudowsky-Blatakes [NG] (ITA)

Christoph Kehl [CK] (ITAS)

Bettina-Johanna Krings [BJK] (ITAS)

Dana Mahr [DM] (ITAS)

Michael Nentwich [MN] (ITA)

Anna Pauls [PA] (ITA)

Pauline Riousset [PR] (ITAS)

Jean Schmitt [JS] (ITA)

Nora Weinberger [NW] (ITAS)

Bericht im Auftrag des österreichischen Parlaments

Wien, November/2025

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-2025-05 (Wien, November/2025)

ISSN: 1819-1320

ISSN-online: 1818-6556

epub.oeaw.ac.at/ita/ita-projektberichte/ITA-2025-05.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
ORGAN-ON-A-CHIP	15
NACHHALTIGE KI-RECHENZENTREN	21
PFAS-ENTFERNUNGSTECHNOLOGIEN	27
ALPINE NATURGEFAHREN IM KLIMAWANDEL	33
FINFLUENCER	39
KI-TUTOREN: EIN BEITRAG ZU BILDUNGSGERECHTIGKEIT?	45
RESILIENTE DÜNGERVERSORGUNG (AKTUALISIERT)	51
EMOTIONSERKENNUNG ALS HOFFNUNGSGEBIET DER KI? (AKTUALISIERT)	57
SONNENSTÜRME UND WELTRAUMWETTER (AKTUALISIERT)	63
BIOCOMPUTER (AKTUALISIERT)	69
NEGATIVEMISSIONSTECHNOLOGIEN (AKTUALISIERT)	75
EIN NICHT-ENGLISCHES SPRACHMODELL (AKTUALISIERT)	81
3 AKTUELLE EPTA-STUDIEN	87

ZUSAMMENFASSUNG

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

Menschliche Organe auf Chips (Organs-on-a-Chip) sind menschliches Gewebe auf Membran mit Steuerungsmöglichkeit, die Teile von Organen bis mehrere Organe imitiert, etwa ausdehnendes und zusammenziehendes Lungengewebe. Das Gewebe wird Stimuli ausgesetzt – etwa Medikamenten und Chemikalien – und die Reaktion darauf mit Sensoren gemessen. Auch wenn Organs-on-a-Chip derzeit kein vollständiger Ersatz für Tierversuche sind, so können sie helfen, diese zu reduzieren. Teilweise bieten sich auch signifikante Vorteile gegenüber Untersuchungen an Versuchstieren, wie die höhere Aussagekraft für Menschen. Mangelnde Standardisierung und der begrenzte Zugang zu geeigneten menschlichen Zellen sind derzeit noch große Hürden, teilweise sind die Kosten auch noch höher als bei Tierversuchen. Doch auch Fragen mit gesellschaftlicher Relevanz sind noch zu klären, etwa wie Untersuchungen auf Basis von Zellgewebe einzelner Patient:innen repräsentativ für die breite Bevölkerung sein können und wie passende Zellen gewonnen werden sollen.

Organ-on-a-chip

Der weltweite Ausbau von Rechenzentren beschleunigt sich durch den Boom künstlicher Intelligenz. Damit steigen Energie-, Wasser- und Rohstoffverbräuche deutlich an. KI-Rechenzentren haben eine bis zu 30-mal höhere Leistungsdichte als herkömmliche Anlagen; ihr Strombedarf könnte sich bis 2030 verdoppeln. Kühltechnologien verursachen zudem einen hohen Wasserverbrauch, während kurze Hardwarezyklen zu steigenden Mengen an Elektroschrott führen. Trotz Effizienzgewinnen bleibt der ökologische Fußabdruck erheblich. Die EU führte ab 2024 Berichtspflichten für große Rechenzentren ein und prüft Mindeststandards für Energie- und Wassereffizienz. Österreich verfügt mit seinem hohen Anteil erneuerbarer Energie, gut ausgebauten Fernwärmesetzungen und dem neuen Umweltzeichen für Rechenzentren über günstige Voraussetzungen, benötigt jedoch verbindliche Nachhaltigkeitskriterien und Anreize für Abwärmenutzung und Kreislaufwirtschaft, um ökologische und wirtschaftliche Interessen auszubalancieren.

*Nachhaltige
KI-Rechenzentren*

PFAS, auch als „ewige Chemikalien“ bezeichnet, stellen aufgrund ihrer hohen Persistenz, Mobilität und potentiellen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit eine erhebliche Herausforderung für die Aufbereitung von Trink- und Abwasser dar. Die Einführung verbindlicher Grenzwerte für PFAS erhöht den Bedarf an effizienten Entfernungstechnologien. Für zahlreiche Verfahren wurde die Wirksamkeit unter Laborbedingungen nachgewiesen, es existieren jedoch bislang keine skalierbaren, industriell einsetzbaren Lösungen, um PFAS-Moleküle zu zerstören und dauerhaft aus der Umwelt zu entfernen. Derzeit basieren etablierte Methoden hauptsächlich auf Adsorption an Aktivkohle und Ionenaustauschharzen sowie auf Membranverfahren, die PFAS zwar effektiv aus dem Wasser entfernen, jedoch nicht zerstören. Destruktive Verfahren werden derzeit intensiv untersucht, um die PFAS-Moleküle zu zerstören.

*PFAS-Entfernungs-
technologien*

Die globale Erwärmung führt in den Alpen zu rascher Gletscherschmelze, zum Auftauen von Permafrost und geänderten Niederschlagsmustern. Dies destabilisiert Hochgebirgsregionen und erhöht die Gefahr von Erdrutschen, Bergstürzen, Gletscherabrücken und Gletscherseeausbrüchen. Der katastrophale Bergsturz im Schweizer Blatten rückte das Thema „alpine Naturgefahren im Klimawandel“ ins Zentrum der österreichischen Öffentlichkeit und Politik. Fernerkundung ist bei der Bewertung von Naturgefahren entscheidend. Drohnen, Helikopter und Flugzeuge können mit Sensoren wie RGB-, Multispektral-, Wärme-, Hyperspektral-, Lidar- und GPR ausgestattet werden, um Massebewegungen aller Art zu untersuchen. Regelmäßige Drohnen- und Satellitendaten ermöglichen genaue 3D-Modelle der Landesoberfläche. Flächendeckendes Laserscanning wird bereits in einigen Regionen genutzt, vor allem aber nach Naturgefahrenereignissen. Zukünftig könnte ein bundesweites System bei Prognosen helfen.

*Alpine Naturgefahren
im Klimawandel*

Finanz-Influencer (sog. Finfluencer) stellen Finanzthemen auf sozialen Medien einfach und verständlich dar. Manche vermitteln generelle Finanzkompetenz. Viele bewerben aber bestimmte Aktien, Kryptowährungen und andere Anlageprodukte, oft in Zusammenarbeit mit Unternehmen. Dabei fehlt vielen Finfluencern eine formale Ausbildung oder Zertifizierung im Finanzbereich, was zu Bedenken hinsichtlich Fehlinformationen, riskanter Anlageempfehlungen und mangelnder Risikostreuung führt. Besonders problematisch ist, dass die bei zertifizierter Finanzberatung bestehenden Anforderungen in Bezug auf die Berücksichtigung des persönlichen Risikoprofils der Kund:innen und Information über die Risiken der Finanzprodukte wegfallen. Hinzu kommt, dass Profile von Finfluencer:innen mit seriösen Absichten nur schwer von jenen mit verdeckten Interessenskonflikten oder gar von KI-Bots und Scammern zu unterscheiden sind. Derzeit sind Bestrebungen zur Regulierung und zur Information der Konsument:innen noch in den Anfängen.

Finfluencer

KI-Tutorensysteme analysieren Lernfortschritte, passen Inhalte an und geben sofortiges Feedback. Sie können Lernen individueller und gerechter gestalten, indem sie Schüler:innen aus einkommensschwachen oder bildungsfernen Familien gezielt fördern. Ihre Wirksamkeit hängt von pädagogischen Konzepten, funktionierender Infrastruktur und Datenschutz ab. Der EU-AI-Act stuft Bildungs-KI als Hochrisiko ein und verlangt Transparenz und Kontrolle. Um dennoch die Potenziale dieser Technologie im Bildungsbereich verantwortungsvoll nutzen zu können, muss ihr Einsatz untrennbar mit pädagogischer Qualität verbunden werden. Nur wenn technologische Innovation mit didaktischer und ethischer Reflexion einhergeht, können Effizienzgewinne erzielt werden, ohne dass soziale Verantwortung und Bildungsgerechtigkeit verloren gehen. Entsprechend sollte der Einsatz von KI-Tutoren bildungspolitisch und ethisch begleitet werden (klare Qualitätsstandards, gerechte Zugänge, Forschung zu sozialen Wirkungen).

*KI-Tutoren:
ein Beitrag zu
Bildungsgerechtigkeit?*

Weiters wurden folgende sechs sozio-technische Themen aus dem Bericht von Mai 2024 auf Aktualisierungsbedarf untersucht und aktualisiert:

- Resiliente Düngerversorgung
- Emotionserkennung als Hoffnungsgebiet der KI?
- Sonnenstürme und Weltraumwetter
- Biocomputer
- Negativemissionstechnologien
- Ein nicht-englisches Sprachmodell

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

- Geoengineering
- Inklusion
- Bibliotheken
- Starkregen in der Stadt
- Textil-Recycling
- Weltraumpolitik
- Digitale Souveränität
- Neurowissenschaften
- Humanoide Roboter
- Plattform-Arbeit

*Aktuelle Studien
anderer
parlamentarischer
TA-Einrichtungen*

Zu all diesen Themen liegen aktuelle Endberichte von TA-Einrichtungen aus Deutschland, Finnland, Frankreich, Luxemburg und Norwegen 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. *Quellenauswertung*
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 öffentlichen Debatte dazu.*Themenselektion*
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.

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:

- 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.
- 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.
- 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.

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; akatech; World Economic Forum, 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.

Als spezifische Basisquellen für diese Berichtsversion dienten folgende Sekundärquellen:

- Acatech Technikradar 2025⁴ und sonstige Acatech-Publikationen⁵
- HTA-Horizon Scans (Canada's Drug Agency, NIHR-Innovation Observatory UK)⁶
- Dubai Future Opportunities Report – The global 50 – 2025 Report⁷
- Dubai future foundation⁸
- Futures4Europe.eu⁹
- GOV.UK foresight¹⁰
- Policy Horizons Canada¹¹
- The Future Today Institute: 2025 Tech Trends Report¹²

**Für diesen Bericht
spezifisch
ausgewertete Quellen**

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 technikradar.acatech.de/technikradar-2025/.

⁵ acatech.de/publikationen/.

⁶ cda-amc.ca.

⁷ dubaifuture.ae/wp-content/uploads/2025/03/The-Global-50-2025-Eng.pdf.

⁸ week.dub.ai/wp-content/uploads/2025/07/Re-Imagining-Business-with-AI.pdf.

⁹ futures4europe.eu.

¹⁰ gov.uk/government/groups/futures-and-foresight.

¹¹ horizons.gc.ca/en/our-work/.

¹² ftsg.com/trends/.

2 AKTUELLE SOZIO-TECHNISCHE ENTWICKLUNGEN

Die folgenden sechs sozio-technischen Entwicklungen wurden im Berichtszeitraum Mai 2025 bis November 2025 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
Mai 2025
bis November 2025*

Neue Themen November 2025

- Organ-on-a-chip
 - Nachhaltige KI-Rechenzentren
 - PFAS-Entfernungstechnologien
 - Alpine Naturgefahren im Klimawandel
 - Finfluencer
 - KI-Tutoren: ein Beitrag zur Bildungsgerechtigkeit?
-

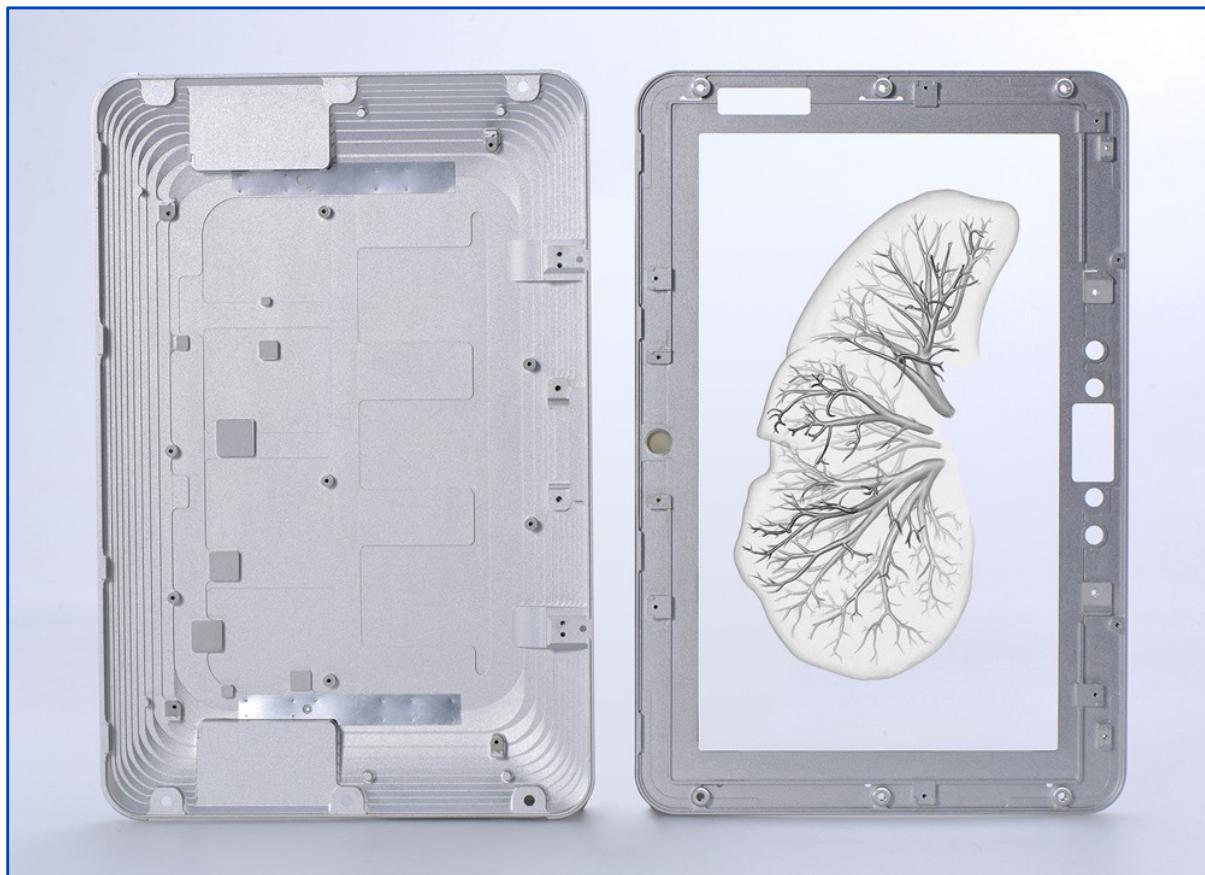
6 neue Themen

Aktualisierte Themen vom Mai 2024

- Resiliente Düngerversorgung
 - Emotionserkennung als Hoffnungsgebiet der KI?
 - Sonnenstürme und Weltraumwetter
 - Biocomputer
 - Negativemissionstechnologien
 - Ein nicht-englisches Sprachmodell
-

6 aktualisierte Themen

ORGAN-ON-A-CHIP



© CC0 (Thomas Bayer, Mastars/unsplash, Europeana/unsplash)

ZUSAMMENFASSUNG

Menschliche Organe auf Chips (Organs-on-a-Chip) sind menschliches Gewebe auf Membran mit Steuerungsmöglichkeit, die Teile von Organen bis mehrere Organe imitiert, etwa ausdehnendes und zusammenziehendes Lungengewebe. Das Gewebe wird Stimuli ausgesetzt – etwa Medikamenten und Chemikalien – und die Reaktion darauf mit Sensoren gemessen. Auch wenn Organs-on-a-Chip derzeit kein vollständiger Ersatz für Tierversuche sind, so können sie helfen, diese zu reduzieren. Teilweise bieten sich auch signifikante Vorteile gegenüber Untersuchungen an Versuchstieren, wie die höhere Aussagekraft für Menschen. Mangelnde Standardisierung und der begrenzte Zugang zu geeigneten menschlichen Zellen sind derzeit noch große Hürden, teilweise sind die Kosten auch noch höher als bei Tierversuchen. Doch auch Fragen mit gesellschaftlicher Relevanz sind noch zu klären, etwa wie Untersuchungen auf Basis von Zellgewebe einzelner Patient:innen repräsentativ für die breite Bevölkerung sein können und wie passende Zellen gewonnen werden sollen.

Organ-on-a-Chip-Systeme können Tierversuche teilweise bereits ersetzen, einige Hindernisse und Fragen bleiben

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Organs-on-a-Chip (OOC) sind kleine, experimentelle Laborwerkzeuge, die menschliche Zellen enthalten und über Mikrofluide gesteuert und überwacht werden. Zum Beispiel kann es sich dabei um Lungengewebe handeln, das sich wie eine atmende Lunge ausdehnt und zusammenzieht (GAO, 2025). Das Besondere an OOCs besteht somit darin, dass sie das Verhalten menschlicher Organe bzw. von Organteilen imitieren. OOCs stellen eine Zwischenstufe zwischen Zellkulturen in Petrischalen auf der einen Seite, und Untersuchungen an lebenden Organismen dar: Sie erlauben es, Zellen unterschiedlichen Typs, die in einem Organ vorkommen, dreidimensional zu arrangieren, womit sich komplexere Vorgänge untersuchen lassen als in Petrischalen. Für viele Untersuchungen ist hingegen ein ganzer Organismus nicht notwendig – und er erlaubt auch nicht die enge Überwachung, die OOCs ermöglichen (siehe unten). Häufig werden Teile des Verdauungstrakts, der Leber, der Niere, des Herzens oder des Gehirns imitiert. Teilweise werden mehrere dieser Chips auch miteinander verbunden, um ein gesamtes Organsystem oder Teile davon zu simulieren.

Organs-on-a-chip werden oft auch als mikrophysiologische Systeme oder Microfluid Tissue Chips bezeichnet (Nahon et al., 2024; GAO, 2025) und sind besonders für die pharmazeutische und chemische Industrie, die Medizin sowie den Bereich der Biosicherheit relevant. Sie dienen dazu, das Verständnis menschlicher Krankheiten, der Wirkung verschiedener Stoffe auf den menschlichen Organismus sowie der menschlichen Entwicklung zu verbessern. Während manche Organoide entwickelt werden, um in lebende Organismen implantiert zu werden (siehe *Hirnorganoide*), ist dies bei OOCs nicht das Ziel.

Üblicherweise besteht ein Organ-on-a-Chip aus Organgewebe – das aus einem oder mehreren Zelltypen zusammengesetzt ist – sowie einem Medium, das die Rolle des Blutes übernimmt, in einem dreidimensionalen System. Kleine Kanäle (etwa halb so breit wie ein menschliches Haar) dienen dazu, das Medium – ein Mikrofluid – zuzuführen und wieder abzuführen (GAO, 2025). Um die Reaktion des Gewebes auf Stoffe zu untersuchen, werden diese in das zugeführte Medium eingebracht. Sensoren in den Abflusskanälen wiederum können Aufschluss über die Reaktion des Gewebes auf die Stimuli geben. Um ein möglichst realistisches OOC zu erhalten, müssen einerseits die verschiedenen Zelltypen richtig arrangiert sein, andererseits auch die chemischen und mechanischen Stimuli adäquat imitiert werden. Die richtige dreidimensionale Anordnung kann durch 3D-Druck realisiert werden (Rahmani Dabbagh et al., 2023) (siehe *Künstliche Organe – 3D-Biodruck*); teils wird jedoch auch die Fähigkeit von Stammzellen zur Selbstorganisation genutzt.

Die Integration von Organgewebe mit Sensoren bietet die Möglichkeit, das Gewebe und seine Funktion in Echtzeit zu überwachen (Mastrangeli et al., o. J.). Während einfache OOCs einzelne Organe oder Teile davon nachbauen, ist der nächste Schritt, mehrere Organe zu vernetzen, um ihre Interaktion zu untersuchen, etwa indem der Verdauungstrakt, Leber und Niere gemeinsam imitiert werden – bis zur Vision eines vollständigen „Nachbau“ des Körpers.

Nachbau von Organen mit Möglichkeit der Steuerung und Überwachung

Komplexer als Zellkulturen in Petrischalen

Relevant für Pharma, Medizin und Biosicherheit

Merkmale: Organgewebe, Medium und Dreidimensionalität

Sensoren erlauben Überwachung in Echtzeit

Die Stärken der Arbeit mit Organs-on-a-Chip liegen in der Arbeit mit menschlichen Zellen, die Geschwindigkeit und die Möglichkeit, ein einzelnes Organ sehr detailliert zu untersuchen (GAO, 2025). Durch die Arbeit mit menschlichen Zellen sind die Erkenntnisse unmittelbar für Menschen relevant: So lassen sich Studien zum menschlichen Mikrobiom im Verdauungssystem oder zum menschlichen Immunsystem nicht über Studien an Tieren durchführen. Besonders in Fällen, in denen nur einzelne Organe isoliert untersucht werden sollen, können Organs-on-a-Chip eine sehr kosteneffiziente und schnelle Option sein, die umfassendere Echtzeitmessungen ermöglicht als andere Verfahren.

*Bedeutende Stärken:
Übertragbarkeit,
Geschwindigkeit,
Kosteneffizienz,
Echtzeit-Messungen*

OOCs werden als wichtige Alternative zu Tierversuchen diskutiert. Tierversuche gehen oft mit Leiden und Schmerzen für die Versuchstiere einher. In der EU wurden im Jahr 2022 über 8 Millionen Versuchstiere herangezogen, darunter etwa 200.000 in Österreich (European Commission, 2024). Diese Zahlen umfassen Wirbeltiere und Kopffüßer, zum Großteil Säugetiere und Fische. Dabei verfolgt Österreich das sogenannte 3R-Prinzip:¹ Demnach sollen Tierversuche vermindert (reduce), die Bedingungen der Versuchstiere verbessert (refine) oder – und hier können OOCs eine Rolle spielen – Tierversuche ganz vermieden werden (replace).

*OOCs als Alternative
zu Tierversuchen ...*

Neben dem Aspekt des Tierwohls bieten OOCs weitere Vorteile gegenüber Tierversuchen: Sie können aufgrund ihrer physiologischen Nähe zum Menschen eine höhere Aussagekraft besitzen, da Ergebnisse aus Tierversuchen nicht immer direkt auf den Menschen übertragbar sind (GAO, 2025). Oft sind auch keine adäquaten Versuchstiere verfügbar (etwa zur Untersuchung des menschlichen Immunsystems). Versuche mit OOCs können auch schneller und kostengünstiger sein, wenn sich die Forschung auf einzelne Organe bzw. Organgruppen fokussiert.

*... mit größerer
Aussagekraft als
Tierversuche ...*

Dennoch können OOCs Tierversuche bis auf Weiteres nicht vollständig ersetzen: Tiere bilden einen gesamten Organismus ab und ermöglichen damit die Untersuchung dutzender Organe in einem Test. Zudem verfügt die Forschung über Jahrzehntelange Erfahrung im Umgang mit Tierversuchen. Die Grenzen und Forschungsdesigns für Tierversuche sind fest etabliert, es gibt umfangreiche Benchmarks und viel Erfahrung, wie Ergebnisse aus Tierversuchen zu interpretieren sind (GAO, 2025). Beides ist bei OOCs noch nicht ähnlich weit fortgeschritten, auch wenn es aktive Bestrebungen zur Standardisierung gibt, um Qualität und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten (Paşa et al., 2025; Piergiovanni et al., 2021). Letztlich dürften auf absehbare Zeit Tierversuche in jenen Fällen, in denen mehrere Organe bzw. deren Zusammenspiel untersucht werden soll, günstiger und schneller als OOCs bleiben.

*... dennoch bis
auf Weiteres kein
vollständiger Ersatz
für Tierversuche*

Fehlende Standardisierung ist ein Hauptgrund, weshalb OOCs in der Wirkstoffentwicklung und klinischen Studien noch keinen festen Platz haben.² Seit 2024 gibt es daher auch Anstrengungen im Rahmen der International Standards Or-

*Fehlende
Standardisierung
als Hürde*

¹ labor-tierzucht-haltung.meduniwien.ac.at/ueber-uns/das-3r-prinzip/.

² joint-research-centre.ec.europa.eu/jrc-news-and-updates/setting-out-roadmap-standardisation-organ-chip-technology-2025-01-13_en.

ganization (ISO), internationale Standards zu entwickeln.³ Die Standardisierung soll dabei unter anderem eine einheitliche Terminologie, das Design und die Herstellung von OOCs sowie das Design von Experimenten, die Datenverarbeitung und die Integration in Studiendesigns umfassen. Eine Standardisierung bietet in Zukunft die Grundlage dafür, dass Wissenschaft, Regulierungsbehörden und Industrie den Nutzen von OOCs besser evaluieren und ihre Eignung für verschiedene Einsatzzwecke besser abschätzen können.

Bedenken gegenüber OOCs beziehen sich u. a. darauf, dass menschliche Zellen verwendet werden – sie sollen schließlich menschliches Gewebe nachbilden. Oft werden diese Zellen Patient:innen entnommen. Hirnzellen müssen zum Beispiel im Zuge einer Operation oder einem Leichnam entnommen werden (GAO, 2025). Ein weiteres Bedenken ist, dass die Zellen möglicherweise nur von wenigen Spender:innen stammen und damit die genetische und biologische Diversität der Gesellschaft nicht widerspiegeln. Das wiederum hat potenzielle Auswirkungen auf die Generalisierbarkeit von OOC-Versuchen.

Nutzung menschlicher Zellen: Schwerer Zugang und Bedenken

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Österreich ist es in den letzten Jahrzehnten gelungen, im Bereich Biotechnologie und Molekularbiologie eine Reihe von international renommierten Institutionen aufzubauen, wie etwa das Vienna BioCenter, das Institute of Science and Technology Austria (ISTA) und das vor Kurzem gegründete AITHYRA-Institut zur Erforschung von biomedizinischer KI.⁴ Auch die pharmazeutische und chemische Industrie sind stark präsent in Österreich.

Österreich ist im Bereich Biotechnologie gut aufgestellt

Es ist daher wenig überraschend, dass in Österreich auch intensiv an Organoiden und OOCs geforscht wird: Die Themen reichen von der Untersuchung der Bedingungen für eine erfolgreiche Schwangerschaft mittels Organoiden, die sowohl Frühstadien von Embryos als auch der Gebärmutter imitieren,⁵ über die Entwicklung geeigneter Chips⁶ und die Erforschung von kindlichen Krebserkrankungen mithilfe von OOCs⁷, bis hin zur aktiven Mitwirkung an der Standardisierung von Verfahren mit Gehirn-Organoiden.⁸

Forschung an Organs-on-a-Chip auch in Österreich

Wie bereits erwähnt hat sich Österreich dazu verpflichtet, Tierversuche möglichst zu minimieren und durch Alternativen zu ersetzen. Zur Anerkennung der Forschung in diesem Bereich wird jährlich der Staatspreis zur Förderung von Ersatzmethoden zum Tierversuch verliehen.⁹ Wiederholt waren auch OOCs un-

Organ-on-a-Chip mit starkem Potential zur Reduktion von Tierversuchen

³ iso.org/committee/10713488.html.

⁴ oeaw.ac.at/aithyra/.

⁵ oeaw.ac.at/imba/research-highlights/news/christos-kyprianou-receives-seal-of-excellence-postdoctoral-fellowship-from-the-austrian-academy-of-sciences.

⁶ ias.tuwien.ac.at/cellchipgroup.

⁷ i-med.ac.at/mypoint/news/770555.html.

⁸ oeaw.ac.at/imba-de/ueber-imba/newsroom/news/bessere-gehirn-organoide-ein-neues-rahmenwerk-fuer-die-forschung.

⁹ bmfwf.gv.at/forschung/forschung-oesterreich/services/tierversuche/stptv.html.

ter den prämierten Ersatzmethoden. Forschung in diesem Sinne wird auch gezielt von nationalen Fördergebern finanziert.¹⁰ Auf europäischer Ebene ist geplant, dass die EU-Kommission Anfang 2026 einen Fahrplan für den schrittweisen Ersatz von Tierversuchen bei der Sicherheitsbewertung von Chemikalien vorlegen wird. Ein vollständiger Ausstieg (Phase-out) ist jedoch noch nicht absehbar, da weiterhin ein hoher Schutzstandard gewährleistet werden muss (Umweltbundesamt, 2025).

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Es wird empfohlen, auf der starken Position der österreichischen Forschungs- und Industrielandschaft in für relevanten OOC-Feldern aufzubauen und aktiv die Möglichkeiten von OOCs als Ersatz für Tierversuche auszuloten. Auch zentrale Bedenken sollten adressiert werden: Wie können in ethisch vertretbarer Weise menschliche Zellen für OOCs genutzt werden? Und wie kann sichergestellt werden, dass die Ergebnisse für alle Teile der Bevölkerung gleichermaßen valide sind? Eine transdisziplinäre Studie unter Einbeziehung breiter Expertise (Ethik, Medizin, Soziologie, Molekularbiologie, Chemie, Künstliche Intelligenz) und unter Involvierung relevanter Stakeholder (Gesundheitswesen, pharmazeutische Industrie, Forschung, Patient:innengruppen) könnte dafür eine fundierte Grundlage bieten.

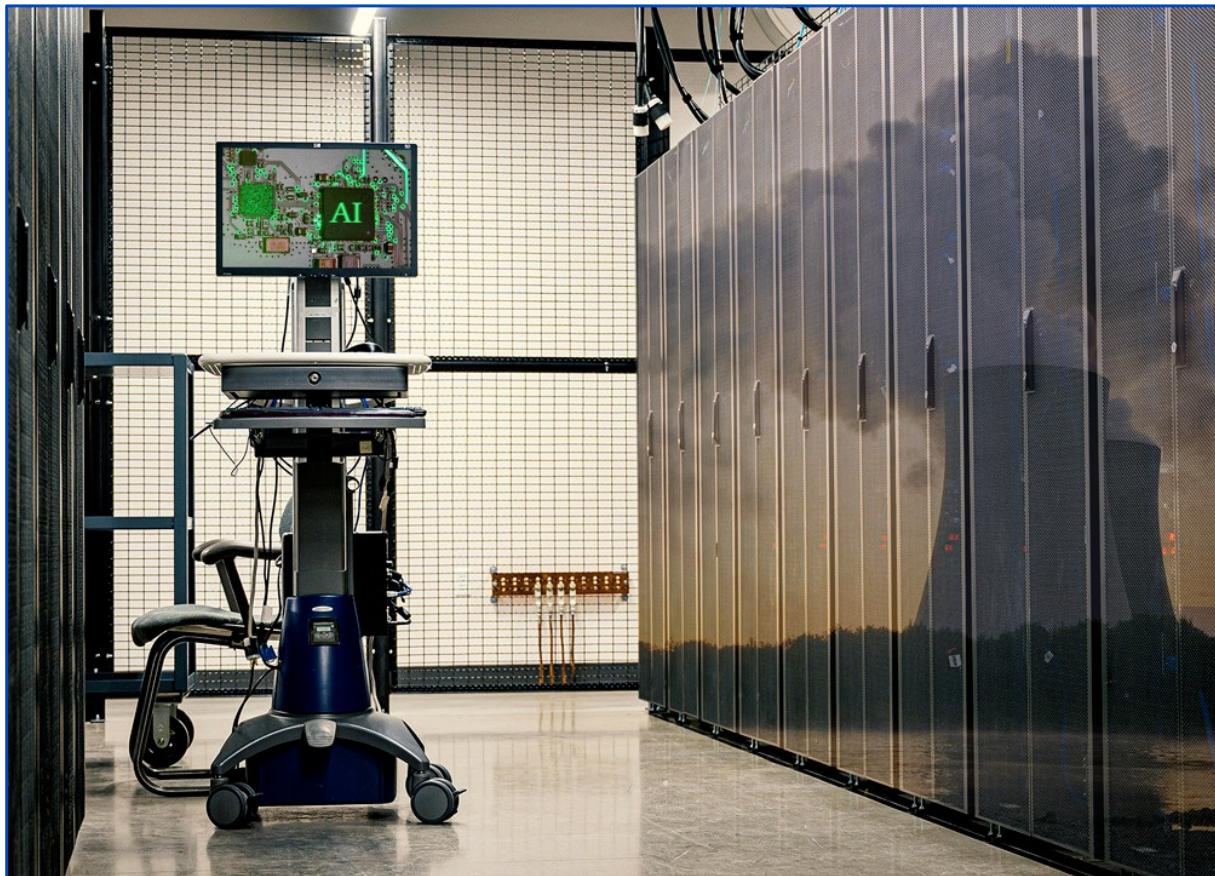
*Offene Fragen
transdisziplinär klären*

¹⁰ fwf.ac.at/foerdern/foerderportfolio/themenfoerderungen/ersatzmethoden-fuer-tierversuche.

ZITIERTE LITERATUR

- European Commission. (2024). Summary Report on the statistics on the use of animals for scientific purposes in the Member States of the European Union and Norway in 2022 (Commission Staff Working Document No. 185 final). circabc.europa.eu/ui/group/8ee3c69a-bccb-4f22-89ca-277e35de7c63/library/051e5787-7746-46cf-8a0d-310f84fd1900/details.
- GAO (United States Government Accountability Office) (2025). Human Organ-on-a-Chip. Technologies Offer Benefits Over Animal Testing but Challenges Limit Wider Adoption (Technology Assessment) [Report to Congressional Addressees]. gao.gov/products/gao-25-107335.
- Mastrangeli, M., et al. (o. J.). Organ-on-Chip In Development. ORCHID Final Report. ORCHID Project. euroocs.eu/wp-content/uploads/2022/05/ORCHID-Summary.pdf.
- Nahon, D. M., et al. (2024). Standardizing designed and emergent quantitative features in microphysiological systems. *Nature Biomedical Engineering*, 8(8), 941–962. doi.org/10.1038/s41551-024-01236-0.
- Paşca, S. P., et al. (2025). A framework for neural organoids, assembloids and transplantation studies. *Nature*, 639(8054), 315–320. doi.org/10.1038/s41586-024-08487-6.
- Piergiovanni, M., Leite, S. B., Corvi, R., & Whelan, M. (2021). Standardisation needs for organ on chip devices. *Lab on a Chip*, 21(15), 2857–2868. doi.org/10.1039/D1LC00241D.
- Rahmani Dabbagh, S., et al. (2023). 3D bioprinted organ-on-chips. *Aggregate*, 4(1), e197. doi.org/10.1002/agt2.197.
- Umweltbundesamt. (2025). 14. Umweltkontrollbericht. Umweltsituation in Österreich. Umweltbundesamt. umweltbundesamt.at/studien-reports/umweltkontrollbericht/ukb2025.

NACHHALTIGE KI-RECHENZENTREN



© CC0 (Thomas Bayer, Brett Sayles/pexels, Immo Wegmann/unsplash, Markus Distelrath/pexels)

ZUSAMMENFASSUNG

Der weltweite Ausbau von Rechenzentren beschleunigt sich durch den Boom künstlicher Intelligenz. Damit steigen Energie-, Wasser- und Rohstoffverbräuche deutlich an. KI-Rechenzentren haben eine bis zu 30-mal höhere Leistungsdichte als herkömmliche Anlagen; ihr Strombedarf könnte sich bis 2030 verdoppeln. Kühltechnologien verursachen zudem einen hohen Wasserverbrauch, während kurze Hardwarezyklen zu steigenden Mengen an Elektroschrott führen. Trotz Effizienzgewinnen bleibt der ökologische Fußabdruck erheblich. Die EU führte ab 2024 Berichtspflichten für große Rechenzentren ein und prüft Mindeststandards für Energie- und Wassereffizienz. Österreich verfügt mit seinem hohen Anteil erneuerbarer Energie, gut ausgebauten Fernwärmennetzen und dem neuen Umweltzeichen für Rechenzentren über günstige Voraussetzungen, benötigt jedoch verbindliche Nachhaltigkeitskriterien und Anreize für Abwärmenutzung und Kreislaufwirtschaft, um ökologische und wirtschaftliche Interessen auszubalancieren.

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Rechenzentren zählen zu den kritischen Infrastrukturen und bilden zugleich eine wichtige Wachstumsbedingung sowie einen zentralen Wachstumstreiber der digitalen Wirtschaft. Unter anderem infolge des KI-Booms ist der weltweite Bedarf an Cloud-Rechenleistung in den vergangenen Jahren stark gestiegen – sowohl das Training als auch der Betrieb von KI-Anwendungen sind auf leistungsfähige Rechenzentren angewiesen. Da davon ausgegangen wird, dass dieser Trend anhält und die Nachfrage nach Rechenzentrumskapazitäten weiter stark zunimmt, hat sich ein intensiver Wettbewerb um Standorte und Investitionen entwickelt. Die großen Technologiekonzerne haben ihre Ausgaben in den letzten Jahren deutlich ausgeweitet und für 2025 Investitionen von über 300 Milliarden Dollar angekündigt, die in den Auf- und Ausbau von Rechenzentren fließen sollen.¹

Der weltweite Rechenzentrumsmarkt konzentriert sich geografisch stark auf die USA, wo derzeit rund 5.400 Rechenzentren betrieben werden. Deutschland folgt mit 529 Rechenzentren an zweiter Stelle, während Österreich über 68 Rechenzentren verfügt.² Aus Gründen der Wettbewerbsfähigkeit und Datensouveränität haben die EU und ihre Mitgliedstaaten ein starkes Interesse daran, eine inländische KI-Infrastruktur aufzubauen. So hat die EU erst im Oktober 2025 angekündigt, in Tschechien, Litauen, Polen, Rumänien, Spanien und den Niederlanden sechs weitere *große, KI-optimierte* Rechenzentren zu bauen – insgesamt dann 19 dieser Art in der EU.³ Gleichzeitig stehen die verschiedenen EU-Länder im Standortwettbewerb für Investitionen der großen US-amerikanischen Technologiekonzerne. Der Bau und Betrieb von KI-Rechenzentren verschärft allerdings die bereits von traditionellen Rechenzentren bekannten Nachhaltigkeitsprobleme deutlich (*Klimaschutzrisiko Digitalisierung*). Kritische Faktoren sind die hohen Bedarfe an Energie, Wasser und Rohstoffen.

Zunächst zum Energiebedarf: Der weltweite Strombedarf von Rechenzentren wird sich laut IEA bis 2030 voraussichtlich auf rund 945 TWh verdoppeln – etwa dem heutigen Stromverbrauch Japans entsprechend (IEA, 2025). Besonders KI-Rechenzentren treiben diesen Trend. Sie sind speziell für das Training und den Betrieb rechenintensiver KI-Anwendungen konzipiert und sind dafür auf hochperformante Hardware angewiesen. Dazu gehören spezielle Grafikprozessoren (sog. Graphics Processing Units; GPUs), Neural Processing Units (NPU) und Tensor Processing Units (TPUs), die für die Datenverarbeitung in neuronalen Netzwerken optimiert sind. Die Leistungsdichte von KI-Rechenzentren kann bis zu 30-mal höher sein als bei konventionellen Rechenzentren.⁴ Technologiekonzerne setzen zunehmend auf Hyperscale-Rechenzentren mit über 5.000 Servern für extreme Arbeitslasten, die das Drei- bis Zehnfache konventioneller Systeme verbrauchen.⁵ Ein großes KI-Rechenzentrum benötigt ungefähr so viel Strom wie 100.000 Haushalte (Widuto, 2025), wodurch lokale Stromnetze oft an Kapazitäts-

*Wachstum von
KI-Rechenzentren
und steigender
Ressourcenbedarf*

*Pläne der EU und
Standortwettbewerb
der EU-Staaten*

*Verdoppelung des
globalen Strombedarfs
bis 2030 erwartet*

¹ de.statista.com/statistik/daten/studie/1559037/umfrage/investitionen-der-grossen-tech-konzerne-in-rechenzentren/.

² cloudscene.com/region/datacenters-in-europe
(dynamische Datenbank, Stand 20.10.2025).

³ deutschlandfunk.de/sechs-neue-grosse-rechenzentren-in-europa-geplant-104.html.

⁴ northdatacenters.com/ch-de/datacenter/was unterscheidet ein ki-rechenzentrum von einem traditionellen rechenzentrum/.

⁵ ithy.com/article/power-consumption-ai-vs-normal-servers-a801913b.

grenzen stoßen (Gröger et al., 2025). Trotz kontinuierlicher Effizienzverbesserungen – die sogenannte PUE („Power Usage Effectiveness“, Stromverbrauchseffizienz) deutscher Rechenzentren sank von 1,82 (2010) auf 1,52 (Hintemann & Hinterholzer, 2023) – kompensieren diese Gewinne nicht den steigenden Bedarf. Vielmehr zeigt sich ein Rebound-Effekt: Der effizientere Betrieb begünstigt intensivere Nutzung statt absoluter Verbrauchsreduktion. Rechenzentren dienen allerdings auch dem Einsatz von KI für Flexibilitäten im Stromnetz. Dadurch kann ein Teil des erhöhten Energieverbrauchs an anderer Stelle eingespart werden⁶ – Schätzungen, in welchem Umfang das möglich ist, unterscheiden sich aber stark.⁷ Für den nachhaltigen Betrieb von KI-Rechenzentren ist die Nutzung erneuerbarer Energien zentral. Mit dem europäischen Climate Neutral Data Centre Pact (CNDCP) verpflichteten sich über 100 Rechenzentrumsunternehmen und Branchenverbände – darunter Amazon Web Services, Google, Meta und Microsoft – dazu, ihre europäischen Standorte bis 2030 klimaneutral zu betreiben. Viele schließen langfristige Stromlieferverträge (Power Purchase Agreements) mit Photovoltaik- oder Windkraftanlagen ab. Die Nutzung erneuerbarer Energie ist jedoch mit technischen Herausforderungen verbunden, insbesondere aufgrund von Leistungsschwankungen, die den Einsatz von Batteriespeichern oder Notstromsystemen erforderlich machen können. Da der CNDCP rechtlich nicht bindend ist und erneuerbare Energien vielerorts nicht ausreichend verfügbar sind, dürften fossile Energieträger auch in europäischen Rechenzentren künftig weiterhin eine Rolle spielen. So prognostizieren das Öko-Institut und Greenpeace in einer gemeinsamen Studie einen weltweiten Anstieg der Treibhausgasemissionen durch Rechenzentren von 212 Mio. t (2023) auf 355 Mio. t CO₂-Äquivalente bis 2030 (Gröger et al., 2025). Um den wachsenden Energiehunger ihrer Rechenzentren klimaneutral zu decken, setzen einige Unternehmen – etwa Microsoft und Google – zunehmend auf Stromlieferverträge mit Betreibern von Kernkraftwerken oder investieren in die Entwicklung von Small Modular Reactors (SMRs) sowie in Reaktivierungen und Lebensdauerverlängerungen konventioneller Kernkraftwerke.

Eine weitere Herausforderung im Bereich Nachhaltigkeit stellt der hohe Wasserverbrauch dar. KI-Chips (insbesondere GPUs) erzeugen erheblich mehr Wärme als herkömmliche Prozessoren, sodass große Mengen an Wärme in kleinen, konzentrierten Bereichen entstehen und abgeführt werden müssen. Das macht die Kühlung technisch anspruchsvoll und teuer. Eine Luftkühlung, wie sie in herkömmlichen Rechenzentren angewendet wird, stößt bei hohen Leistungsdichten ab etwa 15-20 kW pro Rack an ihre Grenzen und ist dann mit hohen Energieverbräuchen verbunden. In KI-Rechenzentren kommt deshalb in der Regel eine Wasserkühlung zum Einsatz, typischerweise in zwei Varianten (Gröger et al., 2025; Tozzi, 2024): (1) Verdunstungskühlung: Wasser entzieht der Luft beim Verdunsten Wärme – das ist sehr energieeffizient, aber mit hohem Wasserverbrauch verbunden. (2) Kreislaufkühlung: Wasser wird in einem geschlossenen System abgekühlt, zu den Wärmequellen geführt und anschließend wiederverwendet. Dadurch sinkt der Wasserverbrauch, allerdings auf Kosten des Energiebedarfs.

Nutzung erneuerbarer Energien für Klimaneutralität zentral

Steigender Wasserbedarf – nachhaltige Kühlverfahren im Fokus

⁶ iea.org/reports/energy-and-ai/energy-demand-from-ai.

⁷ reports.weforum.org/docs/WEF_Artificial_Intelligences_Energy_Paradox_2025.pdf, technologyreview.com/2025/05/20/1116327/ai-energy-usage-climate-footprint-big-tech/, nature.com/articles/d41586-025-00616-z.

Bei großen Rechenzentren, die vor allem in den USA angesiedelt sind, ist Verdunstungskühlung derzeit das Mittel der Wahl. Entsprechend hoch ist der Wasserverbrauch: Ein Hyperscale-Rechenzentrum kann – abhängig von Standort, Größe und Kühlssystem – täglich schätzungsweise bis zu 19 Millionen Liter Wasser verbrauchen, also etwa so viel wie eine Stadt mit 30.000 bis 50.000 Einwohnern.⁸ Nach Berechnungen des Öko-Instituts könnte der globale Wasserverbrauch von Rechenzentren allein durch den Kühlungsbedarf von rund 175 Milliarden Litern (2023) auf 664 Milliarden Liter (2030) ansteigen (Gröger et al., 2025). Dabei ist der indirekte Wasserverbrauch, der beispielsweise bei der Stromerzeugung oder der Halbleiterproduktion anfällt, noch nicht berücksichtigt. Schätzungen zufolge entfallen etwa 50 bis 60 % des gesamten Wasserverbrauchs von Rechenzentren auf indirekte Prozesse (IEA, 2025).

In den USA haben große Rechenzentren bereits zu lokalen Wasserknappheiten geführt.⁹ Für die Nachhaltigkeit von Rechenzentren ist daher essenziell, die Wassereffizienz (Water Use Efficiency, WUE) zu verbessern. Microsoft hat ein Kühlverfahren entwickelt, das ohne Wasserverdunstung auskommt und durch geschlossene Kühlkreisläufe und Kühlösungen auf Chip-Ebene über 125 Millionen Liter Wasser pro Jahr und Rechenzentrum einsparen soll.¹⁰ Allerdings besteht dabei ein Zielkonflikt zwischen der Verbesserung der Wasser- und Energieeffizienz, da mechanische Kühlung mehr Energie verbraucht als Verdunstungskühlung. Weitere Innovationen wie Immersionskühlung (Hardware oder Komponenten werden in ein elektrisch nichtleitendes Kühlmedium getaucht), ein KI-optimiertes Kühlmanagement oder Geothermiekühlung könnten künftig helfen, diesen Konflikt zu entschärfen. Von großer Bedeutung ist dabei auch die Abwärmenutzung. Sie trägt dazu bei, die Gesamtenergieeffizienz von Rechenzentren zu steigern, indem die Abwärme in Fernwärmennetze eingespeist wird. Die 90 Großrechenzentren in Deutschland könnten schätzungsweise 350.000 Haushalte mit Wärme versorgen (Hintemann & Hinterholzer, 2023). Dafür sind jedoch technische Voraussetzungen erforderlich: Anschlussmöglichkeiten an Fernwärmennetze und der Einsatz *hochleistungsfähiger Wärmepumpen*, um Niedrigtemperatur-Abwärme (30–40°C) auf Fernwärme-Niveau (≥85°C) anzuheben (Bitkom e.V., 2022).

Die dritte wesentliche Umweltwirkung von Rechenzentren ergibt sich aus dem hohen Ressourcenverbrauch bei der Herstellung und beim Austausch von IT-Hardware. Server und andere Komponenten werden häufig bereits nach 3 bis 5 Jahren aus Gründen der Leistungssteigerung ersetzt, oft bevor ihre technische Lebensdauer ausgeschöpft ist.¹¹ Ein KI-Rechenzentrum beansprucht somit über seine Betriebszeit erhebliche Mengen an seltenen Rohstoffen, deren Gewinnung oft mit ökologischen Folgen wie Landschaftszerstörung, Wasserbelastung oder Energieverbrauch verbunden ist. Zusätzlich entstehen große Mengen an Elektroschrott. Laut Wang et al. (2024) könnte der durch Training und Betrieb generativer KI-Modelle erzeugte *Elektronikschrott* im Zeitraum 2020–2030 kumulativ zwischen 1,2 und 5,0 Mio. Tonnen betragen. Zur Verringerung dieser Umweltauswirkungen werden verschiedene Strategien diskutiert, etwa eine effizientere

*Zielkonflikt zwischen
Energie- und
Wassereffizienz*

*Kurze
Hardwarezyklen
erhöhen
Ressourcenverbrauch –
Kreislaufwirtschaft als
Schlüssel*

⁸ eesi.org/articles/view/data-centers-and-water-consumption.

⁹ derstandard.at/story/300000279557/meta-rechenzentrum-laesst-wasser-in-us-bezirk-versiegen.

¹⁰ news.microsoft.com/de-de/datencenter-kuehlung/.

¹¹ gbc-engineers.com/de-DE/aktuelles/nachhaltigkeitsherausforderungen-fr-rechenzentren.

Auslastung der Server (Green IT) oder der Einsatz ressourcenschonenderer Software, beispielsweise durch energieeffiziente und hardwareschonende Softwarearchitekturen oder schlankere Modell-Designs (Green Coding). Solche Maßnahmen können Materialaufwand, Energieverbrauch und damit den Kühlbedarf verringern. Letztlich gilt jedoch, dass es keine vollständige Entkopplung von Materialinput und Umweltauswirkung geben kann – weshalb ein konsequenter Kreislaufwirtschaftsansatz in Hardwaredesign und -entsorgung unverzichtbar ist, da die Produktion von Elektroschrott die Recyclingkapazitäten bei Weitem übersteigt (Baldé et al., 2024). Dies sollte ein möglichst recycling-gerechtes Design der Hardware beinhalten sowie eine Standortwahl mit Nähe zu Recyclinginfrastrukturen.

Der politische Druck, Rechenzentren nachhaltiger zu machen, steigt. Seit 15. Mai 2024 sind Rechenzentren mit einer IT-Leistung ab 500 kW im Zuge der Neuerlassung der EU-Energieeffizienzrichtlinie (EED, 2023/1791/EU) verpflichtet, jährlich ihre Effizienzkennzahlen (u. a. PUE, Anteil Erneuerbare, Wasserverbrauch, Abwärmenutzung) zu veröffentlichen. Über diese Transparenz- und Berichtspflichten hinaus prüft die EU-Kommission verbindliche Mindesteffizienzstandards für PUE, WUE und andere Kennzahlen.¹²

Politischer Druck steigt: Künftige Mindeststandards in Prüfung

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Österreich steht im Wettbewerb mit anderen Staaten um die Ansiedlung größerer Rechenzentren und verfügt dabei über mehrere Standortvorteile, die zunehmend auch unter Nachhaltigkeitsaspekten relevant sind. Neben dem hohen Anteil erneuerbarer Energien am Strommix (rund 80%, überwiegend Wasserkraft, aber starkes Wachstum bei PV und Wind) besteht in vielen Ballungsräumen ein leistungsfähiges Fernwärmennetz. Zudem bieten sich in höheren alpinen Lagen günstige Bedingungen für Free-Cooling-Technologien. Mit einem prognostizierten jährlichen Wachstum des Marktes für Rechenzentren in Österreich von etwa 7 % bis 2030¹³ gewinnt zugleich die Frage nach verbindlichen Nachhaltigkeitskriterien an Bedeutung. In der Nähe von Salzburg entsteht derzeit ein KI-Rechenzentrum¹⁴, das ausschließlich mit Wasserkraft betrieben wird; weitere Projekte sind in Nieder- und Oberösterreich geplant.¹⁵

Standortvorteile und politische Hebel für nachhaltige Rechenzentren

2024 wurde vom Bundesministerium für Klimaschutz (BMK) das Österreichische Umweltzeichen für Rechenzentren eingeführt, um Betreiber zu einem besonders ressourcenschonenden Betrieb zu motivieren. Voraussetzung dafür sind neben erneuerbarer Energieversorgung auch ausreichende Kapazitäten in Strom- und Fernwärmennetzen, Wasserverfügbarkeit sowie Recyclinginfrastrukturen. Für alle kritischen Umweltfaktoren – Energie, Wasser und Rohstoffe – sind kreislauforientierte Konzepte erforderlich, um Nachhaltigkeitspotenziale zu maximieren.

¹² cov.com/-/media/files/corporate/publications/2025/04/the-eus-energy-efficiency-directive-and-its-impact-on-datacenters.pdf.

¹³ de.statista.com/outlook/tmo/rechenzentren/oesterreich.

¹⁴ news.at/technik/in-salzburg-entsteht-hochsicherheits-rechenzentrum-für-ki-anwendungen.

¹⁵ derstandard.at/story/3000000276685/neue-ki-rechenzentren-microsoft-eroeffnet-zehntes-bundesland; ooe.orf.at/stories/3316092/.

Auch ein nachhaltig betriebenes Rechenzentrum hat jedoch erhebliche Umweltwirkungen. Neben freiwilligen Umweltzertifizierungen sind daher Transparenzstandards und verbindliche Mindestanforderungen zentral. Die Politik könnte hier durch gezielte Förderinstrumente für energie- und abwärme-effiziente Rechenzentren, durch Vorgaben zu Abwärmenutzung und Kreislaufwirtschaft sowie durch die Integration solcher Anforderungen in Raum- und Netzinfrastrukturplanung aktiv Einfluss nehmen.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Bei der Ansiedlung von Rechenzentren sind unterschiedliche Interessen gegeneinander abzuwägen. Den Potenzialen für Datensouveränität, Innovationskraft und Wertschöpfung stehen Umweltwirkungen gegenüber, die bislang nur unvollständig quantifiziert sind. Dies betrifft insbesondere indirekte Effekte, die beim Abbau von Rohstoffen, bei der Stromerzeugung sowie bei der Herstellung und Entsorgung von IT-Hardware entstehen. In einer vertiefenden TA-Studie könnte der aktuelle Wissensstand zu diesen Umweltwirkungen systematisch aufgearbeitet und bewertet werden. Darauf aufbauend ließe sich ein Kriterienkatalog entwickeln, der eine transparente und nachvollziehbare Abwägung zwischen ökonomischen, technologischen und ökologischen Aspekten bei künftigen Standort- und Investitionsentscheidungen ermöglicht. Zudem könnte diskutiert werden, inwiefern eine Ausweitung der Bewertung der ökologischen Effizienz von der Infrastruktur- auf die Systemperspektive – also das Zusammenspiel von Software, Hardware und regionaler Ressourcennutzung – besser geeignete Indikatoren und Anreize für Nachhaltigkeitsstrategien bereitstellen kann.

TA-Studie zu
Umweltwirkungen und
Bewertungskriterien

ZITIERTE LITERATUR

- Baldé, C. P., et al. (2024). *The Global E-Waste Monitor 2024*. Intern. Telecommunication Union (ITU) and UN Institute for Training and Research (UNITAR).
- Bitkom e.V. (2022). *Rechenzentren in Deutschland*. bitkom.org/Bitkom/Publikationen/Studie-Rechenzentren-in-Deutschland.
- Gröger, J., Behrens, F., Gailhofer, P., & Hilbert, I. (2025). *Umweltauswirkungen künstlicher Intelligenz*. Greenpeace und Öko-Institut. oeko.de/publikation/umweltauswirkungen-kuenstlicher-intelligenz/.
- Hintemann, R., & Hinterholzer, S. (2023). *Steigender Energie- und Ressourcenbedarf der Rechenzentrumsbranche* (S. 846–858). Borderstep Institut.
- IEA. (2025). *Energy and AI*. iea.org/reports/energy-and-ai/energy-demand-from-ai.
- Tozzi, C. (2024). *Why Water Cooling In Data Centers Is Not Always Sustainable*. DataCenterKnowledge. datacenterknowledge.com/cooling/why-water-cooling-in-data-centers-is-not-always-sustainable.
- Wang, P., et al. (2024). E-waste challenges of generative artificial intelligence. *Nature Computational Science*, 4(11), 818–823. doi.org/10.1038/s43588-024-00712-6.
- Widuto, A. (2025). *AI and the energy sector*. European Parliamentary Research Service. [europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/775859/EPRI_BRI\(2025\)775859_EN.pdf](http://europarl.europa.eu/RegData/etudes/BRIE/2025/775859/EPRI_BRI(2025)775859_EN.pdf).

PFAS-ENTFERNUNGSTECHNOLOGIEN



© CC0 (Vitor Serban/unsplash)

ZUSAMMENFASSUNG

PFAS, auch als „ewige Chemikalien“ bezeichnet, stellen aufgrund ihrer hohen Persistenz, Mobilität und potentiellen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit eine erhebliche Herausforderung für die Aufbereitung von Trink- und Abwasser dar. Die Einführung verbindlicher Grenzwerte für PFAS erhöht den Bedarf an effizienten Entfernungstechnologien. Für zahlreiche Verfahren wurde die Wirksamkeit unter Laborbedingungen nachgewiesen, es existieren jedoch bislang keine skalierbaren, industriell einsetzbaren Lösungen, um PFAS-Moleküle zu zerstören und dauerhaft aus der Umwelt zu entfernen. Derzeit basieren etablierte Methoden hauptsächlich auf Adsorption an Aktivkohle und Ionenaustauschharzen sowie auf Membranverfahren, die PFAS zwar effektiv aus dem Wasser entfernen, jedoch nicht zerstören. Destruktive Verfahren werden derzeit intensiv untersucht, um die PFAS-Moleküle zu zerstören.

*PFAS-Entfernung
in Trink- und
Abwasseranlagen
noch nicht industriell
umgesetzt*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Per- und polyfluorierte Alkylverbindungen (PFAS) bilden eine Klasse organischer Chemikalien, die in der Natur nicht vorkommen.¹ Sie weisen eine hohe thermische und chemische Stabilität auf und werden daher auch als „*ewige Chemikalien*“ bezeichnet. PFAS sind persistent und verbleiben nach ihrer Freisetzung über lange Zeiträume in der Umwelt, wo sie sich anreichern², nur sehr langsam abbauen und schwer zu entfernen sind. Aufgrund ihrer Stabilität sowie ihrer wasser-, fett-, und schmutzabweisenden Eigenschaften werden PFAS in einem breiten Spektrum von Anwendungen eingesetzt. Dazu gehören zum Beispiel technische und wasserfeste Textilien, antihaftbeschichtetes Kochgeschirr, Pestizide, Feuerlöschschaum sowie die Herstellung von Halbleitern und Lebensmittelverpackungen. PFAS werden außerdem in Kühlgeräten und Wärmepumpen eingesetzt, von denen erstere unter anderem in *Rechenzentren* angewendet werden.³ Insgesamt werden mehr als 1.400 verschiedene PFAS in industriellen Anwendungen eingesetzt (Glüge et al., 2020), die entweder direkt oder über ihre Abbauprodukte extrem persistent sind (BMLUK, 2024).

Die Freisetzung in die Umwelt erfolgt durch die Anwendung PFAS-haltiger Produkte, unbeabsichtigte industrielle Emissionen, die Abfallentsorgung sowie die Ausbringung kontaminiertes Klärschlammes als Dünger. Auf europäischer Ebene wurden rund 23.000 Altlasten mit PFAS-Konzentrationen von bis zu 70.000 µg/L identifiziert sowie etwa 21.000 weitere potenzielle Altlasten, die zur Verschmutzung von Boden und Trinkwasser führen könnten.⁴

Die mehr als 4.700 bekannten PFAS weisen unterschiedliche Toxizität, Lebensdauer und Mobilität auf. Die Aufnahme von PFAS⁵ in den menschlichen Körper erfolgt überwiegend über Trinkwasser und Lebensmittel. Aufgrund ihrer Langzeitigkeit reichern sie sich im Körper an und wirken auf verschiedene Organe. Die akute Toxizität von PFAS ist zwar gering, eine langfristige Exposition kann jedoch zu Störungen des Immunsystems, erhöhten Cholesterinwerten, Karzinogenität sowie zu Beeinträchtigungen der Entwicklung von Föten und Säuglingen führen.⁶

Die EU-Trinkwasserrichtlinie (2020/2184) definiert Grenzwerte für die Konzentrationen von PFAS im Trinkwasser. Dabei werden zwei Parameter berücksichtigt: Zum einen darf die Summe der Konzentrationen von 20 ausgewählten PFAS den Wert von 0,1 µg/L nicht überschreiten, zum anderen darf die Gesamtkonzentration aller PFAS 0,5 µg/L nicht überschreiten (BMLUK, 2024). Diese Vorgaben wurden in die österreichische Trinkwasserverordnung übernommen, wobei die Summe der 20 PFAS als maßgeblicher Parameter festgelegt wurde.

Messungen des Trinkwassers in Österreich zwischen 2021 und 2024 haben gezeigt, dass die Gesamtkonzentration von 20 PFAS bei 99 % der Messpunkte unterhalb des ab 2026 einzuhaltenden Grenzwerts von 0,1 µg/L liegt (AGES, 2025a). Allerdings spiegelt dieser Grenzwert nicht die neuesten toxikologischen Erkenntnisse wider.

*Mehr als 1.400
verschiedene PFAS
in 200 Anwendungen*

*Die Evidenz für eine
chronische Toxizität
wächst*

*Ab Jänner 2026 gilt
ein neuer Grenzwert
für PFAS in
Trinkwasser*

*Trinkwasser in
Österreich unterhalb
des zukünftigen
Grenzwertes*

¹ umweltbundesamt.at/umweltthemen/stoffradar/pfas.

² echa.europa.eu/hot-topics/perfluoroalkyl-chemicals-pfas.

³ theguardian.com/environment/2025/oct/04/pfas-pollution-data-centers-ai.

⁴ eea.europa.eu/en/european-zero-pollution-dashboards/indicators/treatment-of-drinking-water-to-remove-pfas-signal.

⁵ eeb.org/eu-leaders-contaminated-with-pfas-forever-chemicals/.

⁶ ages.at/mensch/ernaehrung-lebensmittel/rueckstaende-kontaminanten-von-a-bis-z/per-und-polyfluorierte-alkylverbindungen-pfas.

nisse wider.⁷ Basierend auf potenziellen Auswirkungen auf das Immunsystem wurde ein Grenzwert für PFAS vom Typ GenX auf 0,02 µg/L für Erwachsene und 0,004 µg/L für Kinder vorgeschlagen (EFSA, 2020). Obwohl diese Werte in Österreich nicht überschritten wurden, liegen einige Messungen bei etwa der Hälfte des Grenzwerts (AGES, 2025b). Einige EU-Länder haben daher deutlich strengere Grenzwerte für Trinkwasser festgelegt (Dänemark: 0,002 µg/L; Niederlande: 0,0044 µg/L; Deutschland: 0,02 µg/L). Diese beziehen sich jedoch auf vier PFAS statt auf zwanzig. Der von der EU-Kommission 2022 vorgeschlagene Grenzwert für Grund- und Oberflächenwasser von 0,0044 µg/L für die Summe der 24 PFAS basiert auf der Stellungnahme der EFSA. Dieser Grenzwert wurde in Österreich in die Grundwasserrichtlinie übernommen.

Aufgrund ihrer Langlebigkeit sind PFAS nur sehr schwer abbaubar und reichern sich in der Umwelt an. Neben einer Reduzierung ihrer Anwendung und Freisetzung sind daher effektive Entfernungsmethoden erforderlich, um die Qualität des Trinkwassers langfristig zu gewährleisten.

Die Technologien zur PFAS-Entfernung sind entweder destruktiv oder nicht-destruktiv (Tshangana et al., 2025). Destruktive Verfahren zielen darauf ab, die chemischen Bindungen innerhalb der PFAS-Moleküle aufzubrechen, insbesondere die starke Bindung zwischen Kohlenstoff- und Fluoratomen. Nicht-destruktive Verfahren hingegen entfernen PFAS-Moleküle aus dem Wasser, ohne deren chemische Struktur zu verändern. Dabei entsteht als Nebenprodukt eine konzentrierte PFAS-Lösung, die einer weiteren Behandlung bedarf, um die Schadstoffe sicher zu entsorgen. Die Effizienz der einzelnen Verfahren hängt in der Regel von der Kettenlänge der PFAS (Länge der Kohlenstoffkette) sowie von der Anwesenheit anderer Chemikalien ab.

Destruktive und nicht-destruktive Technologien zur Entfernung bzw. Zerstörung von PFAS

Bei destruktiven Verfahren wird typischerweise eine Kombination aus mechanischer Zerstörung durch hohe Temperaturen und Drücke sowie chemischen Mechanismen, beispielweise Oxidation, eingesetzt. Die *thermische Zersetzung* erreicht Zersetzungsraten von über 99,999 % bei Temperaturen über 850°C in Luft (Capodaglio et al., 2025). Vorbehandlungsschritte sind erforderlich um die PFAS zuvor aus dem Wasser zu entfernen.

Destruktive Verfahren zerstören die chemischen Verbindungen

Die *chemische Wasseroxidation* erfolgt direkt im kontaminierten Wasser und basiert auf die Oxidation der PFAS-Moleküle in einer Lösung von Wasser und Sauerstoff bei hohen Temperaturen (375°C) und Drücke (22 MPa). Dabei werden die PFAS vollständig in Wasser, CO₂ und nicht-toxische Produkte zersetzt. Unter Laborbedingungen wurden Zersetzungsraten von über 99% erreicht. Allerdings ist der Energieaufwand sehr hoch. Die Effizienz dieser Methode ist unabhängig von der PFAS-Konzentration im Wasser und ermöglicht die schnelle Zerstörung großer Mengen. Die extremen Prozessbedingungen stellen jedoch eine Herausforderung für die Konstruktion geeigneter Reaktoren dar.

Bei der *sonochemischen Oxidation* entstehen lokal hohe Temperaturen und Drücke sowie reaktive Sauerstoff-enthaltende Moleküle durch Schallwellen. Unter Laborbedingungen wurden Zersetzungsraten von bis zu 90 % erreicht. Die Effizienz hängt stark von den im Wasser enthaltenen Stoffen sowie von der Kettenlänge

⁷ eea.europa.eu/en/analysis/publications/pfas-pollution-in-european-waters.

der PFAS ab; zudem müssen Parameter wie Schallwellenfrequenz und Leistung präzise angepasst werden.

Weitere destruktive Verfahren nutzen ebenfalls die Oxidation als Zerstörungsmechanismus, beispielsweise *photokatalytische* oder elektrochemische Oxidation, und *Plasmaprozesse*. Alternative Ansätze werden untersucht, um PFAS mithilfe hochenergetischer Strahlungsarten – wie *ionisierender Strahlung*, *UV-Strahlung* oder *Mikrowellen* – zu zerstören.

Trotz hoher Zerstörungsraten unter Laborbedingungen sind bislang keine Methoden für den industriellen Einsatz geeignet. Typische Herausforderungen destruktiver Verfahren umfassen einen hohen Energiebedarf, eine starke Abhängigkeit von Prozessparametern und anderen im Wasser enthaltenen Chemikalien, die Bildung potenziell toxischer Nebenprodukte sowie die Schwierigkeit, eine geeignete Infrastruktur für den industriellen Einsatz zu etablieren.

Die Alternative bilden nicht-destruktive Verfahren. Zu den am häufigsten eingesetzten nicht-destruktiven Methoden zählen *Ionenaustausch*, *Adsorption* und *Membrantechnik*. Sie erzeugen hoch-konzentrierte PFAS-haltige Lösungen, typischerweise 5- bis 10-mal höhere Konzentrationen als im Ausgangswasser (Tow et al., 2021), die einer weiteren Behandlung bedürfen, um eine Freisetzung in die Umwelt zu vermeiden.

PFAS-Moleküle werden durch verschiedene physikalische Prozesse aus dem kontaminierten Wasser entfernt. *Ionenaustausch* basiert auf wasserabweisenden und elektrostatischen Wechselwirkungen zwischen PFAS-Molekülen und Ionenaustauscherharzen. Die *Adsorption* macht sich die große spezifische Oberfläche sowie die funktionellen Gruppen von Aktivkohle und Pflanzenkohle sowie die dreidimensionale poröse Struktur von metallorganischen Gerüstverbindungen (MOFs) zunutze. Unter Laborbedingungen erreichen Ionenaustausch und Adsorption eine Entfernungseffizienz von bis zu 100 %. Die Wirksamkeit ist jedoch stark materialabhängig und variiert zudem in Abhängigkeit vom Ladungszustand der PFAS. Unter realen Bedingungen wird die Effizienz jedoch durch den Präsenz anderer Substanzen im Wasser beeinträchtigt, was zu einer unvollständigen PFAS-Entfernung führen kann.

Membranverfahren wie *Nanofiltration* und *Umkehrosmose* (mit Porendurchmessern unter 0,01 µm) entfernen PFAS durch Größenausschlussmechanismen mit einer Effizienz von über 99 %. Diese Verfahren sind energieintensiv, da sie einen hohen Druck erfordern, um den Durchfluss durch die Membran aufrechtzuerhalten.

Die durch nicht-destruktive Methoden entfernten Stoffe reichern sich entweder auf den Filtrations- oder Adsorptionsmedien oder in hochkonzentrierten Lösungen an. Diese müssen anschließend entsorgt oder regeneriert werden. Mit der Zeit nimmt die Entfernungseffizienz aufgrund der Filtersättigung ab, insbesondere infolge anderer im Wasser enthaltener Stoffe. Da diese Verfahren nicht selektiv sind, konkurrieren PFAS mit anderen Chemikalien im Adsorptions- oder Filtrationsprozess.

Herausforderungen bei der Industrialisierung destruktiver Verfahren

Nicht-destruktive Methoden entfernen die Chemikalien aus dem Wasser, ohne sie zu zerstören

Synergien zwischen destruktiven und nicht-destruktiven Methoden werden untersucht, um die Vorteile beider Verfahren zu kombinieren, die entweder sequenziell oder parallel eingesetzt werden können. Bei einer sequenziellen Behandlung wird typischerweise zuerst eine nicht-destruktive Methode angewendet, um eine hochkonzentrierte PFAS-Lösung zu erzeugen; anschließend erfolgt die Zerstörung der PFAS durch ein destruktives Verfahren. Sequenzielle Behandlung ist jedoch mit hohen Investitionskosten verbunden.

Bei parallelen Verfahren werden PFAS gleichzeitig filtriert und zerstört, beispielsweise durch *photokatalytische* oder *reaktive elektrochemische Membranen*. Solche Verfahren sind in der Regel kostengünstiger, verlängern die Lebensdauer der Membranen durch eine verlangsamte Sättigung und erfordern keine zusätzlichen Behandlungsschritte.

Bei der Auswahl einer geeigneten Methode sind verschiedene Parameter zu berücksichtigen. Unterschiedliche Wasserarten (Trinkwasser, Abwasser, Sickerwasser) weisen stark variierende Konzentrationsspektren auf und die PFAS-Konzentration ist geografisch sehr heterogen. Destruktive Verfahren zeigen ihre höchste Effizienz bei Konzentrationen zwischen 100 und 100.000 µg/L (Capodaglio et al., 2025), während Filtrationsverfahren schon bei deutlich niedrigeren Konzentrationen wirksam sind. Die Kosten hängen stark von der eingesetzten Methode ab und liegen zwischen 0,01 und 50 € pro m³ Wasser (Tshangana et al., 2025). Die derzeit fehlende industrielle Anwendung bietet künftig ein großes Potenzial zur Kostensenkung.

*Kombination von
destruktiven und
nicht-destruktiven
Methoden vereint die
Vorteile beider Ansätze*

*Die Auswahl der
Methoden sollte die
PFAS-Konzentration
berücksichtigen*

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

In Österreich wurden bislang nur wenige PFAS-Altlasten identifiziert, insbesondere im Vergleich zu anderen europäischen Ländern. Dennoch werden PFAS weiterhin in industriellen Prozessen eingesetzt, sodass potenzielle Quellen für Freisetzungen bestehen, etwa in industrielle Produktionsstätten, Abfallentsorgungsanlagen oder auf Flugplätzen.

Die Projekte POPMON und POPMON II (AGES, BMSGPK und BMK) fördern die regionale Zusammenarbeit zur Identifikation potentieller Altlasten und zum Monitoring von PFAS in der Umwelt. Auf europäischer Ebene wurden im Rahmen des Horizon-Programms 15 Projekte zu PFAS-Entfernungstechnologien mit insgesamt 30 Millionen Euro gefördert. Etwa 2 % dieser Mittel gingen an teilnehmende österreichische Forschungseinrichtungen.⁸ Auf nationaler Ebene laufen mehrere Forschungsprojekte, darunter *PFASolve* (Johannes-Kepler-Universität Linz); *Vorkommen und Beseitigung von PFAS und PFASAN* (Universität Wien, TU Wien und Austrian Institute of Technology); *LaST-PFAS* und *Ufer-Los* (TU Wien); *PFAS removal from groundwater* (BOKU). Trotz dieser Forschungsaktivitäten werden derzeit noch keine Entfernungsmethoden auf industrieller Ebene angewendet.

*Österreichische
Universitäten
erforschen
Entfernungstechnologien*

⁸ cordis.europa.eu.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Ein robustes PFAS-Überwachungssystem soll in der Lage sein, geringe Konzentrationen einzelner Moleküle zu messen, um Kontaminationsfälle frühzeitig zu identifizieren und die jeweils passende Entfernungsmethode einsetzen zu können. Kurzfristig sollten Wasserversorgungsanlagen und Gemeinden beim Aufbau eines zuverlässiges Monitoringsystems unterstützt werden, damit sie sich auf zukünftige regulatorische Anforderungen sowie auf den Einsatz von Entfernungstechnologien vorbereiten können.

Es wird eine vertiefte Analyse empfohlen, die potenzielle Verfahren mithilfe soziökonomischer Bewertung und Lebenszyklusanalysen vergleicht, unter Berücksichtigung lokaler Parameter wie Energiekosten und Verfügbarkeit.

Zugleich sollte weiteres Forschungspotenzial identifiziert werden, um eine langfristige und gezielte Förderung zu ermöglichen, die die verschiedenen Aspekte der PFAS-Thematik abdeckt, etwa die Skalierbarkeit und Industrialisierung der Entfernungstechnologien sowie die Entwicklung alternativer Stoffe. Ein ambitioniertes Forschungsprogramm würde die Kosten der Entfernung senken und die Wettbewerbsfähigkeit der heimischen Umwelttechnologiebranche stärken. Die Kosten für die Entfernung bereits vorhandener PFAS wurden auf 2.000 Milliarden Euro auf europäischer Ebene geschätzt, während die Kosten für bestehende Emissionen ohne zukünftige Begrenzung über 100 Milliarden Euro pro Jahr liegen.⁹

*Monitoring und
gezielte Ausstattung
von Trink- und
Abwasseranlagen*

ZITIERTE LITERATUR

- Glüge, J., et al. (2020). An overview of the uses of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS). *Environ. Sci.: Processes Impacts*, 22, 2345-2373.
doi: [10.1039/d0em00291g](https://doi.org/10.1039/d0em00291g).
- BMLUK (2024). PFAS-Aktionsplan, bmluk.gv.at/dam/jcr:c161255b-b8c7-4122-b9e9-268f4b63e66b/PFAS-Aktionsplan_Fassung_2024_UA.pdf.
- AGES (2025a). Perfluorierte Alkylsubstanzen in Trinkwasser – Monitoring, ages.at/mensch/schwerpunkte/schwerpunktaktionen/detail/perfluorierte-alkylsubstanzen-in-trinkwasser-monitoring-1.
- EFSA (2020). Risk to human health related to the presence of perfluoroalkyl substances in food. *EFSA Journal*, 18, 6. doi: [10.2903/j.efsa.2020.6223](https://doi.org/10.2903/j.efsa.2020.6223).
- AGES (2025b). Derivation of Provisional Drinking Water Tolerance Values for Several PFAS Not Included in the Austrian Drinking Water Regulation, efsasonline.wiley.com/doi/pdf/10.2903/fr.efsa.2025.FR-0057.
- Tshangana, C. S., et al. (2025). Technology status to treat PFAS-contaminated water and limiting factors for their effective full-scale application. *Npj Clean Water*, 8(41). doi: [10.1038/s41545-025-00457-3](https://doi.org/10.1038/s41545-025-00457-3).
- Capodaglio, A. G., et al. (2025). Prospects of Novel Technologies for PFAS Destruction in Water and Wastewater. *Appl. Sci.*, 15, 9311. doi: [10.3390/app15179311](https://doi.org/10.3390/app15179311).
- Tow, E. W., et al. (2021). Managing and treating per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in membrane concentrates. *AWWA Wat Sci.*, e1233. doi: [10.1002/aws2.1233](https://doi.org/10.1002/aws2.1233).

⁹ lemonde.fr/en/les-decodeurs/article/2025/01/14/pfas-the-astronomical-cost-of-depolluting-europe_6737022_8.html.

ALPINE NATURGEFAHREN IM KLIMAWANDEL



© CC0 (adege/pixabay)

ZUSAMMENFASSUNG

Die globale Erwärmung führt in den Alpen zu rascher Gletscherschmelze, zum Auftauen von Permafrost und geänderten Niederschlagsmustern. Dies destabilisiert Hochgebirgsregionen und erhöht die Gefahr von Erdrutschen, Bergstürzen, Gletscherabbrüchen und Gletscherseeausbrüchen. Der katastrophale Bergsturz im Schweizer Blatten rückte das Thema „alpine Naturgefahren im Klimawandel“ ins Zentrum der österreichischen Öffentlichkeit und Politik. Fernerkundung ist bei der Bewertung von Naturgefahren entscheidend. Drohnen, Helikopter und Flugzeuge können mit Sensoren wie RGB-, Multispektral-, Wärme-, Hyperspektral-, Lidar- und GPR ausgestattet werden, um Massebewegungen aller Art zu untersuchen. Regelmäßige Drohnen- und Satellitendaten ermöglichen genaue 3D-Modelle der Landesoberfläche. Flächendeckendes Laserscanning wird bereits in einigen Regionen genutzt, vor allem aber nach Naturgefahrenereignissen. Zukünftig könnte ein bundesweites System bei Prognosen helfen.

*Vermessung
und Vorhersagen
von Erdrutschen,
Bergstürzen und
Gletscherseeausbrüchen*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Zwar führt der Klimawandel insgesamt zu weniger sommerlichen Regenfällen in der gesamten Alpenregion, regional und vor allem in hohen Lagen kann es aber zu vermehrten Starkregenereignissen kommen (Giorgi et al., 2016), die dann gerade im Sommer vermehrt zu Extremfluten führen können (Fuchs et al., 2025). Gleichzeitig erwärmen sich hohe Lagen überproportional stark, was den schnellen Rückgang der Gletscher und das Auftauen des Permafrostes bewirkt.

Das Eis wirkt als Bindemittel im Boden und im Gestein, wodurch das Auftauen großflächige Bewegungen ermöglicht, auch weil Wasser tiefer ins Gestein eindringen kann und es durch das wiederholte Gefrieren und Auftauen des Wassers zu vermehrter Frostspaltung kommt.

Zu den alpinen Naturgefahren, die sich durch den Klimawandel verschärfen, gehören Erdrutsche, Bergstürze, Gletscherabbrüche und Gletscherseeausbrüche.

Alle gravitativen Massebewegungen werden wissenschaftlich nach den Hauptbewegungsarten der Materialien unterteilt, hierzu zählen: Sturz, Umkippen, Rutschen, Fließen und Ausbreiten (Formayer et al., 2025). Bei felsigem Material spricht man hier beispielsweise je nach Größe der Massebewegung von Steinschlag, Blockschlag, Felssturz und Bergsturz (über 1 Mio. Kubikmeter).¹ Bei eher erdigem Material spricht man von Erdrutsch, Hangrutsch, Mure, sowie Schlammlawine. Die Übergänge zwischen den Kategorien sind fließend und die Begriffe werden umgangssprachlich oft synonym verwendet.

Global fordern Erdrutsche jedes Jahr mehrere zehntausend Todesopfer (Chen et al., 2025). Einzelne Extremereignisse dem Klimawandel zuzuordnen, ist wissenschaftlich mit erheblichen Unsicherheiten verbunden. Dennoch gilt eine Zunahme der Häufigkeit, abhängig von Erdrutschtyp und Region, als gut belegt.

Insgesamt werden Erdrutsche durch eine Vielzahl von Ursachen begünstigt und ausgelöst. Zu den vom Klimawandel beeinflussten Ursachen gehören extreme Niederschläge (Intensität und Dauer), schnelle und intensive Schneeschmelze, steigende Grundwasserspiegel oder schnelle Grundwasserabsenkungen, sowie Überschwemmungen in Verbindung mit Erosion der Hangbasis. Außerdem tragen Frost-Tau-Zyklen oder Quell-Schwind-Verwitterung (also das Aufquellen von Erdmaterial mit nachfolgendem Zusammenziehen bei Trocknung), Permafrost-Tauen oder -Abbau bei. Zusätzlich steigern Gletscherrückgang, Gletscherabfluss, Gletscherseeausbrüche sowie Vegetationsverlust durch **Waldbrände** oder **Dürre** das Risiko für Erdrutsche (Formayer et al., 2025).

Erdrutsche und Bergstürze können auch zu teilweisen oder vollständigen Flussblockaden führen. So nimmt man zum Beispiel an, dass allein das Ötztal in den vergangenen 12.000 Jahren mindestens fünf Mal blockiert worden ist, das letzte Mal vor rund 3.000 Jahren.² Obwohl Erdrutsche als Gefahr bekannt sind, werden die Risiken von den von Erdrutschten gebildeten Dämmen manchmal unterschätzt. Eine solche Flussblockade kann zu Überflutungen im aufwärts gelegenen Tal führen. Ein Dammversagen kann das Gebiet stromabwärts hingegen katastrophal überfluten.³ Die größten Seen bilden sich in Gletschertälern in denen der sich zurückziehende Gletscher ein breites Tal hinterlassen hat. Die stärkste Stauung tritt dort auf, wo Erdrutsche eine Schlucht unter einem breiten Tal blockieren –

Mehr Starkregen und höhere Temperaturen in hohen Lagen

*Erdrutsche, Bergstürze, Muren?
Einteilung der gravitativen Massebewegungen nach Art des bewegten Materials und Bewegungsart*

Erdrutsche fordern Tote und verursachen hohe Schäden

Folgegefahr Flussblockaden und Flutwellen

¹ ifu.bayern.de/geologie/massenbewegungen.

² science.orf.at/stories/3200699/.

³ meetingorganizer.copernicus.org/EGU2020/EGU2020-8040.html.

eine Situation, die häufiger an den Grenzen zwischen unterschiedlichen tektonischen Einheiten vorkommt (Argentin et al., 2021).

Neue Modellrechnungen zeigen, dass bis zum Jahr 2030 rund ein Drittel der Gletscher in den gesamten Alpen verschwunden sein wird, schneller als bisher erwartet. Dabei werden die Gletscher der Ostalpen in diesem Zeitraum vollständig verschwinden.⁴ Im Prozess des Abschmelzens werden Gletscherseen größer. Seit den 1990er-Jahren hat sich weltweit die Anzahl und Fläche der Gletscherseen um etwa 50 % erhöht. Wenn diese plötzlich auslaufen, entstehen erhebliche Gefahren: Flutwellen können sehr zerstörerisch sein und treten oft ohne oder nur mit sehr kurzer Vorwarnzeit auf. In der Vergangenheit haben Gletscherseeausbrüche erheblichen Schaden an Berggemeinden, Infrastruktur, landwirtschaftlichen Flächen und Lebensräumen verursacht sowie zu vielen Todesfällen geführt (Lützow et al., 2023; Taylor et al., 2023).

Der Klimawandel kann außerdem direkte Auswirkungen auf die Lawinenaktivität haben. So beeinflussen Schwankungen der Schneelage und meteorologischer Faktoren die Auslösung und Ausbreitung von Lawinen über kurze Zeiträume. Zusätzlich wirken Folgen des Klimawandels indirekt, indem beispielsweise der Anstieg der Baumgrenze aufgrund der Erwärmung die Auslösung von Lawinen beeinflusst (Fuchs et al., 2025). Aufgrund der großen Variabilität bei Schneehöhe und Schneebedeckung in Bergregionen können die Auswirkungen auf die Lawinenaktivität unterschiedlich sein. Sie reichen von einer Verringerung oder Steigerung der Lawinenereignisse bis hin zu einem Wechsel von Trocken- zu Nassschneelawinen (Fuchs et al., 2025).

Für eine resiliente Gesellschaft ist die Vorbereitung und Anpassung an mehrere gleichzeitig oder nacheinander auftretende Gefahrenereignisse entscheidend. Bei der Risikobewertung einzelner Gefahren sollten deshalb auch Sekundäreffekte (wie Überschwemmungen, Erdrutsche) sowie gleichzeitig auftretende Ereignisse (wie Waldbrände, Hitzewellen, Dürren) berücksichtigt werden. Bisher gibt es nur wenige Studien, die Auswirkungen des Klimawandels auf Mehrfachgefahren (d. h. deren Auftreten, Häufigkeit und Ausmaß) in den österreichischen Alpen untersuchen, obwohl es in der Vergangenheit häufig Mehrfachgefahrenereignisse gegeben hat (Fuchs et al., 2025).

Es gibt mehrere technische Ansätze, um größere Massebewegungen zu überwachen. Bisher werden diese eher zur Dokumentation nach Ereignissen eingesetzt. **Fernerkundung** spielt bei der Bewertung von Naturgefahren eine entscheidende Rolle, wobei Drohnen, Flugzeuge, Helikopter und Satelliten eingesetzt werden. Diese können mit bildgebenden und nicht bildgebenden Sensoren ausgestattet werden, um die Untersuchung von Erdrutschungen zu unterstützen. Bildgebende Sensoren wie RGB-, Multispektral-, Wärme- und Hyperspektralkameras liefern Daten, die in Bilder umgewandelt werden können, und bieten detaillierte Informationen über die Oberfläche des Erdrutschgebiets (Chen et al., 2025). Nicht bildgebende Sensoren wie LiDAR und GPR (Ground Penetrating Radar) liefern wichtige Einblicke in die physikalischen Eigenschaften des Geländes. Während LiDAR Laserlicht für Abstandsmessungen nutzt, verwendet GPR elektromagnetische Wellen, um unterirdische Merkmale wie Bodenfeuchtigkeit und Materialgrenzen zu erfassen (Chen et al., 2025).

Gefahr
Gletscherseeausbrüche

Veränderte
Lawinenmuster

Kombinierte
Naturgefahren

Drohnen, Satelliten,
Helikopter und
Flugzeuge in
Erdrutschforschung
und -monitoring

⁴ oeaw.ac.at/news/andrea-fischer-gletscher-schmelzen-schneller-als-erwartet.

Durch die regelmäßige Datenerhebung mit Drohnen entstehen sehr genaue 3D-Modelle, beispielsweise von Gletscherzungen, bei denen dann Veränderungen sehr kleinteilig nachvollzogen werden können. Derzeit wird flächendeckendes Laserscanning zwar in vielen Bundesländern schon in regelmäßigen Abständen eingesetzt, um die gesamte Landesfläche zu vermessen, aber eher um aufgetretene Naturgefahrenereignisse hinterher genau zu erfassen. In Zukunft könnten damit auch Gefahrenprognosen erstellt werden.^{5,6} Beispielsweise können kleine Massebewegungen auf größere bevorstehende Rutschungen oder Bergstürze hindeuten, und bei rechtzeitiger Erkennung solche Prognosen verbessern.

Bisher ist die statistische Modellierung von Erdrutschgefahren ein gängiger Ansatz zur Identifizierung von Gebieten mit erhöhtem Erdrutschrisiko und unterstützt damit das proaktive Management von Erdrutschgefahren. Als Basis werden dafür meist Daten von vergangenen Rutschungen, sowie gemessenen Geländebeschaffenheit wie Steilheit genutzt (Schlögl et al., 2025).

Bei Überflutungen, sind oft detaillierte Schadensbewertungen oder sehr hochauflösende Satellitenbilder nicht sehr schnell verfügbar. Um in besonders betroffenen Gebiete möglichst schnell zu helfen, gibt es Ansätze Katastrophen-Hotspots schnell zu identifizieren, indem Satellitenbilder mit mittlerer Auflösung mit Daten aus den sozialen Medien (Bilder und Texte zu den Überschwemmungen) und frei verfügbaren ergänzenden Geodaten verknüpft werden (Wieland et al., 2025).

Um gefährdete Siedlungen und Infrastrukturen vor Naturgefahren zu schützen, ist bisher Verbauung die erste Wahl. Der Bund stellt jährlich 69 Millionen Euro für Maßnahmen der Wildbach- und Lawinenverbauung und Erosionsschutz zur Verfügung⁷. Das Monitoring von Naturgefahren wird inzwischen in allen Fachbereichen der Wildbach- und Lawinenverbauung (Wildbachprozesse, Schnee- und Lawinen, Massenbewegungen) angewendet⁸.

Als Grundlage der Raumordnung gilt der Gefahrenzonenplan, der auf dem Forstgesetz von 1975 in der aktuellen Fassung beruht.⁷ In historisch gewachsene Orten liegen aber oft Häuser und Ortsteile in heute als Gefahrenzonen ausgewiesenen Gebieten. Liegen Häuser in Gefahrenbereichen, muss teilweise auch über Umsiedlung nachgedacht werden. Dies kann sich aber sehr schwierig gestalten, etwa wenn ganze Ortsteile im Risikogebiet stehen, auch ist mit teils starkem Widerstand der Bevölkerung zu rechnen. In der Schweiz besteht ein Pflichtversicherungssystem für Häuser, die sogenannte „obligatorische Gebäudeversicherung gegen Elementargefahren“⁹, kommt es zur Umsiedlung wegen einer hohen Gefahr, wird das Haus als Totalschaden bewertet und die Bewohner:innen werden entsprechend entschädigt. Bei älteren Häusern sind die Versicherungssummen niedriger, was zu Schwierigkeiten führt Ersatz zu finden, wenn etwa woanders zu hohen Kosten neu gebaut werden muss.

*Ex-post Laserscanning
in vielen
Bundesländern
Standard*

*Modellierung von
Erdrutschrisiken*

*Schnelle Hilfe durch
die Verknüpfung von
Satellitenbildern und
Social-Media-Daten*

*Bisher häufigste
Antwort auf Gefahren:
Wildbach- und
Lawinenverbauung*

Umsiedlung

⁵ oeaw.ac.at/news/drohnen-vermessen-gletscherzungen.

⁶ uibk.ac.at/de/newsroom/2023/3d-laserscanning-zeigt-ausmass-des-fluchthorn-bergsturzes/.

⁷ naturgefahren.at/naturgefahrenmanagement/diewildbachundlawinenverbauung.html.

⁸ bmluk.gv.at/themen/wald/wald-und-naturgefahren/wildbach--und-lawinenverbauung/organisation-kontakt/fz_monitoring.html.

⁹ svv.ch/de/standpunkt/naturgefahren.

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Das Verständnis des Risikos von gravitativen Massebewegungen wie Erdrutschungen ist angesichts immer häufiger auftretender extremer Wetterereignisse und sich verändernder Landnutzung von entscheidender Bedeutung für eine nachhaltige Entwicklung und den Schutz von Siedlungen (Schlögl et al., 2025). Die medial intensiv über Wochen begleitete Katastrophe, durch die die gesamte Schweizer Ortschaft Blatten im Mai 2025 zerstört wurde, zeigt, welche verheerenden Auswirkungen die Kombination aus Bergsturz und Gletscherabbruch haben kann.¹⁰ Es wurde bereits 2022 aufgrund von Modellierungsdaten vor einem Bergsturz in dieser Region gewarnt und die gesamte Ortschaft dann wegen akuter Gefahrenreinschätzungen auf Basis aktueller Messdaten rechtzeitig evakuiert. Die Schweiz verfügt aber auch über ein dreistufiges Frühwarnsystem: Auf oberster Ebene messen Satelliten der europäischen Raumfahrtbehörde kleinste Massebewegungen, bei Verdachtsfällen werden dann Drohnen oder Helikopter für ein klares Lagebild eingesetzt. Da nicht immer klare Sicht herrscht, werden diese mit Daten aus festverbauten Messstationen verschränkt.¹¹

In Österreich beruhen Risikoeinschätzungen oft auf Kartierungen von kleinräumigen Stürzen und Hinweisen aus der Bevölkerung und von Expert:innen.¹² In Tirol kommen verschiedene Messsysteme zum Einsatz, neben geodätischen und geotechnischen Systemen werden auch Webcams und zuletzt vermehrt auch etwa terrestrische sowie luftgestützte Laserscanningmethoden eingesetzt.¹³ Ein Pilotprojekt testet ein KI- und Internet-of-Things-Sensorik-gestütztes Früherkennungssystem für Naturgefahren, wodurch eine präzise Analyse und Vorhersage ermöglicht werden soll.¹⁴ Generelle modellbasierte Rutschungsgefährkarten gibt es beispielsweise auf Landesebene in der Steiermark, diese zeigen kleinteilig die Abschätzung der Wahrscheinlichkeit von Rutschungen. Sie enthalten aber keine zeitliche und räumliche Prognose, wann Rutschungen auftreten können, und sind auch keine Grundlage für die Bemessung von Versicherungsprämien.¹⁵

*Aufbau eines
flächendeckenden
Frühwarnsystems nach
Vorbild Schweiz?*

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Einem Medienbericht zufolge plant Österreich ein flächendeckendes Überwachungssystem für Hangrutschungen mit der Einrichtung eines Kompetenzzentrums in Innsbruck¹⁶. Insbesondere könnten hier auch bisher ungenutzte Potenzial der satellitenbasierten Radarinterferometrie (SB-InSAR) genutzt werden. Diese kann Bodenbewegungen und Bauwerksdeformationen im Millimeterbereich

*Flächendeckendes
Überwachungssystem
geplant*

¹⁰ orf.at/stories/3395246/.

¹¹ srf.ch/news/schweiz/bergsturz-in-blatten-wie-moderne-ueberwachungssysteme-leben-retten.

¹² science.apa.at/power-search/4456427600392196599.

¹³ tirol.gv.at/sicherheit/geoinformation/vermessung-monitoring/monitoring/.

¹⁴ mci.edu/de/component/content/article/5784-kann-ki-naturgefahren-besser-vorhersagen?Itemid=101.

¹⁵ hochwasser.steiermark.at/cms/ziel/143959586/DE/.

¹⁶ meinbezirk.at/c-lokales/oesterreich-plant-landesweite-ueberwachung-von-hangrutschungen_a7418231.

überwachen, wie eine landesweite Studie in Niederösterreich zeigte. Hierzu wurden Daten des Sentinel-1 Satelliten der Europäischen Weltraumorganisation (ESA) ausgewertet, was eine flächendeckende, kontinuierliche Überwachung ermöglicht und erheblich genauer ist als herkömmliche Methoden (Dörfler et al., 2025). Der Aufbau eines solchen flächendeckendes könnten von einer begleitenden vorausschauenden TA-Studie profitieren indem mögliche intendierte und nicht-intendierte Folgen der Einführung in allen Gesellschaftsbereichen (rechtlich, politisch, ökonomisch, ökologisch und sozial) untersucht werden. Außerdem benötigt Österreich, aus Sicht einer im Klimawandel resilienten Gesellschaft, mehr Wissen über kombinierte Naturgefahren, also über die Risiken und Folgen gemeinsam oder nacheinander auftretender Ereignisse.

ZITIERTE LITERATUR

- Argentin, A. L., et al. (2021). Controls on the formation and size of potential landslide dams and dammed lakes in the Austrian Alps. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.*, 21(5), 1615-1637, nhess.copernicus.org/articles/21/1615/2021/.
- Chen, B., et al. (2025). Applications of UAV in landslide research: a review. *Landslides*, 22(9), 3029-3048, doi.org/10.1007/s10346-025-02547-2.
- Dörfler, M., et al. (2025). InSAR-PSNÖ: Landesweite Potentialstudie für die kontinuierliche, satelliten-basierte Vermessung von Boden- und Bauwerksbewegungen. *Amt der NÖ Landesregierung, Abteilung Allgemeiner Baudienst, Geologischer Dienst, noe.gv.at/noe/Kontakt-Landesverwaltung/Endbericht_InSAR_PS_NOE.pdf*.
- Formayer, H., et al. (2025). Physical and ecological manifestation of climate change in Austria. In D. Huppmann, et al. (Hrsg.), *Second Austrian Assessment Report on Climate Change (AAR2) of the Austrian Panel on Climate Change (APCC)*. Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, aar2.ccca.ac.at.
- Fuchs, S., et al. (2025). The Austrian Alps as multi-dimensional focal area. In D. Huppmann, et al. (Hrsg.), *Second Austrian Assessment Report on Climate Change (AAR2) of the Austrian Panel on Climate Change (APCC)*. Vienna: Austrian Academy of Sciences Press, aar2.ccca.ac.at.
- Giorgi, F., et al. (2016). Enhanced summer convective rainfall at Alpine high elevations in response to climate warming. *Nature Geoscience*, 9(8), 584-589, doi.org/10.1038/ngeo2761.
- Lützow, N., et al. (2023). A global database of historic glacier lake outburst floods. *Earth Syst. Sci. Data*, 15(7), 2983-3000, essd.copernicus.org/articles/15/2983/2023/.
- Schlögl, M., et al. (2025). Towards a holistic assessment of landslide susceptibility models: insights from the Central Eastern Alps. *Environmental Earth Sciences*, 84(4), 113, doi.org/10.1007/s12665-024-12041-y.
- Taylor, C., et al. (2023). Glacial lake outburst floods threaten millions globally. *Nature Communications*, 14(1), 487, doi.org/10.1038/s41467-023-36033-x.
- Wieland, M., et al. (2025). Fusion of geospatial information from remote sensing and social media to prioritise rapid response actions in case of floods. *Natural Hazards*, 121(7), 8061-8088, doi.org/10.1007/s11069-025-07120-7.

FINFLUENCER



© CC0 (Kaboompics.com/pexels)

ZUSAMMENFASSUNG

Finanz-Influencer (sog. Finfluencer) stellen Finanzthemen auf sozialen Medien einfach und verständlich dar. Manche vermitteln generelle Finanzkompetenz. Viele bewerben aber bestimmte Aktien, Kryptowährungen und andere Anlageprodukte, oft in Zusammenarbeit mit Unternehmen. Dabei fehlt vielen Finfluencern eine formale Ausbildung oder Zertifizierung im Finanzbereich, was zu Bedenken hinsichtlich Fehlinformationen, riskanter Anlageempfehlungen und mangelnder Risikostreuung führt. Besonders problematisch ist, dass die bei zertifizierter Finanzberatung bestehenden Anforderungen in Bezug auf die Berücksichtigung des persönlichen Risikoprofils der Kund:innen und Information über die Risiken der Finanzprodukte wegfallen. Hinzu kommt, dass Profile von Finfluencer:innen mit seriösen Absichten nur schwer von jenen mit verdeckten Interessenskonflikten oder gar von KI-Bots und Scammern zu unterscheiden sind. Derzeit sind Bestrebungen zur Regulierung und zur Information der Konsument:innen noch in den Anfängen.

Von demokratisiertem Finanzwissen über Schleichwerbung zu Krypto

ÜBERBLICK ZUM THEMA

In Österreich nutzen mehr als zwei Drittel der Bevölkerung täglich soziale Medien.¹ Zwischen Follower:innen und Influencer:innen besteht meist eine hohe Vertrauensbasis, weshalb Unternehmen diese als integralen Bestandteil ihrer Werbestrategie nutzen. Die als parasoziale Interaktion bezeichnete Bindung zwischen Followern und Medienpersönlichkeiten wirkt sich positiv auf die Wahrnehmung beworbener Produkte und auf Kaufabsichten aus (Meyer et al., 2023).

Auch die Finanzbranche nutzt diese Werbemöglichkeiten für ihre Zwecke. Geschäftsmodelle österreichischer Finfluencer:innen beruhen neben dem Verkauf von Coachings, Workshops und Seminaren auch stark auf Affiliate-Marketing. Dabei werden Unternehmen wie Banken oder Trading-Plattformen in den Beiträgen der Finfluencer:innen verlinkt, wodurch diese als Vertriebspartner Provisionen erhalten (Prantner, 2024). Einige der erfolgreichsten österreichischen Profile informieren nicht transparent und konsequent über diese finanzielle Abhängigkeit. Finfluencer:innen stehen vor dem Dilemma, authentisch wirken zu müssen, um ihre Followerzahl und Glaubwürdigkeit zu erhöhen, während ihr Geschäftsmodell andererseits erfordert, Markenkooperationen einzugehen und Sponsoring zu finden (Zhu & Wang, 2025).

Hayes and Ben-Shmuel (2024) identifizieren die folgenden vier Mechanismen, die Inhalte der Finfluencer:innen für einen breite Masse interessant machen: (1) Storytelling, also persönliche Anekdoten, Erfolgsgeschichten und nachvollziehbare Erzählungen; (2) strategischer Einsatz von Internet-Slang, Emojis und Hashtags, um komplexe Finanzbegriffe zu vereinfachen; (3) die Einbindung der Follower:innen in Diskussionen und Dialoge zur Erzeugung eines Zugehörigkeitsgefühls – als Gegensatz zur statischen Top-down-Beratung klassischer Finanzinstitutionen; (4) sowie das Bedienen einer Vielfalt persönlicher Hintergründe und finanzieller Realitäten verschiedener Bevölkerungsgruppen und das In-Frage-Stellen kanonisierten Fachwissens. Zusätzlich stellt emotionale Ansteckung einen wichtigen Erfolgsfaktor dar, wobei die Krypto-Asset-Branche besonders stark von Emotionen angetrieben wird und die Stimmung in den sozialen Medien einen erheblichen Einfluss auf Kryptopreise bis hin zu Marktblasen hat (Meyer et al., 2023).

Finfluencer:innen stellen in ihren Beiträgen auch Reichtum zur Schau, was ihre Follower:innen zum Geldanlegen motivieren kann, aber auch zu übermäßigem Konsumverhalten, unrealistischen finanziellen Erwartungen und psychischen Problemen führen kann (Hasanah et al., 2025). Oft wird der Eindruck vermittelt, dass hohe Gewinne bei geringem Risiko und wenig Aufwand erreichbar sind. Daraus können hohe Verluste folgen, wenn die Funktionsweise der Finanzprodukte nicht verstanden wird, sowie Verschuldung für Kredite, um als sicher dargestellte Produkte zu kaufen.² Eine rezente empirische Analyse von Bloomberg- und StockTwits Daten befand, dass für die Mehrheit der analysierten Finfluencer das Befolgen ihrer Ratschläge zu Verlusten führte, während es für knapp ein Drittel zu höheren Renditen führte (Kakhbod et al., 2024).

Finanztipps auf allen gängigen Social-Media-Plattformen

Finfluencer:innen in Österreich

Emotionen und persönliche Bindung als Treiber

Hohe Verluste und Verschuldung bei Jüngeren

¹ de.statista.com/themen/6743/influencer-marketing-in-oesterreich/#topicOverview.

² finanzbildung.oenb.at/blog/Blog_Zum-Thema/finfluencer.html.

Finanzberatung muss dem gesetzlichen Rahmen nach dem individuellen Risikoprofil in Bezug auf finanzielle Verhältnisse, Zielen des/der Kunden/Kundin sowie Erfahrungen und Kenntnissen mit den beabsichtigten Geschäften entsprechend erteilt werden, mit verbindlichen Informationen zu Risikoprofilen und Trends der Finanzprodukte, und Vermeidung bzw. Offenlegung von Interessenskonflikten.³ Einige der nachgefragtesten Angebote in Österreich sind in Bezug auf diese Informationen sehr vage und gehen nicht auf individuelle Risiken ein (Prantner, 2024).

Durch mangelnde Regulierung und Zertifizierung sind seriöse und unseriöse Angebote nur schwer voneinander zu unterscheiden. Die unübersichtliche Gemengelage und die emotional getriebene Dynamik des Influencing bieten fruchtbaren Boden für Finanzbetrug durch Scamming, wie etwa mittels angeblicher Kryptowährungen und illegaler Marktmanipulation, wie etwa durch Pump-and-Dump Schemes. So findet bei manchen angeblichen Kryptowährungskäufen gar keine Transaktion von Coins an die Käufer:innen statt, wohl aber eine Transaktion ihres Geldes. Bei Pump-and-Dump Schemes wird durch Empfehlungen ein Finanzprodukt gehypt, welches dadurch an Wert gewinnt, um es dann wieder abzustoßen. Dadurch verliert das Produkt abrupt an Wert und andere Anleger:innen machen ein Verlustgeschäft. Dazu gehören sogenannte Memecoins, die durch Verknüpfung mit emotional engagierenden Themen an Attraktivität gewinnen. Durch die Beteiligung von Finfluencer:innen, bisweilen in Kollaboration mit Emissären und Entwickler:innen, ergibt sich ein neuer und potenter Wirkungsmechanismus für diese Form der illegalen Marktmanipulation.⁴ Die Beeinflussung von Märkten über soziale Medien ist bereits ein Problem, vor dem die deutsche Bankenaufsichtsbehörde Bafin warnt.⁵ Bei der verbreiteten Nutzung von KI-Bots besteht ein fließender Übergang von der Imitation von Inhalten und Interaktionsmustern erfolgreicher Accounts hin zu Identitätsbetrug mittels Deepfakes, über den Finanzbetrug betrieben werden kann. So wurde etwa in Österreich mit angeblich vom Journalisten Armin Wolf stammenden Inhalten in scheinbare Investitionen in Kryptowährungen gelockt.⁶ Weltweit nehmen die Fälle von Identitätsbetrug und Scams rasant zu – dabei ist der Anteil von Investitionsscams besonders hoch und KI treibt diese Entwicklung an.⁷

Rat durch Finfluencer:innen ist besonders für Menschen attraktiv, die sich keine persönliche und professionelle Beratung leisten können und deren Existenz bei hohen Verlusten gefährdet sein kann. Ein besonderes Risiko entsteht durch die Schwierigkeit, verantwortungsvoll agierende Finfluencer:innen von unseriösen Akteur:innen zu unterscheiden. Investitionsbetrug verursacht erhebliche Schäden durch private Verluste und den Entzug produktiver Investitionsmittel. Marktmanipulation kann zu starken Preisverzerrungen führen (Dhawan & Putnins, 2022) und somit zu einer ineffizienten Ressourcenallokation. Eine erhöhte Preisvolatilität (Liu et al., 2022) und geschwächtes Vertrauen in den Markt können Investi-

*Anforderungen
an Finanzberatung
werden oft nicht erfüllt*

*Schwierige
Unterscheidbarkeit
seriöser Angebote
von Scams und
Marktmanipulation*

*Mögliche
volkswirtschaftliche
Schäden*

³ fma.gv.at/geldanlage/beratungsgespraech/.

⁴ bafin.de/DE/Verbraucher/Finanzbetrug/Anlagebetrug/Memecoins/anlagebetrug_memecoins_node.html.

⁵ bafin.de/DE/Verbraucher/Finanzbetrug/Anlagebetrug/Social_Media/social_media_node.html.

⁶ mimikama.org/bitcoin-scam-armin-wolf/.

⁷ moodys.com/web/en/us/kyc/resources/insights/uncovering-hidden-fraud-trends-the-rise-of-job-scams-and-data-exploitation.html.

tionen schwächen. Obwohl bisher noch kein gezielter Angriff auf die finanzielle Stabilität durch feindliche Akteure mithilfe durch Hypes mithilfe von „Finfluencer“-Accounts festgestellt wurde, wird angesichts von durch Social Media Posts ausgelöstes Leeren von Depots bei Crédit Suisse und der kollektiven Manipulation der GameStop-Aktie, u. a., vor dieser Möglichkeit gewarnt.⁸

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Eine repräsentative Studie der OeNB fand eine Tendenz österreichische Haushalte, dieselben negativen Risiken für sich selbst geringer als für vergleichbare Haushalte einzuschätzen,⁹ mit einer besonders geringen Fähigkeit zur Einschätzung negativer Risiken für Haushalte mit geringer Finanzbildung (Bucher-Koenen et al., 2024). Während die Austrian Survey of Financial Literacy (Fessler et al., 2019) zeigt, dass Österreicher:innen generell eher finanziell umsichtig, risikoavers und voraussichtig sind, zeigen damals 15-38-Jährige eine moderate Tendenz zu risikoreicherem und weniger voraussichtigem Verhalten. Angesichts der Vermögenswerte, welche diese Generation erben wird, sehen die Autor:innen ein enges Monitoring dieser Gruppe als wichtig an. Ihre besondere Beeinflussbarkeit durch Finfluencer:innen und davon schwer zu unterscheidende Akteure hebt die Wichtigkeit eines solchen Monitorings zusätzlich hervor. Es verfügen zwar die meisten Österreicher:innen über ausreichendes Finanzwissen, jedoch verstehen ca. 40 % nicht das Leitprinzip der Risikodiversifizierung, und etwa 15 % haben ein besorgniserregend geringes Wissen, und die große Mehrheit unter ihnen überschätzt ihr Wissen aber als hoch bis durchschnittlich (ibid.). Angesichts der relativ willkürlichen Auswahl beworbener Produkte, Empfehlung risikoreicher Produkte, unrealistischer Versprechen hoher Gewinne zu niedrigem oder sogar ohne Risiko trotz Einsatz von Fremdkrediten durch einige der meistkonsumierten Accounts in Österreich (Prantner, 2024) führt dies zu einer Konstellation, die unkluge Veranlagungen begünstigen kann.

*Differenziertes Wissen
über Chancen und
Risiken fehlt*

Die Europäische Wertpapier- und Marktaufsichtsbehörde ESMA warnt vor weitreichenden rechtlichen Folgen für Finfluencer:innen bei unwahren Behauptungen, selektiver Information, Verbreitung von Insiderinformation, und Marktmanipulation, die über soziale Medien auf einer deutlich größeren Skala als traditionell betrieben werden kann.^{10,11} Zwar greifen bereits bestehende Gesetze, wie im Werberecht und Verordnungen für Finanzberatung; jedoch ist das Ausmaß der Anwendbarkeit für die Tätigkeit von Finfluencer:innen noch unklar und deren Relevanz weder unter diesen selbst noch unter ihren Follower:innen ausreichend bekannt. Die derzeitigen Regulierungsbestrebungen im DACH-Raum sind im Vergleich zu anderen europäischen Ländern noch zurückhaltend (Binder-Tietz et al., 2024). Nach eigenen Angaben begrüßt die österreichische Finanzmarktauf-

*Unvollständiger
rechtlicher Rahmen*

⁸ [marketwatch.com/story/the-gamestop-saga-is-a-road-map-for-the-kremlin-and-other-enemies-of-america-heres-why-11612208909](https://www.marketwatch.com/story/the-gamestop-saga-is-a-road-map-for-the-kremlin-and-other-enemies-of-america-heres-why-11612208909), Biancotti & Ciocca, 2021.

⁹ Overplacement-Effekt.

¹⁰ esma.europa.eu/sites/default/files/2024-02/ESMA74-1103241886-912_Warnings_on_Social_Media_and_Investment_Recommendations.pdf.

¹¹ fma.gv.at/wp-content/plugins/dw-fma/download.php?d=7153&nonce=1888f7f09fcc14a.

sicht (FMA) die Tätigkeit von Finfluencer:innen, wenn diese über Anlagebetrug informieren und die Finanzbildung von Anleger:innen stärken, warnt allerdings auch vor Schneeballsystemen und fehlender Aufklärung über Risiken, Befangenheit und mangelnde Expertise.¹² Die FMA beschreibt deutlich, dass „jede andere Art von öffentlicher Kommunikation, einschließlich sozialer Medien, in der eine Person direkt oder indirekt Ratschläge oder Ideen zum Kauf oder Verkauf eines Finanzinstruments oder zur Zusammenstellung eines Portfolios von Finanzinstrumenten gibt“, eine Anlageempfehlung gemäß der Marktmissbrauchsverordnung (MAR) darstellt.¹³ Allerdings muss dies immer im Einzelfall geprüft werden. Finfluencer:innen gehören zu den Prüfungsschwerpunkten der FMA für 2025,¹⁴ und die FMA hat einen Dialog mit Finfluencer:innen initiiert.¹⁵

Von Seiten des Konsument:innenschutzes wird generell ein verbindlicher Qualifikationsnachweis für behauptete Finanzkompetenz eingefordert, ebenso wie der Nachweis einer Gewerbeberechtigung für Vermögensberatung.¹⁶ Die Universität Leipzig hat einen „Finfluencer Quality Score“ ermittelt, der Konsument:innen, Verbraucherschutzorganisationen und eine Zusammenarbeit erwägenden Unternehmen ein Bild von der Vertrauenswürdigkeit von Finfluencer:innen geben soll; dieser ist aber noch nicht als öffentlich zugängliches Werkzeug implementiert (ibid.).

*Qualifikations- und
Gewerbenachweis
gefordert*

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Es sollte eruiert werden, wie eine verbindliche Zertifizierung von Finfluencer:innen, angelehnt an die Kriterien für das Gewerbe der Finanzberatung, die Qualitätssicherung begünstigen kann. Es sollten Chancen und Risiken unterschiedlicher Maßnahmen, wie etwa eines öffentlich zugänglichen Registers zertifizierter Finfluencer:innen oder eines Q-Scores, abgeschätzt werden, welche die Unterscheidung zwischen seriösen Akteuren und mangelhaften Angeboten oder gar Scams erleichtern könnten. Eine solche Analyse sollte insbesondere auf in Entwicklung befindliche technische Instrumente zur Aufsicht, Möglichkeiten der Anpassung des rechtlichen Rahmens, Maßnahmen zum Gegensteuern bei Versuchen der Marktmanipulation, und Informationsmaßnahmen für Anbieter:innen und Konsument:innen eingehen. Hier sollte berücksichtigt werden, dass die Bildung parasozialer Beziehungen und Herdenverhalten das Risikoverhalten beeinflussen können.

*Zertifizierung,
Registrierung,
Information,
Regulierung und
Aufsicht sollten
erweitert werden*

¹² fma.gv.at/wp-content/plugins/dw-fma/download.php?d=7465&nonce=ac45eb5bfa50c6ae.

¹³ fma.gv.at/fma-facts-und-faqs-fuer-finfluencerinnen/.

¹⁴ fma.gv.at/wp-content/plugins/dw-fma/download.php?d=7153&nonce=1888f7f09fcc14a.

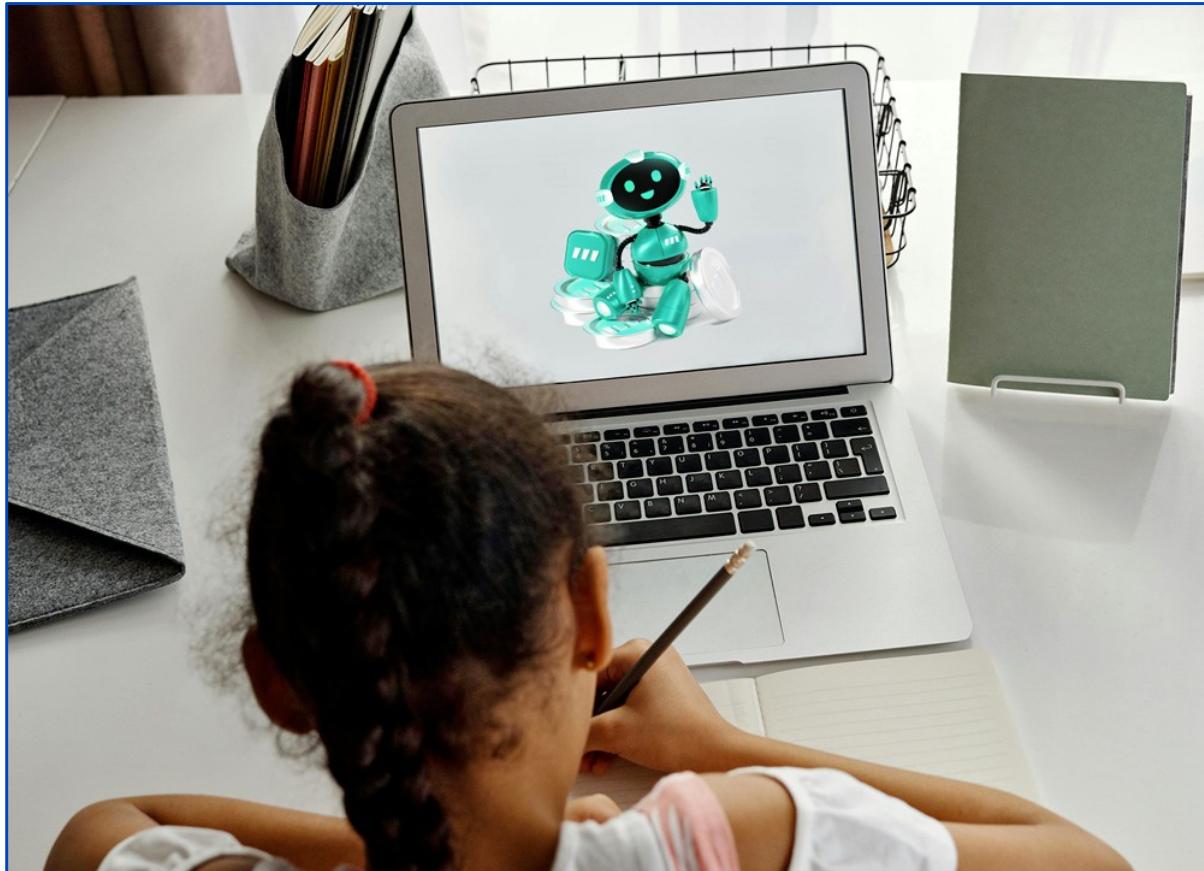
¹⁵ fma.gv.at/wp-content/plugins/dw-fma/download.php?d=7465&nonce=a368abfedc0961a8.

¹⁶ wien.arbeiterkammer.at/finfluencer.

ZITIERTE LITERATUR

- Biender-Tietz, S., et al. (2024). Finfluencer Relations. Anforderungen an Kooperationen zwischen Finfluencern und börsennotierten Unternehmen. DIRK-Forschungsreihe, Band 30. dirk.org/wp-content/uploads/2024/07/240607_Forschungsreihe-30_Finfluencer_Webversion.pdf.
- Biancotti, C., Ciocca, P., 2021. Financial Markets and Social Media. Lessons from Information Security. Carnegie Endowment for International Peace Working Paper. carnegie-production-assets.s3.amazonaws.com/static/files/Biancotti_Ciocca_FinCyber.pdf.
- Bucher-Koenen, T., Fessler, P., Silgoner, M., 2024. Households' risk perceptions, overplacement, and financial literacy. OeNB Working Paper 259. The Working Paper Series of the Oesterreichische Nationalbank. oenb.at/dam/jcr:8ef4cefa-ee69-4f68-8dac-9ee2a6942f6d/wp-259.pdf.
- Dhawan, A., Putnins, T., 2023. A New Wolf in Town? Pump-and-Dump Manipulation in Cryptocurrency Markets, Review of Finance, Vol. 27(3). doi.org/10.1093/rof/rfac051.
- Fessler, P., Jelovsek, M., Silgoner, M., 2020. Financial literacy in Austria – focus on millennials. Monetary Policy & the Economy, Oesterreichische Nationalbank, Q3/20, S. 21-38. oenb.at/dam/jcr:d0e4d3c1-83a2-466d-8efe-6749fc075d9b/04_MOP_Q3_20_Financial-literacy-in-Austria.pdf.
- Fessler, P., Weber, B., 2024. Crypto assets in Austria: an assessment of their prevalence and the motives of their holder. OeNB BULLETIN Q2/24. oenb.at/dam/jcr:bfb62787-3de9-4c85-9818-8170adb4d1f3/bulletin-june-2024-crypto-assets-in-austria.pdf.
- Hasanah, E. N., et al. (2025). Who deserves to be the finfluencer? *Journal of Open Innovation: Technology, Market, and Complexity*, 11(2), 100553, [sciencedirect.com/science/article/pii/S2199853125000885](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2199853125000885).
- Hayes, A. S., & Ben-Shmuel, A. T. (2024). Under the finfluence: Financial influencers, economic meaning-making and the financialization of digital life. *Economy and Society*, 53(3), 478-503, doi.org/10.1080/03085147.2024.2381980.
- Liu, J., Wu C., Lin, Y., Liu, J., 2022. Opening price manipulation and ist value influences. International Review of Financial Analysis, Vol.83. doi.org/10.1016/j.irfa.2022.102256.
- Kakhbod, A., Kazempour, S., Livdan, D., Schürhoff, N., 2024. Finfluencers. American Economic Association ASSA Annual meeting Conference Paper. aeaweb.org/conference/2025/program/paper/i3ry3n4t.
- Meyer, E. A., et al. (2023). High on Bitcoin: Evidence of emotional contagion in the YouTube crypto influencer space. *Journal of Business Research*, 164, 113850, [sciencedirect.com/science/article/pii/S0148296323002084](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0148296323002084).
- Prantner, C. (2024). Praxischeck Finfluencer:innen. Welche Inhalte posten österreichische Influencer:innen, die sich mit Geld & Finanzen beschäftigen, im Web und in sozialen Medien? *Arbeiterkammer Wien, wien.arbeiterkammer.at/beratung/konsumentenschutz/geld/geldanlage/2024-06-KS_Finfluencerinnen_gesamt_Web_V3.pdf*.
- Zhu, L., & Wang, Y. (2025). Acting real: a cross-cultural investigation of finfluencer strategic authenticity. *International Journal of Advertising*, 44(1), 164-183, doi.org/10.1080/02650487.2024.2437289.

KI-TUTOREN: EIN BEITRAG ZUR BILDUNGSGERECHTIGKEIT?



© CC0 (Thomas Bayer, August de Richelieu/pexels, Ant Rozetsky/unsplash)

ZUSAMMENFASSUNG

KI-Tutorensysteme analysieren Lernfortschritte, passen Inhalte an und geben sofortiges Feedback. Sie können Lernen individueller und gerechter gestalten, indem sie Schüler:innen aus einkommensschwachen oder bildungsfernen Familien gezielt fördern. Ihre Wirksamkeit hängt von pädagogischen Konzepten, funktionierender Infrastruktur und Datenschutz ab. Der EU-AI-Act stuft Bildungs-KI als Hochrisiko ein und verlangt Transparenz und Kontrolle. Um dennoch die Potenziale dieser Technologie im Bildungsbereich verantwortungsvoll nutzen zu können, muss ihr Einsatz untrennbar mit pädagogischer Qualität verbunden werden. Nur wenn technologische Innovation mit didaktischer und ethischer Reflexion einhergeht, können Effizienzgewinne erzielt werden, ohne dass soziale Verantwortung und Bildungsgerechtigkeit verloren gehen. Entsprechend sollte der Einsatz von KI-Tutoren bildungspolitisch und ethisch begleitet werden (klare Qualitätsstandards, gerechte Zugänge, Forschung zu sozialen Wirkungen).

*KI-Tutoren
als ambivalente
Innovation zwischen
individueller Förderung
und sozialer
Verantwortung*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Das Versprechen personalisierten Lernens ist nicht neu. Schon lange gilt individuelle Förderung als Schlüssel zu gerechteren Bildungschancen (Dumont & Ready 2023). Neu ist jedoch der technologische Rahmen: KI-gestützte Tutorensysteme – oft als Intelligente Tutorielle Systeme (ITS) bezeichnet – sind darauf ausgelegt, Eingaben und Lernfortschritte von Schüler:innen fortlaufend zu analysieren, Aufgaben und Tempo anzupassen und unmittelbares Feedback zu geben (Bacia et al. 2024). Grundlage sind Verfahren des maschinellen Lernens und der Sprachverarbeitung, die eine dialogische Interaktion zwischen Lernenden und System ermöglichen. Mit dem Aufkommen großer Sprachmodelle wie GPT-4 haben diese Systeme einen Entwicklungsschub erfahren (Houser 2025; Yamkovenko 2024): Im Vergleich zu früheren Generationen adaptiver Lernsysteme reagieren sie kontextsensitiver, erfassen komplexere Fragen und können Erklärungen in natürlicher Sprache oder in multimodalen Formaten liefern (Schleiss et al. 2023). Damit verbindet sich die Hoffnung, das Lernen der Schüler:innen stärker an individuelle Bedürfnisse anzupassen und Lehrkräfte zu entlasten. In der Praxis übernehmen KI-Tutoren bisher Aufgaben, die bislang nur in zeitaufwendigen Einzelsettings möglich waren, wie etwa sogenannte adaptive Übungen, die sich an den Lernfortschritt der Schüler:innen anpassen, sowie Fehlerdiagnose und Echtzeit-Feedback. Erste empirische Studien deuten hier auf positive Effekte hin: Lernende berichten über höhere Motivation, verbesserte Selbststeuerung und Lernfortschritte in Mathematik, Sprachen und Naturwissenschaften (Baillifard et al. 2024; Thomas et al. 2024; Rasheed et al. 2023). Diese positiven Effekte beruhen allerdings bisher vor allem auf Selbsteinschätzungen der Lernenden. Besonders in großen oder heterogenen Klassen könnten vor diesem Hintergrund Lehrkräfte durch den gezielten Einsatz solcher Systeme entlastet werden, um mehr Zeit für individuelle Betreuung oder kreative Lernformen zu gewinnen (Kerres et al. 2022).

Zwischen pädagogisch wertvoller Beziehung und technologischem Fortschritt – Chancen und Grenzen personalisierten Lernens

Schüler:innen aus einkommensschwachen oder bildungsfernen Haushalten könnten damit neue Bildungschancen erhalten. KI-Tutoren können Lernrückstände gezielter identifizieren, individuelle Übungswege anbieten und Lernbarrieren (etwa im Bereich Sprache oder Motorik) abbauen. UNESCO (2025) betont, dass digitale Lernsysteme gerade in ressourcenschwachen Kontexten Zugang zu qualitativ hochwertiger Bildung schaffen könnten, wenn sie sinnvoll in den Unterricht integriert und von unterstützenden Maßnahmen begleitet werden (siehe **Digitales Lernen**). Das an die Schulen herausgegebene Informationsmaterial spricht zwar negative Aspekte wie Halluzinationen, den hohen Ressourcenverbrauch von KI-Modellen sowie die Ausbeutung von Arbeitskräften und intellektuellem Eigentum beim Training der Daten an und bewertet Vor- und Nachteile unterschiedlicher Systeme, bietet jedoch bislang keine konkreten Anknüpfungspunkte für eine reflektierte Auseinandersetzung mit diesen Problemen im Hinblick auf mögliche Anwendungsfälle. Künftig sollte das Material diese Aspekte stärker berücksichtigen und gezielt Ansatzpunkte für eine kritische Diskussion im Unterricht bereitstellen.

Neue Bildungschancen für benachteiligte Schüler:innen

Digitale Lernsysteme

Ungleich verteilte digitale Infrastruktur verstärkt Bildungsungleichheit. Gleichzeitig zeigen sich deutliche Spannungsfelder. Die Personalisierung von Lerninhalten und Unterrichtsformen ist kein pädagogisch neutraler Prozess: Denn Daten von Schüler:innen (Lernverhalten, Fehlerprofile und Leistungsmuster) werden auf Grundlage historischer Daten algorithmisch bewertet. Damit entstehen neue Abhängigkeiten von Softwarearchitekturen, kommerziellen Anbietern und Trainingsdaten. Wie Holmes et al. (2019) zeigen, können Lernsysteme dadurch unbewusst bestehende kulturelle oder sprachliche Verzerrungen reproduzieren, wenn Trainingsdaten bestimmte Gruppen über- oder unterrepräsentieren. Eine gerechte Nutzung setzt daher algorithmische Transparenz sowie regelmäßige Prüfmechanismen voraus. Darüber hinaus entscheiden nicht nur die Qualität der Algorithmen, sondern auch der soziale und materielle Kontext über den Bildungserfolg mit KI. Ungleich verteilte digitale Infrastruktur kann die soziale Selektivität des Bildungssystems sogar verstärken (OECD 2024). Kinder aus Haushalten mit begrenztem Internetzugang oder geringerer technischer Unterstützung profitieren seltener von KI-basierten Angeboten, während gut ausgestattete Schulen und Haushalte Lernsoftware schneller implementieren können.

Zugleich zeigt sich im Bildungsdiskurs ein weiteres Spannungsfeld: Während eine zunehmende Nutzung von Smartphones und digitalen Medien im Schulalltag vielfach kritisch gesehen wird, fordern Politik und Bildungsforschung gleichzeitig mehr digitale Lernangebote. KI-Tutoren stehen exemplarisch für diese Ambivalenz zwischen technischer Innovationslogik und pädagogischer Skepsis. So ermöglichen adaptive Systeme individualisierte Förderung in bestimmten Kompetenzbereichen, wie bspw. durch automatisiertes Feedback, Fehlerdiagnose oder Aufgabenanpassung. Im Gegensatz dazu bleiben soziale Fähigkeiten, Kreativität und emotionale Entwicklung in diesen Lernkontexten weitgehend unberücksichtigt, obwohl sie für Bildungsgerechtigkeit sowie für individuelle Lernerfolge zentral sind (Bruner 1997). Außerdem birgt die vermehrte Nutzung digitaler Geräte im Unterricht das Risiko zusätzlicher Ablenkungen. Die zwischenmenschlichen Dimensionen lassen sich zudem durch KI-Systeme kaum ersetzen und bleiben Kernaufgabe pädagogischer Praxis. Durch eine unkritische Auseinandersetzung und der Tendenz, automatisierten Inhalten zu vertrauen, können bekannte Eigenschaften von KI zu Verwirrung und zum Lernen falscher Inhalte führen: Halluzinationen sind laut einer aktuellen Analyse KI-Modellen inhärent¹ und das derzeitige Design führt bei gängigen KI-Modellen zu einer hohen Rate an sykophantischen Antworten – also solchen, welche in den Fragen enthaltene Suggestionen trotz mangelnder Korrektheit bestätigen.² Studien zeigen zudem, dass automatisiertes Feedback die Beziehung zwischen Lehrkraft und Lernenden verändert, da das System selbst zum Vermittler pädagogischer Rückmeldungen wird (Kerres et al. 2022).

Aus Sicht der Technikfolgenabschätzung sind KI-Tutoren damit ein Beispiel für ‚ambivalente Innovationen‘. Sie können Bildungsgerechtigkeit stärken, wenn sie mit aller Sorgfalt als Instrument pädagogischer Differenzierung genutzt werden oder aber auch Ungleichheiten verschärfen, wenn sie unreflektiert eingesetzt werden. Entscheidend ist zu klären, welche pädagogischen Ziele mit dem Ein-

*Bewertung sensibler
Schüler:innendaten*

*Reproduktion
kultureller und
sprachlicher Bias*

*Soziale Fähigkeiten,
Kreativität und
emotionale
Entwicklung
unberücksichtigt*

*Die Beziehung
zwischen Lernenden
und Lehrkräften
ändert sich*

Datenschutz

*Ambivalente
Innovation*

¹ nature.com/articles/d41586-025-00662-7.

² nature.com/articles/d41586-025-03390-0.

satz von KI-Tutoren verfolgt werden sollen. Zwar versprechen sie eine stärkere Personalisierung und bedarfsorientierte Förderung, doch wenn sie primär zur Effizienzsteigerung eingeführt werden, kann dies zu einer Standardisierung von Lernpfaden führen, z. B. durch automatisierte Rückmeldungen und vordefinierte Übungssequenzen. Fehlt dabei die zwischenmenschliche Interaktion, besteht die Gefahr, dass Motivation, Lernbereitschaft und Beziehungsaufbau auf der Strecke bleiben. Wie der Schriftsteller Clemens J. Setz (2025) anmerkt, könnte sich daraus langfristig eine „tertiäre Analphabetisierung“ ergeben. Eine Kulturform, in der Menschen ohne KI kaum noch eigene Texte verfassen können.³

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Die dargestellten Entwicklungen sind auch für das österreichische Parlament von hoher Relevanz. Der zunehmende Einsatz KI-basierter Lernsysteme berührt zentrale Fragen der Bildungs-, Technologie- und Regulierungspolitik. Dabei geht es insbesondere um die Vereinbarkeit nationaler Maßnahmen mit europäischen Rahmenbedingungen, wie sie etwa durch den EU-AI-Act vorgegeben werden, der Bildungsanwendungen als Hochrisikosysteme einstuft. Laut dieser Verordnung müssen Schulen, Behörden und Anbieter dokumentieren, wie Daten erhoben und verarbeitet werden, und gewährleisten, dass algorithmische Entscheidungen nachvollziehbar bleiben. Systeme, die Emotionserkennung oder Leistungsprognosen auf Basis sensibler Merkmale einsetzen, sind ausdrücklich untersagt. Um einheitliche Standards zu schaffen und deren Einhaltung zu kontrollieren, braucht es eine stärkere Verzahnung rechtlicher und technischer Aufsicht.⁴

*Bildungsgerechtigkeit
politisch gestalten:
Regulierung,
Infrastruktur und faire
Teilhabe sichern*

Das Thema KI-Tutoren ist in Österreich Teil einer breiteren bildungspolitischen Digitalisierungsstrategie. Nach den Erfahrungen der COVID-19-Pandemie startete die Bundesregierung den „8-Punkte-Plan Digitale Schule“, der die Ausstattung aller Schüler:innen der Sekundarstufe I mit digitalen Endgeräten vorsah.⁵ Parallel dazu wurde mit eEducation Austria ein Netzwerk für digitale Bildung etabliert, dem mittlerweile über 4.000 Schulen angehören. Im Jahr 2023 präsentierte das Bildungsministerium das Schulpaket KI, mit dem KI-Anwendungen im Unterricht gezielt erprobt und gefördert werden sollen. In diesem Rahmen wurden über 100 Schulen aller Bundesländer als „KI-Pilotenschulen“ ausgewählt, die gemeinsam mit der Universität Graz erste Erfahrungen mit KI-gestützten Lernsystemen sammeln (Radosavljevic 2024). Diese Maßnahmen zeigen, dass Österreich frühzeitig begonnen hat, die Nutzung von KI im Schulkontext strategisch zu gestalten. Zugleich verdeutlichen sie den wachsenden Bedarf an politischer Steuerung, Qualitätssicherung und einer sozial ausgewogenen Umsetzung.

³ Setz, C. J. (2025, 28. Juni). Schriftsteller Clemens J. Setz: ChatGPT und seine Folgen. Der Standard. derstandard.at/story/3000000275725/schriftsteller-clemens-j-setz-chatgpt-und-seine-folgen.

⁴ The EU AI Act: Implications for Ethical AI in Education. Swiss Cyber Institute: swisscyberinstitute.com/blog/eu-ai-act-implications-ethical-ai-education/.

⁵ III-1233 der BeilStenProtNR XXVII. GP, Rechnungshof GZ 2024-0.711.314 (005.130): rechnungshof.gv.at/rh/home/home/2024_29_8_Punkte_Plan_digitale_Schule.pdf.

Neben den regulatorischen Fragen spielt der sozialpolitische Kontext eine zentrale Rolle. Österreich zählt laut OECD (2025) und dem Nationalen Bildungsbericht Österreich 2024 (BMBWF 2024) weiterhin zu jenen Ländern, in denen der Bildungserfolg stark mit der sozialen Herkunft korreliert. Kinder aus einkommensschwächeren oder bildungsfernen Haushalten sind überproportional gefährdet, früh den Anschluss zu verlieren, insbesondere wenn zugleich sprachliche Barrieren bestehen und Schulen nicht über ausreichende Ressourcen verfügen, um diese zu kompensieren. Wenn KI-Tutoren zu gerechteren Lernchancen beitragen sollen, braucht es gezielte Maßnahmen gegen den digital divide (van Deursen & van Dijk 2019). Das betrifft nicht nur die technische Ausstattung der Schulen, sondern auch Elternarbeit sowie den Abbau sprachlich-kultureller Barrieren. Zudem sollten Schulen mit einem hohen Anteil benachteiligter Lernender prioritär bei der Einführung solcher Systeme unterstützt werden und Lehrkräfte pädagogische Unterstützung erhalten, denn sie tragen Verantwortung für Auswahl, Nutzung und Interpretation von KI-basierten Lernsystemen. Ohne ausreichende Qualifizierung besteht die Gefahr, dass Softwareentscheidungen unreflektiert übernommen und pädagogische Urteilsfähigkeit eingeschränkt werden. Das Parlament kann hierfür Programme zur Lehrer:innenbildung, Weiterqualifizierung und Forschung zur digitalen Didaktik stärken. In Kooperation mit dem Bildungs- und Wissenschaftsministerium sowie den Ländern könnten verbindliche Qualitätsstandards für ein pädagogisch, ethisch und rechtlich verantwortbares KI-gestütztes Lernen entwickelt werden.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Um das Potenzial personalisierten Lernens für mehr Bildungsgerechtigkeit zu nutzen, könnte Österreich eine strategisch koordinierte Einführung und Begleitforschung von KI-Tutorensystemen verfolgen. Außerdem könnten die Ergebnisse von Pilotprojekten und Initiativen zu KI-Tutorensystemen in unterschiedlichen schulischen Kontexten hinsichtlich ihrer Wirkungen, Risiken und Erfolgsbedingungen evaluiert werden. Grundlage aller Maßnahmen wäre eine Reflexion darüber, welche Werte und Ziele das Bildungssystem leiten. KI sollte diese nicht vorgeben, sondern pädagogische Verantwortung und demokratische Bildungsziele wie Mündigkeit und kritisches Denken unterstützen.

Schließlich wäre eine nationale Dialogplattform „KI und Bildungsgerechtigkeit“ sinnvoll, angesiedelt beim Parlament oder in Kooperation mit der ÖAW. Sie könnte Politik, Wissenschaft, Zivilgesellschaft und Schulpraxis vernetzen, um Chancen, Grenzen und ethische Leitlinien kontinuierlich zu reflektieren. So ließe sich gewährleisten, dass KI-gestütztes Lernen als Teil einer gesellschaftlich verantworteten Bildungspolitik verstanden wird, die pädagogische Beziehungen stärkt und gerechte Lernchancen fördert.

*Strategische
Einführung, klare
Standards und Dialog
für gerechtes
KI-gestütztes Lernen*

*Digitale
Infrastrukturen*

*Evaluations- und
Studienbedarf*

ZITIERTE LITERATUR

- Bacia, E. et al. (2024). Innovative Lernumgebungen gestalten. Leitfaden für die Nutzung Intelligenter Tutorieller Systeme im Schulalltag. Düsseldorf: Vodafone Stiftung Deutschland.
- Baillifard, A. et al. (2024). Effective learning with a personal AI tutor: A case study. *Education and Information Technologies*, 30, 297–312.
- BMBWF (2024). Nationaler Bildungsbericht Österreich 2024. Wien.
bmb.gv.at/dam/jcr:44811bb5-3206-4d80-bb90-9d31063bef13/nbb2024.pdf.
- Bruner, J. (1997). The Culture of Education. Harvard University Press.
- Dumont, H. & Ready, D. D. (2023). On the promise of personalized learning for educational equity. *npj Science of Learning*, 8(1).
- Houser, K. (2025). "Sal Khan wants to give every student on Earth a personal AI tutor". *Freethink*, 2025. freethink.com/consumer-tech/khanmigo-ai-tutor.
- Kerres, M. et al. (2022). Interaktive, adaptive und künstlich-intelligente Lernprogramme. Wiesbaden: Springer.
- OECD (2024). The Potential Impact of Artificial Intelligence on Equity and Inclusion in Education. No. 23. OECD Artificial Intelligence Papers, Paris.
- Radosavljevic, M. (2024). KI-Initiative des BM. Informationen zur Initiative des BM zur Verwendung von KI an österreichischen Schulen – Umsetzung des Schulpakets KI durch eEducation, Austria.
education.at/community/ki-initiative-des-bm.
- Rasheed, Z. et al. (2023). Harnessing Artificial Intelligence for Personalized Learning. *Data and Metadata*, 2, 146.
- Schleiss, J. et al. (2023). Künstliche Intelligenz in der Bildung. Zenodo.
- Thomas, D. et al. (2024) Improving Student Learning with Hybrid Human-AI Tutoring: A Three-Study Quasi-Experimental Investigation". Proceedings of the 14th Learning Analytics and Knowledge Conference, ACM, 404–15.
doi.org/10.1145/3636555.3636896.
- UNESCO (2025). UNESCO spotlights how digital learning can promote equity in low-resource contexts. unesco.org/en/articles/unesco-spotlights-how-digital-learning-can-promote-equity-low-resource-contexts.
- Van Deursen, A. J. & Van Dijk, J. A. (2019). The first-level digital divide shifts from inequalities in physical access to inequalities in material access. *New Media & Society*, 21(2), 354–375. doi.org/10.1177/1461444818797082.
- Yamkovenko, S. (2024). "Top AI-in-Education Moments of 2023: The Year Artificial Intelligence Dominated Education News". *Khan Academy Blog*, 2024.
blog.khanacademy.org/khanmigo-top-ai-in-education-moments-of-2023-the-year-artificial-intelligence-dominated-education-news-kl.

RESILIENTE DÜNGERVERSORGUNG (AKTUALISIERT)



© CC0 (Craig Cooper/unsplash)

ZUSAMMENFASSUNG

Mineralische Stickstoff-, Phosphor- und Kalidünger sind Segen und Fluch zugleich. Sie steigern die landwirtschaftliche Produktivität, verursachen aber gleichzeitig Klima- und Umweltprobleme und machen die Ernährungssicherung von wenigen Ländern und fossilen Energieträgern abhängig. Für eine resiliente, dekarbonisierte und nachhaltige Nährstoffversorgung ist die Erforschung und Anwendung alternativer Ansätze und Technologien notwendig. Beispiele hierfür sind die Entwicklung neuer Verfahren zur Stickstoffproduktion, die Nutzung sekundärer Phosphorquellen, insbesondere Klärschlamm, und von Polyhalit als Ersatz für chloridhaltige Kalisalze, aber auch die Züchtung neuer Pflanzensorten, die Nährstoffe aus dem Boden mobilisieren können, der Einsatz von Pflanzenkohle und die effiziente Nährstoffdüngung durch KI und Precision Agriculture. Die kohärente Zusammenführung der verschiedenen Ansätze erfordert eine kontextspezifische Bewertung der für Österreich geeigneten Technologien und Maßnahmen zur Nährstoffversorgung und die Entwicklung einer nationalen Strategie für eine resiliente, klimaneutrale und effiziente Nährstoffversorgung.

*Technologiebewertung
und Entwicklung
einer nationalen
Nährstoffstrategie
für eine resiliente,
klimaneutrale und
effiziente
Düngerversorgung
in Österreich*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Mineraldünger mit den für das Pflanzenwachstum wichtigen Nährstoffen Stickstoff, Phosphor und Kalium haben in der Landwirtschaft zu erheblichen Ertragssteigerungen geführt. Produktion und Anwendung von Mineraldüngern sind jedoch nicht nachhaltig. Stickstoff wird großindustriell durch chemische Synthese von Ammoniak aus atmosphärischem Stickstoff und Wasserstoff nach dem Haber-Bosch-Verfahren gewonnen. Die Ammoniaksynthese erfolgt an einem eisenhaltigen Katalysator bei etwa 150 bis 350 bar und 400 bis 500 °C und verursacht etwa 5 % der globalen Treibhausgasemissionen (Gao & Cabrera Serrenho, 2023).

Phosphor und Kalium sind räumlich und mengenmäßig begrenzt, da sie mineralisch gebunden in Lagerstätten vorkommen (v. a. Apatit und Sylvit). Phosphor steht seit 2017 auf der EU-Liste der kritischen Ressourcen¹, da die Versorgung von wenigen Förderländern wie Nordafrika, Jordanien, Russland und China, und deren geopolitischer Stabilität abhängt. Der Abbau von Phosphor ist ökologisch problematisch und die Mineralien enthalten gesundheitsgefährdende Metalle und radioaktive Substanzen wie Cadmium oder Uran (Issaoui et al., 2021). Diese schränken den Einsatz als Düngemittel zunehmend ein. Auch der Einsatz von Mineraldünger führt zu Umweltproblemen. Bei der derzeitigen landwirtschaftlichen Praxis werden nur 14 % des Stickstoffs und 16 % des Phosphors von den Pflanzen genutzt (Daneshgar et al., 2018). Der Großteil der Nährstoffe geht verloren und führt zu Luft-, Boden- und Wasserverschmutzung, Klimawirkungen durch Ammoniak- und Lachgasemissionen und Biodiversitätsverlust. Vor allem in Regionen mit viel Vieh wird durch den hohen Anfall von Wirtschaftsdüngern häufig mehr Stickstoff auf die Flächen ausgebracht, als die Kulturpflanzen aufnehmen können. Überdüngung wirkt sich auch auf die Gesundheit aus, da hohe Stickstoffgehalte in Blatt- und Wurzelgemüse bei der Verdauung in Nitrit umgewandelt werden können, das für die Gesundheit schädlich ist.² Mit der „Farm to Fork Strategy“ will die EU-Kommission das Nährstoffmanagement verbessern und bis 2030 den Mineraldüngereinsatz um 20 % und die Nährstoffverluste um 50 % reduzieren.³ Selbst in den ambitioniertesten Szenarien zeigen neuere Studien, dass diese Ziele lediglich von 4 bis 5 Ländern erreicht werden können, Österreich gehört nicht dazu (Batoool et al., 2025).

Der Einsatz von Mineraldüngern hat auch eine sozioökonomische Dimension. Denn Versorgungsgapse und Preissteigerungen bei Mineraldüngern, insbesondere aufgrund höherer Energiekosten, wirken sich auf die Verbraucherpreise für Nahrungsmittel aus. Vor dem Hintergrund der ökonomischen, ökologischen und sozioökonomischen Auswirkungen der Mineraldüngerproduktion und -anwendung sowie begrenzter Substitutionsmöglichkeiten ist die Transformation der Nährstoffversorgung in ein effizientes Kreislaufsystem für die Entwicklung nachhaltiger Wertschöpfungsketten unabdingbar. Dazu bedarf es einer langfristigen Konzeption der Nährstoffpolitik und einer nationalen Nährstoffstrategie, die ver-

*Mineraldünger-
versorgung ist weder
resilient noch
nachhaltig*

*Dekarbonisierung und
Transformation der
Nährstoffversorgung
ist für die
landwirtschaftliche
Produktion
unerlässlich*

*Nährstoffverluste
durch Düngung
belasten Luft, Boden
und Wasser und
gefährden Klima und
Biodiversität.*

*EU Strategie
„Farm to Fork“
reduziert
Düngereinsatz
um 20 %*

*Preissteigerungen
bei Düngemitteln
verteuern
Nahrungsmittel*

*Effizientes
Kreislaufsystem
notwendig*

¹ eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474.

² landeszentrum-bw.de/Lde/Startseite/wissen/nitrat-im-gemuese-wirklich-so-bedenklich.

³ food.ec.europa.eu/document/download/472acca8-7f7b-4171-98b0-ed76720d68d3_en?filename=f2f_action-plan_2020_strategy-info_en.pdf.

schiedene politische Ziele, Technologien und Strategien von der Düngemittelproduktion über die Anwendung bis hin zum Nährstoffrecycling umfasst.

Der Abbau von Polyhalit, einem Mineral, das Kaliumchlorid, Kalzium, Schwefel und Magnesium enthält, kann helfen, die Versorgung mit Kalidüngemitteln zu verbessern. Abbau und Nutzung sind aufgrund der mineralischen Zusammensetzung, der schwer erreichbaren Lage (200 bis 1.000 m unter der Erde) und des relativ geringen Reinheitsgrades schwierig und begrenzt (Tan et al., 2022). In einem Naturpark in North Yorkshire, Großbritannien, plant Sirius Minerals den weltweit größten Abbau von hochwertigem Polyhalit und hat dafür das österreichische Bauunternehmen STRABAG beauftragt.⁴ Polyhalit kann als chloridärmer Kalidünger vermarktet werden, ist aber aufgrund des geringeren Kaliumgehalts kein vollständiger Ersatz für Kalidünger.

Alternativ wird an der Verbesserung der Aufnahme von Kalium und Phosphor aus dem Bodenvorrat geforscht, da die in der Regel großen Bodenvorräte überwiegend nicht pflanzenverfügbar sind. Durch die Züchtung von Genotypen kann die Freisetzung organischer Säuren aus Pflanzenwurzeln erhöht und damit die Verfügbarkeit von im Boden gebundenem Phosphor und Kalium verbessert werden⁵ (Zörb et al., 2014). Mikroben wie das stickstofffixierende Bakterium *Pseudomonas chlororaphis*, die gebundenen Phosphor für Pflanzen bioverfügbar machen, sind ebenfalls Gegenstand der Forschung. Die Mikroben sind jedoch aufgrund ihrer Empfindlichkeit gegenüber Stressfaktoren wie Temperatur und Feuchtigkeit schwierig zu produzieren und zu transportieren, was eine großflächige Einführung in der Landwirtschaft erschwert (Burke et al., 2023).

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, *Phosphor aus Klärschlamm zu recyceln*. In Österreich fielen im Jahr 2018 rund 237.000 Tonnen (t) Klärschlamm aus kommunalen Kläranlagen an, wovon der Großteil (53 %) thermisch behandelt wurde. Etwa 20 % dieses Klärschlamm wurde direkt auf landwirtschaftlich genutzte Flächen aufgebracht und ca. 27 % einer weiteren Behandlung (z. B. Kompostierung) zugeführt. Durch die Nutzung von Phosphor aus kommunalem Klärschlamm (6.700 t/a) und tierischen Abfällen (5.500 t/a) könnten theoretisch 75 % der Mineraldüngerimporte substituiert werden (Leonhardt & Pinkl, 2020). Durch die thermochemische Behandlung kann der Phosphorgehalt im Klärschlamm auf unter 2 % reduziert und als Produkt z. B. Struvit gewonnen werden, das zur Herstellung von Phosphordünger geeignet ist (Clemens & Teloo, 2020). Die Verfahren sind jedoch weder großtechnisch etabliert noch konkurrenzfähig (Leonhardt & Pinkl, 2020). Zudem erfordern Rezyklate wie Struvit eine professionelle Vermarktung, die aufgrund der vergleichsweise geringen Düngemittelmengen nicht wirtschaftlich ist (Clemens & Teloo, 2020). Instrumente zur Förderung des Recyclings sind z. B. Recyclingquoten für die Düngemittelindustrie oder Vorgaben zur Phosphorrückgewinnung für Kläranlagen, so wie sie in Deutschland ab 2029 für Kläranlagen mit mehr als 50.000 Einwohnern verpflichtend sind (Kind, 2020). Ähnliche rechtliche Rahmenbedingungen und Anreize für ein effizientes Recycling sind auch in Österreich angedacht.

*Hoffnungsträger
Polyhalit als Ersatz
für Kalidünger*

*Forschung
zur verbesserten
Pflanzenaufnahme von
Kalium und Phosphor*

*Phosphorrecycling
aus Klärschlamm hat
großes Potenzial*

⁴ strabag.com/databases/internet/_public/content.nsf/web/861E4C21EBCAF2C1C125825F002C32A1.

⁵ d-nb.info/964804751/34.

Bei der Stickstoffproduktion kann das energieintensive Haber-Bosch-Verfahren zur Synthese von Ammoniak aus Stickstoff und Wasserstoff durch technische Modifikationen zur Nutzung von grünem Wasserstoff und erneuerbarem Strom überwiegend klimaneutral gestaltet werden. Dies zeigt die erste kommerzielle Anlage zur Herstellung von grünem Ammoniak in Puertollano (Spanien).⁶ Alternative Ansätze sind Power-to-Ammonia-Prozesse, die mit neuen Katalysatoren bei deutlich niedrigeren Temperaturen und Drücken sowie mit neuen Strategien zur Wärmeintegration als Dampfersatz arbeiten. Sie ermöglichen flexible und dezentrale Ammoniakreaktoren und Energieeinsparungen von bis zu 50 % (Torrente-Murciano & Smith, 2023). Andere forschen an Katalysesystemen, die Licht als Energiequelle für die Ammoniakproduktion nutzen (Ashida et al., 2022). Allerdings sind Verfahren, bei denen Stickstoff mithilfe von Licht, Wasser und Molybdän-Katalysatoren bei Raumtemperatur erzeugt wird, noch weit von der industriellen Reife entfernt (Durrani, 2024).

*Erforschung
alternativer
Verfahren zur
Stickstofferzeugung*

In Ergänzung zu alternativen Verfahren zur Mineraldüngerherstellung kann die Resilienz der Düngerversorgung durch Effizienzsteigerungen in der landwirtschaftlichen Praxis erhöht werden. Die konventionelle Landwirtschaft arbeitet aufgrund der regionalen Konzentration der Tierhaltung teilweise mit hohen Stickstoff- und Phosphorüberschüssen. Diese können ohne Ertragseinbußen reduziert werden. Geeignete Ansätze zur Verbesserung der Nährstoffeffizienz sind Methoden zur Bestimmung der Nährstoffe in Wirtschaftsdüngern und Technologien zur Verbesserung der Ausbringungsverteilung. Precision-Farming-Technologien können die Effizienz des Düngereinsatzes weiter steigern.⁷ Mit Hilfe von KI und Daten, z. B. von Stickstoffsensoren und Satelliten, werden Düngerapplikationskarten erstellt und die Düngerausbringung gezielt angepasst. Der Einsatz von Precision Farming in der Landwirtschaft erfolgt trotz der Vorteile allerdings nur zögerlich.

*Verbesserung der
Nährstoffeffizienz
durch Precision
Farming*

Auch die im Rahmen der „Farm-to-Fork“-Strategie geplante Ausweitung des ökologischen Landbaus in der EU auf 25 % der landwirtschaftlichen Nutzfläche kann einen Beitrag zur Erreichung einer resilienten Düngerversorgung leisten. Der Anteil der biologisch bewirtschafteten Fläche in Österreich liegt zwar bereits bei 27 %, ist aber noch ausbaufähig.⁸ In der biologischen Landwirtschaft werden organische Düngemittel eingesetzt und es wird weitgehend auf mineralische Düngemittel verzichtet. Die Nährstoffversorgung wird durch den Anbau von stickstoffsammelnden Leguminosen sichergestellt, die mit Hilfe von Knöllchenbakterien Luftstickstoff in den Boden einbringen. Auch Pflanzenkohle aus der pyrolytischen Verkohlung von pflanzlichen Reststoffen wird in Österreich als Nährstoffspeicher zur Steigerung der Düngeeffizienz und als Bestandteil von Terra Preta hergestellt und gilt als *Negativ-Emissionstechnologie*.⁹ Es bestehen jedoch Wissenslücken über die Wirkung von Pflanzenkohle.¹⁰

*Höherer Anteil an
Bioland verringert
Bedarf an
Mineraldünger durch
Nutzung organischer
Dünger und
Pflanzenkohle*

⁶ fertiberia.com/en/greenammonia/h2f-project/.

⁷ tab-beim-bundestag.de/projekte_digitalisierung-der-landwirtschaft.php.

⁸ landwissen.at/wp-content/uploads/2023/11/BML_Broschuere_Biologische_Landwirtschaft_231108_BF.pdf.

⁹ parlament.gv.at/dokument/XXV/AB/8575/imfname_538434.pdf.

¹⁰ bafu.admin.ch/dam/bafu/de/dokumente/klima/fachinfo-daten/faktenblatt-pflanzenkohle-2022.pdf.download.pdf/D_Faktenblatt_Pflanzenkohle.pdf.

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Die Regulierung von Pflanzennährstoffen ist in europäischen und nationalen Rechtsbereichen verankert. Trotz ihrer zentralen Bedeutung für die Landwirtschaft und Ernährungssicherung ist eine nachhaltige Bereitstellung und Nutzung von Düngemitteln jedoch nicht gewährleistet. Es fehlt an einem Bewusstsein in Politik und Öffentlichkeit für dieses hochrelevante Thema und an einer kohärenten Strategie zum Düngemanagement (Brownlie et al., 2021) sowie an ökonomischen Instrumenten, um die Governance-Defizite des Ordnungsrechts auszugleichen (Garske et al., 2020). Um die Investitionsanreize und die Marktreife einzelner Technologien zu erhöhen und Skaleneffekte zu nutzen, bedarf es einer klugen Förderpolitik. Zudem ist zu prüfen, ob durch die Verfahren und Techniken ein Mehrwert für die Erreichung von Nachhaltigkeitszielen erzielt werden kann. In diesem Zusammenhang sind auch die Anforderungen aus der Praxis zu berücksichtigen. Es bedarf einer Analyse der ökonomischen, ökologischen und soziökonomischen Chancen und Herausforderungen einer Transformation der Düngemittelversorgung und -nutzung, z. B. durch KI und Precision Farming (Rösch, 2006) und deren Trade-offs für Landwirtschaft, Klima und Umwelt. Mit dieser Analyse wird die Wissensbasis geschaffen, um die komplexen Produktions- und Konsummuster nachhaltig zu verbessern und optimierte Strategien zu entwickeln, mit denen die Akzeptanz sowohl bei den Landwirten als auch bei den Verbrauchern erhöht werden kann (Kurniawati et al., 2023).

*Gesetzgebung
und Förderpolitik
für eine resiliente,
nachhaltige und
am Kreislaufprinzip
orientierten
Nährstoffversorgung
und
Ernährungssicherung*

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

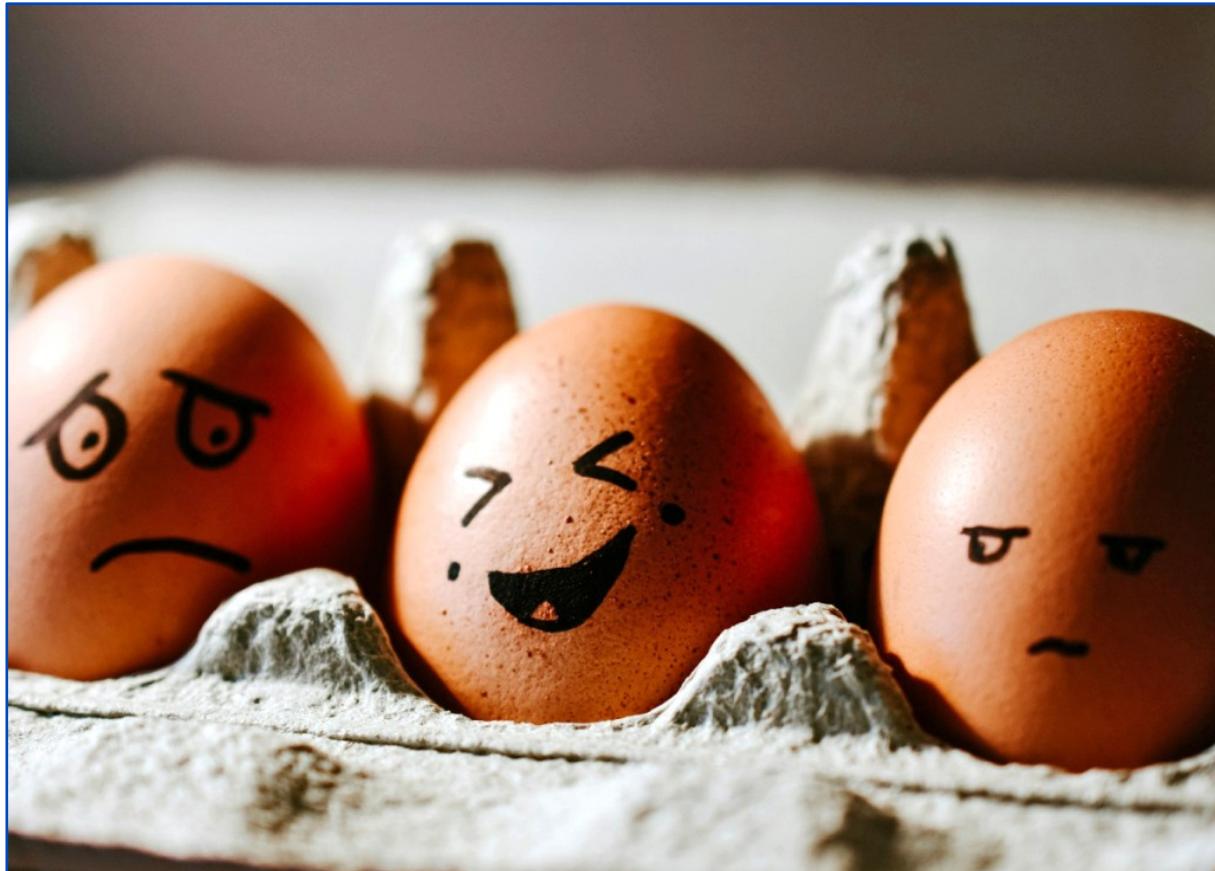
Um für Österreich geeignete Strategien und Maßnahmen zur Reduktion des Düngereinsatzes um 20 % (Farm-to-Fork-Strategie) und für ein effizientes und klimaneutrales Nährstoffmanagement zu entwickeln, bedarf es einer umfassenden Analyse des Forschungs- und Wissensstandes sowie der rechtlichen Rahmenbedingungen. Dazu gehören die Schließung nationaler und regionaler Nährstoffkreisläufe und eine gesellschaftliche Diskussion über die Zukunft der Nährstoffbereitstellung und -nutzung. Voraussetzung ist die Schaffung einer aktuellen Wissensbasis, um die verschiedenen Technologien und Verfahren für eine resiliente und klimaneutrale Versorgung mit mineralischen und organischen Nährstoffen bewerten zu können. Dabei sollten ökonomische, ökologische und soziökonomische Aspekte sowie Chancen und Risiken entlang der Wertschöpfungskette berücksichtigt und Stakeholder und Bürger:innen integriert werden, um die Relevanz der Studie und den Transfer der Ergebnisse in die Praxis zu verbessern.

*Bewertung von
Technologien und
Verfahren als
Grundlage einer
österreichischen
Strategie für eine
resiliente und
klimaneutrale
Düngerversorgung*

ZITIERTE LITERATUR

- Ashida, Y., et al 2022. „Catalytic Nitrogen Fixation Using Visible Light Energy“. *Nature Communications* 13(1):7263. doi.org/10.1038/s41467-022-34984-1.
- Brownlie, W. J., et al. 2021. „Global Actions for a Sustainable Phosphorus Future“. *Nature Food* 2(2):71–74. doi.org/10.1038/s43016-021-00232-w.
- Burke, B., et al. 2023. „Self-Assembled Nanocoatings Protect Microbial Fertilizers for Climate-Resilient Agriculture“. *JACS Au* 3(11):2973–80. doi.org/10.1021/jacsau.3c00426.
- Clemens, J., und Teloo. 2020. „Anforderungen an Phosphorzyklate aus der Aufbereitung von Klärschlamm aus Sicht eines Düngemittelherstellers“.
- Daneshgar, S., Callegari, A., Capodaglio, A. und Vaccari, D.. 2018. „The Potential Phosphorus Crisis: Resource Conservation and Possible Escape Technologies: A Review“. *Resources* 7(2):37. doi.org/10.3390/resources7020037.
- Durrani, J. 2024. Ammoniakproduktion „Jenseits von „Haber-Bosch“. *Spektrum der Wissenschaft*, (2.24), pp. 66–72.
- Gao, Y. und A. Cabrera Serrenho. 2023. „Greenhouse Gas Emissions from Nitrogen Fertilizers Could Be Reduced by up to One-Fifth of Current Levels by 2050 with Combined Interventions“. *Nature Food* 4(2):170–78. doi.org/10.1038/s43016-023-00698-w.
- Garske, B., et al. 2020. „Sustainable Phosphorus Management in European Agricultural and Environmental Law“. *Review of European, Comparative & International Environmental Law* 29(1):107–17. doi.org/10.1111/reel.12318.
- Issaoui, R., et al. 2021. „Cradle-to-Gate Life Cycle Assessment of Beneficiated Phosphate Rock Production in Tunisia“. *Sustainability Management Forum | NachhaltigkeitsManagementForum* 29(2):107–18. doi.org/10.1007/s00550-021-00522-8.
- Kind, S. 2020. *Nachhaltige Phosphorversorgung*. doi.org/10.5445/IR/1000133950.
- Kurniawati, A., et al. 2023. „Understanding the Future of Bio-Based Fertilisers: The EU's Policy and Implementation“. *Sustainable Chemistry for Climate Action* 3:100033. doi.org/10.1016/j.scca.2023.100033.
- Leonhardt, C., und J. Pinkl. 2020. Strategieprozess Zukunft Pflanzenbau Herausforderungen. Wien.
- Rösch, C. 2006. „Precision Agriculture – Landwirtschaft per Satellit und Sensor“ ISBN: 978-3-86641-080-0. KITopen-ID: 1000103648
- Tan, H., et al. 2022. „Toward the Replacement of Conventional Fertilizer with Polyhalite in Eastern China to Improve Peanut Growth and Soil Quality“. *Chemical and Biological Technologies in Agriculture* 9(1):94. doi.org/10.1186/s40538-022-00363-7.
- Torrente-Murciano, L., und C. Smith. 2023. „Process Challenges of Green Ammonia Production“. *Nature Synthesis* 2(7):587–88. doi.org/10.1038/s44160-023-00339-x.
- Zörb, C. et al. 2014. „Potassium in Agriculture – Status and Perspectives“. *Journal of Plant Physiology* 171(9):656–69. doi.org/10.1016/j.jplph.2013.08.008.

EMOTIONSERKENNUNG ALS HOFFNUNGSGEBIET DER KI? (AKTUALISIERT)



© CC0 (Nik/unsplash)

ZUSAMMENFASSUNG

KI wird zunehmend dazu eingesetzt, Muster in Gesichtern, Sprache, Texten, Körpersignalen und Verhaltensweisen zu erkennen und daraus Analysen und Vorhersagen über emotionale Zustände, Vorlieben und Persönlichkeitsmerkmale von Menschen zu erstellen. Die Systeme können in vielfältigen Bereichen eingesetzt werden – etwa durch Sicherheitsbehörden an Grenzen und im öffentlichen Raum, bei der therapeutischen Betreuung in der Medizin, bei der Unterstützung von Schüler:innen in der Bildung, im personalisierten Marketing oder der Personalentwicklung in der Arbeitswelt. Die Verlässlichkeit der Systeme muss jedoch aufgrund der dahinterliegenden Modelle und psychologischen Annahmen kritisch eingeordnet werden. Zudem ergeben sich vielfältige Herausforderungen bei Fragen der Diskriminierung, des Datenschutzes, der ethischen Verantwortung für besonders schutzwürdige Gruppen, des Strukturwandels politischer Öffentlichkeiten und der Verschärfung sozialer Ungleichheit in der Arbeitswelt.

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Mit dem Fortschritt im Bereich der künstlichen Intelligenz eröffnen sich neue Möglichkeiten, menschliches Verhalten einer bestimmten *Emotionskategorie zuzuordnen* und daraus weiter Schlüsse über emotionale Zustände, charakterliche Eigenschaften oder Verhaltensweisen von Menschen zu ziehen.¹ 1995 führte Rosalind Picard dafür den Begriff „Affective Computing“ ein (Picard 2000). Entsprechende KI-Systeme können dabei auf verschiedene Datensorten wie biometrische Signale, Bilder, Texte, Interaktions- und Audio- und Videodaten zurückgreifen. Eine bereits lang erprobte Variante ist die Analyse und Voraussage von Charaktereigenschaften und Vorlieben auf Social-Media-Plattformen. Genutzt werden dabei Interaktionsmuster, um Profile von Nutzer:innen zu erstellen (Kosinski, Stillwell & Graepel 2013). Eine weitere Möglichkeit besteht in der Erfassung visueller Daten durch Systeme der Gesichtserkennung, die über die Mimik Gefühlszustände von Personen erfassen. Die heutigen Systeme zur Gesichtserkennung basieren vor allem auf sogenannten holistischen Ansätzen. Im Gegensatz zu merkmalsbasierten Ansätzen, in denen tatsächlich vorhandene, biometrische Daten wie der Abstand der Augen vermessen werden, erfassen holistische Systeme ausschließlich Helligkeitsverteilungen in einem Bild (Meyer 2019, S. 321-359). Darüber hinaus können auch biometrische Daten wie die Herzfrequenz, der Pupillendurchmesser oder die Muskelaktivität zur emotionalen Erkennung verwendet werden. Die benötigten Sensoren können inzwischen auch mobil eingesetzt werden – etwa in Form von Wearables wie Smart Watches (Khare et al. 2024). Insbesondere mit der Verbreitung von Large-Language-Models (LLM) ist zudem das Erkennen von Emotionen aus Texten immer effektiver möglich. Teilweise werden Emotionen direkt benannt, teilweise werden sie aus Beschreibungen, Ausrufen oder anderen rhetorischen Wendungen ermittelt (Yang 2023).

KI zur Erkennung von Emotionen kann in vielfältigen Bereichen zum Einsatz kommen. So sind Kfz-Assistenzsysteme, die Müdigkeit aufgrund des Lenkverhaltens, der Pedalnutzung oder über ein Kamerasystem die Kopfhaltung oder das Blickverhalten kontrollieren, bereits auf dem Markt erhältlich.² Das Fraunhofer-Projekt EMOBIO will beispielsweise Systeme auf KI-Basis weiterentwickeln, die physiologische Daten für die Erkennung von (Mikro-)Emotionen verwenden, um so verschiedene Fahrerzustände zu ermitteln.³ Die EU ließ im Projekt iBorderCtrl einen Lügendetektor entwickeln, der Einreisende aus Drittstaaten automatisch aufgrund von Mikroexpressionen im Gesicht analysieren soll.⁴ Ebenso könnten KI-Systeme zur Emotionserkennung in vielen Bereichen der öffentlichen Daseinsvorsorge angewendet werden. In der psychologischen Betreuung werden vor allem von privaten Anbietern in den letzten Jahren Chatbots wie Woebot⁵ oder Wysa⁶ basierend auf KI-Sprachmodellen angeboten. Die Anwendungen sollen den Zugang zu *therapeutischen Angeboten* vor dem Hintergrund knapper Therapie-

*Emotionserkennung:
neue Möglichkeiten
mit KI*

*Vielfältige
Anwendungsgebiete:
Sicherheit, öffentliche
Daseinsvorsorge,
Marketing ...*

¹ t3n.de/news/emotion-ai-maschinen-lernen-1149606/.

² bussgeldkatalog.org/muedigkeitserkennung.

³ hci.iao.fraunhofer.de/de/Human-Centered-AI/feinfuehlige-technik/KI-gestuetzte-Emotionserkennung.html.

⁴ mdr.de/wissen/naturwissenschaften-technik/eu-grenzschutz-kuenstliche-intelligenz-einreise-luegendetektor-100.html.

⁵ woebotehealth.com.

⁶ wysa.com.

plätze erleichtern und mittels strukturierter Übungen und Selbsthilfeinhalten kurzfristige Hilfe bei Depressionen oder Angststörungen bieten (Swartz 2023). In der Pflege wird ein Einsatz im Zusammenhang mit Pflege-Robotern und deren Probleme diskutiert (Manzeschke & Assadi 2023). Die Systeme könnten dort die Emotionen von Pflegebedürftigen erkennen, um damit das Interaktionsverhalten von Robotern zu steuern. Auch im Online-Marketing auf Social-Media- und Marktplatzplattformen liegt ein Einsatzgebiet. Hier können Produktempfehlungen an die emotionalen Zustände von Personen angepasst werden, um Kaufentscheidungen zu stimulieren (Zeng et al. 2016). Visuelle Emotionserkennung soll darüber hinaus die Lücke zwischen digitaler und analoger Welt im Bereich personalisierter Werbung schließen. Über Videoüberwachungen sollen etwa die Gesichter von Kund:innen im Einzelhandel erfasst werden, um ihre Reaktionen auf bestimmte Produkte zu analysieren und daraufhin maßgeschneiderte Werbung abspielen zu können (Meyer 2021, S. 42). Ho et al 2021 stellen eine Fokus-Verschiebung des affektiven Computings fest, weg von Diagnose und Erkennung psychischer Krankheiten hin zu mehr kommerziellen Anwendungen (**KI-Tutoren**). Ein weites Einsatzfeld bieten zudem prinzipiell die Arbeitswelt und der Bildungsbereich. Im Bildungswesen könnte die Technologie zur Weiterentwicklung von Lernumgebungen genutzt werden – von der Unterstützung lernbeeinträchtigter Menschen über die flexible Anpassung von Lerninhalten an emotionale Reaktionen bis hin zur Konzentrationsüberwachung von Schüler:innen oder Studierenden (Büchling et al. 2019, Yuvarai 2025). In der Arbeitswelt lassen sich KI-Systeme zur Emotionserkennung sowohl für Bewerbungsprozesse als auch zur internen Personalentwicklung und Leistungskontrolle verwenden. Per Video aufgezeichnete Bewerbungsgespräche könnten automatisch nach Mimik, Gestik und Sprache ausgewertet werden und so Auskunft über die Persönlichkeiten der Bewerber:innen geben.⁷ Ebenso könnten sie betrieblich bei der internen Bewertung von Mitarbeiter:innen eingesetzt werden, um auf Grundlage einer Persönlichkeits- und Leistungsanalyse Personalentscheidungen zu treffen. Solche Systeme werden beispielsweise in den USA bereits eingesetzt. In der EU ist Emotionserkennung, die mit dem Arbeitsplatz oder dem Bildungsbereich in Zusammenhang steht, gemäß KI-Gesetz (AI Act) künftig verboten. Sie bergen das Risiko der Diskriminierung und können als Überwachungstechnologien eingesetzt werden, die auf intime zwischenmenschliche oder körperliche Äußerungen von Beschäftigten bzw. Schüler:innen abzielen. Dadurch könnten gesetzlich verankerte Rechte, etwa die Streikfreiheit, die gewerkschaftliche Vereinigungsfreiheit oder das Recht auf Gründung eines Betriebsrates, unterminiert werden.

Für alle KI-Systeme zur Emotionserkennung gilt, dass sie mit bestehendem Material wie Bildern oder Texten trainiert werden, um daraus Muster zu erkennen, denen Emotionen zugeordnet werden. Die Ableitung von Emotionen und Persönlichkeitsmerkmalen aus beobachtbarem Verhalten und Aussehen von Personen ist jedoch umstritten. Die EU-Kommission weist darauf hin, dass „im Hinblick auf die wissenschaftliche Grundlage von KI-Systemen, die darauf abzielen, Emotionen zu erkennen oder abzuleiten, [...] ernsthafte Bedenken“ bestehen. Emotionen sind nicht unmittelbar empirisch überprüfbar, weshalb ihr Ersatz durch messbare Stellvertretermerkmale (proxy features) nicht überprüft werden kann. Dadurch steht die Verlässlichkeit der Modelle grundsätzlich in Frage. Zum einen müssen Trainingsdaten oftmals von Menschen mit bestimmten Emotionen klassifiziert

**Hochrisiko-Anwendungen:
Arbeitswelt und
Bildungsbereich**

Herausforderungen:

- Zuverlässigkeit der Modelle
- Bias
- Diskriminierung
- Datenschutz

⁷ algorithmwatch.org/de/sprachanalyse-hr/.

werden, um eine KI zu trainieren. Dazu werden meist Klassifikationsansätze verwendet, in denen zwischen sechs sogenannten Basisemotionen unterschieden wird – Trauer, Freude, Angst, Ekel, Überraschung und Ärger –, denen eine bestimmte typisierte Ausdrucksweise – etwa eine Mimik – zugewiesen wird (Ekman 1971). Die Systeme abstrahieren damit weitgehend von der Vielfalt emotionaler Zustände, ihrer Repräsentation in Mimik, Interaktionsweisen oder Texten und ihrem Zusammenhang mit stabilen Persönlichkeitsmerkmalen zu Gunsten einer schematischen Zuordnung stereotyper Ausdrücke. Insbesondere für Modelle zur Gesichtserkennung konnte festgestellt werden, dass die zugeschriebenen Emotionen oftmals der Vielfalt emotionaler Ausdrücke in realen Alltagssituationen und in verschiedenen kulturellen Räumen nicht gerecht werden (Feldman Barrett et al. 2019). Daran anschließend eröffnet sich das Risiko der Diskriminierung. Denn weil die dominanten Modelle hinter emotionaler Mustererkennung eher stereotyp sind und sie meist mit historischem Datenmaterial trainiert werden, laufen sie Gefahr, Bevölkerungsgruppen und emotionale Ausdrucksweisen zu diskriminieren, die nicht als normal und durchschnittlich gelten oder bisher in bestimmten Datensätzen nicht repräsentiert waren. Eingesetzt zur Überwachung des öffentlichen Raums oder bei Grenzkontrollen bergen die Systeme die Gefahr, dass sie vor allem den Gesichtsausdrücken nicht-weißer Menschen negative Emotionen zuschreiben und sie damit als Gefährder:innen markieren (Rhue 2018). Eine Herausforderung ist auch der Datenschutz, da in vielen Anwendungsfällen die Verarbeitung (inkl. Speicherung und Analyse) sensibler personenbezogener Daten erfolgt, und zwar in einer Situation des Machtungleichgewichts zwischen Überwachenden und Überwachtem. Durch die zunehmende Nutzung generativer KI eröffnen sich zudem Risiken der emotionalen Manipulation durch KI-Chatbots. Affektive Systeme können beispielsweise verstärkend auf psychisch labile Jugendliche einwirken, die im Extremfall in den Suizid getrieben werden.⁸

Unabhängig von der Verlässlichkeit der Modelle und Trainingsdaten stellen sich insbesondere in wirtschaftlichen Anwendungsbereichen grundlegende gesellschaftspolitische Fragen. Im Online-Marketing kann die Personalisierung von Produkten und Dienstleistungen durch KI-basierte Emotionserkennungssysteme zur Manipulation von sozialem Verhalten führen, weil Kund:innen durch die Analyse unbewusster emotionaler Zustände zu Konsumententscheidungen bewegt werden. Oftmals werden die Daten zur emotionalen Analyse dabei in digitalen Diensten gesammelt, die Nutzer:innen wegen ganz anderer Zwecke – etwa der sozialen und politischen Teilhabe oder der Informationsbeschaffung – verwenden. Dies birgt die Gefahr, dass kulturelle und politische Öffentlichkeiten durch ökonomische Zwecke strukturiert werden, was Folgen auf die Funktionsfähigkeiten des demokratischen Austauschs und den sozialen Zusammenhalt haben kann. Beispielsweise ist nachgewiesen, dass die an Werbung orientierte, algorithmische Sortierung von Inhalten auf Social-Media-Plattformen den emotionalen Zustand von Nutzer:innen beeinflusst (Kramer et al. 2014) und damit auch politische Mobilisierung lenken kann.

*Emotionalisierung
politischer
Öffentlichkeiten*

⁸ the-decoder.de/wie-chatgpt-die-suizidalen-gedanken-eines-16-jaehrigen-bestraerte/.

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

In der KI-Verordnung (AI-Act) der Europäischen Union wurde 2023 ein Rechtsrahmen vorgelegt, der den Einsatz KI-basierter Emotionserkennungssysteme auch für Österreich regelt.⁹ Die Regulierung erfolgt entsprechend dem risikobasierten Ansatz des AI-Act mit verschiedenen Regulierungsinstrumenten, gestuft je nach Risikokategorie. In die Kategorie der nicht-akzeptablen Risiken fallen Emotionserkennungssysteme, die im Bereich des Arbeitsplatzes und in Bildungseinrichtungen eingesetzt werden sollen. Sie sind verboten, es sei denn, sie werden aus medizinischen und Sicherheitsgründen eingesetzt. Als Hochrisiko-KI-Systeme werden unter anderem solche Modelle bezeichnet, die im Bereich der Beschäftigung, des Personalmanagements, des Zugangs zu grundlegenden öffentlichen Diensten, in bestimmten Bereichen der Strafverfolgung und Grenzkontrollen eingesetzt werden. Derartige Systeme sind erlaubt, allerdings bestehen zahlreiche regulatorische Anforderungen, wie z. B. der kontinuierliche Betrieb eines Risikomanagementsystems.

Daraus ergibt sich, dass der Einsatz von KI-Systemen zur Emotionserkennung in Österreich in einigen oben beschriebenen, sensiblen Bereichen zwar bereits verboten oder unter strenge Auflagen gestellt ist. Allerdings ist ihr Einsatz in allen anderen Bereichen grundsätzlich erlaubt. Zudem ergeben sich gesetzgeberische Lücken und Grauzonen. Das Verbot betrifft nur KI-Systeme zur Emotionserkennung aus biometrischen Daten. Textbasierte Analysen bleiben erlaubt (EU-Kommission 2025).¹⁰ Die Verordnung erlaubt zudem die Erfassung physischer Zustände wie Schmerz oder Ermüdung, etwa für Fahrerassistenzsysteme. Die Abgrenzung zu Emotionen bleibt jedoch unscharf. Außerdem ist der Einsatz im Bereich des Arbeitsplatzes verboten, aber die Anwendung im Personalmanagement erlaubt. Welche Daten dabei beispielsweise von Personalabteilungen für das Personalmanagement erhoben werden dürfen und welche in den Bereich des Arbeitsplatzes fallen, dürfte in den folgenden Jahren Gegenstand von Rechtsprechungen und sozialen Aushandlungen werden. Die Klärung der Auslegung der Regulierung soll zwar durch delegierte Rechtsakte, gemeinsame Spezifikationen, Standardisierungen, Leitlinien etc. von verschiedenen Akteur:innen auf verschiedenen Ebenen innerhalb der EU erfolgen. Es kann aber auch vermutet werden, dass Gültigkeits- und Auslegungsfragen erst langfristige durch Gerichtsentscheidungen geklärt werden oder Regelungslücken bestehen bleiben.

*Grauzonen rechtlicher
Regulierung*

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

In einer TA-Studie wären die Grenzen KI-basierter Emotionserkennungssysteme kritisch zu hinterfragen. Aufgrund der vielfältigen Einsatzmöglichkeiten solcher Systeme und der einsetzenden Regulierung durch die EU wäre es zudem lohnenswert, zu überprüfen, in welchen rechtlichen Grauzonen sie angewendet werden

⁹ Siehe Version vom 13. März 2024, [europarl.europa.eu/RegistreWeb/search/simpleSearchHome.htm?references=P9_TA\(2024\)0138&language=de](http://europarl.europa.eu/RegistreWeb/search/simpleSearchHome.htm?references=P9_TA(2024)0138&language=de).

¹⁰ digital-strategy.ec.europa.eu/de/library/commission-publishes-guidelines-prohibited-artificial-intelligence-ai-practices-defined-ai-act.

können, obwohl dadurch ethische bzw. soziale Probleme entstehen könnten. Beispielsweise bieten die teils unklaren Regulierungen in der Arbeitswelt Streitpotential, in welchen Bereichen solche KI-Systeme eingesetzt werden dürfen und wo nicht. Daran anschließend sollte untersucht werden, wo Betroffene aufgrund besonderer Abhängigkeitsverhältnisse und Vulnerabilität wenig Möglichkeiten haben, geltendes Recht einzuklagen. Dies betrifft etwa den Einsatz in den Grenzbehörden, aber auch in sozial wenig abgesicherten, prekären Arbeitsverhältnissen.

ZITIERTE LITERATUR

- Ekman, P. (1971): Universal and cultural differences in facial expression of emotion. In: Cole J. (Hg.): Nebraska Symposium on Motivation. Lincoln, 207–282.
- Feldman Barret, L. et al. (2019). Emotional Expressions Reconsidered: Challenges to Inferring Emotion From Human Facial Movements. *Psychological science in the public interest* 20(1), 1–68, doi.org/10.1177/1529100619832930.
- Ho, M.-T., Mantello, P., Nguyen, H.-K. T., & Vuong, Q.-H. (2021). Affective computing scholarship and the rise of China: A view from 25 years of bibliometric data. *Humanities and Social Sciences Communications*, 8(1), 282. doi.org/10.1057/s41599-021-00959-8.
- Khare, S. K. et al. (2024). Emotion recognition and artificial intelligence: A systematic review (2014–2023) and research recommendations. *Information Fusion* 102, 102019. doi.org/10.1016/j.inffus.2023.102019.
- Kosinski, M. et all (2013). Private traits and attributes are predictable from digital records of human behavior. *PNAS* 110 (15), 5802–5805, doi.org/10.1073/pnas.1218772110.
- Kramer, Adam D. I. et al. (2014). Experimental Evidence of Massive-Scale Emotional Contagion through Social Network. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America* 111 (29), 8788–8790, doi.org/10.1073/pnas.1320040111.
- Manzeschke, A., & Assadi, G. (2023). Künstliche Emotion – Zum ethischen Umgang mit Gefühlen zwischen Mensch und Technik. *Ethik in der Medizin*, 35(2), 201–219. doi.org/10.1007/s00481-023-00766-6.
- Meyer, R. (2019). Operative Porträts. Eine Bildgeschichte der Identifizierbarkeit von Lavater bis Facebook. Konstanz University Press: Konstanz.
- Meyer, R. (2021). Gesichtserkennung. Digitale Bildkulturen. Verlag Klaus Wagenbach: Berlin.
- Picard, R. (2000). Affective Computing. MIT Media Laboratory Perceptual Computing Section Technical Report No. 321.
- Rhue, L. (2018). Racial Influence on Automated Perceptions of Emotions, dx.doi.org/10.2139/ssrn.3281765.
- Swartz, H. A. (2023). Artificial Intelligence (AI) Psychotherapy: Coming Soon to a Consultation Room Near You? *American Journal for Psychotherapy*, (76) 2., 55–56, doi.org/10.1176/appi.psychotherapy.20230018.
- Yang, Tao et al. (2023): PsyCoT: Psychological Questionnaire as Powerful Chain-of-Thought for Personality Detection. In: Bouamor, H. et al. (Hg.): Findings 2023. Singapore. doi.org/10.18653/v1/2023.findings-emnlp.216.
- Yuvraj, R., Mittal, R., Prince, A. A., & Huang, J. S. (2025). Affective Computing for Learning in Education: A Systematic Review and Bibliometric Analysis. *Education Sciences*, 15(1), 65. doi.org/10.3390/educsci15010065.

SONNENSTÜRME UND WELTRAUMWETTER (AKTUALISIERT)



© CC0 (Chris Henry/unplash)

ZUSAMMENFASSUNG

Weltraumwetterphänomene wie Sonnenstürme haben das Potential, das menschliche Leben auf der Erde aufgrund unserer Abhängigkeit von diesbezüglich vulnerabler kritischer Infrastruktur über Wochen oder Monate stark in Mitleidenschaft zu ziehen. Vor allem die als Querschnittsinfrastruktur bezeichneten Netze für Strom und Kommunikation, die die Basis für das Funktionieren aller anderen Bereiche kritischer Infrastrukturen darstellen, wären stark betroffen. Seit einigen Jahren gewinnt das Forschungsfeld durch die steigende Abhängigkeit von diesen Technologien an Relevanz. Welche Probleme sind zu erwarten und was kann in Österreich getan werden, um für einen höheren Grad an Resilienz zu sorgen?

*Welche Auswirkungen
hätten massive
Sonnenstürme auf
Österreich?*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Sonnenflecken, die mit starken Magnetfeldern an der Sonnenoberfläche und der Strahlungsintensität der Sonne einhergehen, folgen einem etwa elfjährigen Zyklus. Wir befinden uns aktuell im Sonnenfleckenzzyklus 25, dessen Maximum nach einer Korrektur der Prognosen letzten November für den Zeitraum Jänner bis Oktober 2024 erwartet wird. Während dieses Maximums ist mit einer deutlich erhöhten Sonnenaktivität zu rechnen, die in der Anzahl der sog. Sonnenflecken sichtbar wird. Es wird angenommen, dass das bevorstehende Maximum deutlich über dem Maximum des Zyklus 24 liegen wird, jedoch, wie die Maxima der Zyklen davor, noch unterhalb des Mittels aller aufgezeichneten Zyklen.¹

Die Sonne sendet kontinuierlich Strahlung und Teilchen in den Weltraum. Dieser Teilchenstrom erreicht auch die Erde und wird als Sonnenwind bezeichnet. Wird dieser kurzfristig und in einem bestimmten Gebiet stärker als gewöhnlich, spricht man von einer Sonneneruption (Jaswal et al 2023).

Die Ursachen dafür sind Veränderungen im Magnetfeld der Sonne, das normalerweise das heiße Plasma einschließt. Bei einer Neuordnung des Magnetfelds kann das Plasma aber ins All ausgestoßen werden. Dabei kommt es zu Interferenzen zwischen den Magnetfeldern der Sonnenflecken mit Teilchenströmen. Dadurch werden hochenergetischen Teilchen (meist Protonen) mit hoher Geschwindigkeit weggeschossen, die in circa einer Stunde die Distanz zur Erde zurücklegen können. Wenn die Teilchen außerhalb der Sonne entstehen (Flares²), fliegen sie zunächst auch Richtung Sonne, werden dort abgebremst und sind dann dementsprechend langsamer. Die verlorene Energie ist als Röntgenblitz sichtbar. Diese breiten sich mit Lichtgeschwindigkeit aus, und sind daher noch vor den Protonenschauern auf der Erde messbar.

Meist folgt den Flares ein koronaler Masseauswurf³. Dabei verbinden sich die Magnetfelder der Flares auf eine Art und Weise, die eine Plasmawolke von der Sonnenoberfläche ablöst und durch den Wechsel in den Magnetfeldlinien ins All katapultiert. Der koronale Masseauswurf besteht aus geladenen Teilchen (Elektronen, Protonen und Atomkernen) und bewegt sich mit rund 1.000 km/s von der Sonne weg.⁴ Diese Wolke ist für einen Großteil der auf der Erde bemerkbaren Phänomene, auch die zeitweise Störung der Magnetosphäre eines Planeten verantwortlich.

Das Erdmagnetfeld schützt uns zwar vor den Auswirkungen der Eruptionen, das Auftreffen des Stroms (aus Protonen, Elektronen und Ionen, sowie kurzwellige Strahlungen im UV- und Röntgenbereich) in der Ionosphäre führt jedoch zu einer sichtbaren Interaktion in der oberen Atmosphärenschicht (sog. Polarlichtern oder Aurora Borealis) und zur Störung des (Rund)Funkverkehrs. Mit zunehmender

*Was sind
Sonnenflecken
und was haben sie
mit der Erde zu tun?*

*Was sind
Sonnenstürme,
Eruptionen,
Sonnenwind ...*

*... und was machen
sie mit unserem
Erdmagnetfeld?*

¹ heise.de/news/Sonne-jetzt-doch-aktiver-und-mit-deutlich-mehr-Sonnenflecken-als-vorhergesagt-9350207.html.

² Einfache Plasma-Magnetfeldbögen auf der Sonnenoberfläche.

³ Bei Reorganisation der Flares (durch Rekonnexion der Magnetfelder) kann es auch zur Ablösung von der Sonnenoberfläche kommen, was als eruptive Protuberanz bezeichnet wird. Die damit verbundenen Teilchenströme werden auch als Protonenschauer beschrieben.

⁴ mps.mpg.de/sonnenstuerme-sonnenaktivitaet-faq/1 und de.wikipedia.org/wiki/Sonneneruption.

Intensität des Teilchenstroms verformt sich das Erdmagnetfeld und wird schwächer. Weiter vordringende Protonen erhöhen die Elektronendichte in der Atmosphäre, was zu steigender Absorption von Kurzwellen und UKW bis 300 MHz führt. Bei stärkerer Intensität der Stürme können auch negative Effekte für die kritische Infrastruktur auf der Erde eintreten. Mit zunehmender Abhängigkeit von vulnerablen Systemen steigt auch die Relevanz der Erforschung verschiedener Weltraumwetterphänomene. Ziel ist es dabei, die Vorhersagegenauigkeit und die Vorwarnzeit zu erhöhen, um mögliche Schäden abwenden oder zumindest eindämmen zu können. Im Mai 2024 ereignete sich der stärkste Sonnensturm seit 2003, der Kommunikationssysteme beeinträchtigte: Satelliten und GPS-Signale wurden gestört, Flüge umgeleitet⁵. Im Gegensatz zum Sonnensturm von 1989 kam es in Kanada jedoch zu keinem Stromausfall, da Netzbetreiber dank Satellitenüberwachung rechtzeitig reagieren konnten. Der Sturm war dennoch mehr als zweimal schwächer als das Carrington-Ereignis von 1859.⁶ Erstmals wurde ein Supersturm durch mehrere Satelliten beobachtet, wodurch relevante Daten gesammelt wurden, die zur Verbesserung der Vorhersage zukünftiger Ereignisse, insbesondere durch längere Warnzeiten, beitragen sollen.

Im März 2025 ist es dem Austrian Space Weather Office gelungen, die Intensität zweier geomagnetischer Stürme sieben bzw. 15 Stunden vor ihrem Auftreffen auf die Erde mit großer Genauigkeit vorherzusagen. Diese bis dahin nicht mögliche Vorhersage in Echtzeit war das Ergebnis einer neuen Methode, Daten des Forschungssatelliten Solar Orbiter zu verwenden. Der Ansatz kann zu einem Vorhersagewerkzeug weiterentwickelt werden.⁷ Angesichts dessen, dass der zur Vorhersage konzipierte Satellit „Vigil“ der ESA erst 2031 ins All geschickt werden soll⁸, ist dies bedeutend. Im August 2025 kündigte die NASA das Surya-KI-Modell an, das die Vorhersage von Sonnenstürmen verbessern soll.⁹

Auf Grund der Form des Erdmagnetfeldes treten zwischen der Strahlung der Sonne und unserer Atmosphäre Interferenzen auf, die als Polarlichter vermehrt in den Polregionen sichtbar werden. Wird die Strahlungsintensität größer, verformt sich das Erdmagnetfeld soweit, dass dieses optische Phänomen auch in Regionen zu sehen ist, die näher beim Äquator liegen. Polarlichter in Mitteleuropa sind jedoch extrem selten. Das bekannteste und stärkste beobachtete Ereignis dieser Art war das sog. Carrington-Event im Jahr 1859.¹⁰ Es wird berichtet, dass die Polarlichter damals sogar in Rom sichtbar waren. Die im 19. Jahrhundert großräumig vorhandene Infrastruktur war das Telegrapheernetz. Die Abhängigkeit von Stromnetzen oder anderen Kommunikationsnetzen bestand noch nicht. Der Strom der geladenen Teilchen erzeugte in den Telegrapheleitung durch Induktion hohe Gleichstrom-Spannungen. Da die Leitungen für derartige Ereignisse nicht abgesichert waren, kam es in vielen Telegraphestationen zu Stromschlägen, Überspannungen, Funkenschlag und Bränden, durchgeschmorten Leitungen und insgesamt zu erheblichen Schäden an der Infrastruktur. Eine Zeit

**Massive
Beeinträchtigungen
in der Vergangenheit**

⁵ geosphere.at/de/aktuelles/news/neue-erkenntnisse-zum-geomagnetischen-supersturm-im-mai-2024.

⁶ cgs.jhuapl.edu/Resources/May-10-12-Geospace-Storm.php.

⁷ archive.ph/2025.09.01-083107/https://www.newscientist.com/article/2494433-spacecraft-used-to-forecast-solar-storm-15-hours-before-it-hit-earth/.

⁸ esoc.esa.int/content/vigil.

⁹ science.nasa.gov/features-events/inside-surya-solar-ai-model.

lang konnte sogar zwischen einigen Stationen telegraphiert werden, ohne dass eine Stromversorgung anlag, weil die durch den Sonnensturm induzierte Gleichspannung der Stromversorgung der batteriegestützten Telegraphenleitungen nahekam.¹⁰

Fachleute sind sich einig, dass ein Ereignis dieser Intensität heute massive Schäden vor allem an Strom- und Kommunikationsnetzen verursachen würde (Hayakawa 2023). Auch der Flugverkehr, Radar, Radiofunk oder etwa der Behördensfunk wären in Mitleidenschaft gezogen.¹¹ Es würden aber auch elektronische Bauteile von Satelliten beschädigt werden. Das, sowie veränderte Signallaufzeiten, würden Positionsbestimmungssysteme wie GPS oder Galileo beeinträchtigen – bis hin zu einem Totalausfall. Davon wären selbstverständlich nicht nur Navigationsinstrumente betroffen. Viele Systeme verwenden das GPS-Signal zur exakten Zeitbestimmung bzw. -synchronisierung, bspw. im High-Frequency-Trading oder im Stromnetz (Strauß et al 2017).

Was wäre aktuell an Schäden zu erwarten?

Schwächere Sonnenstürme führten durch abgebrannte Transformatoren und Leitungsausfälle schon in der Vergangenheit zu Ausfällen im Stromnetz. Die Faktoren, von denen das Schadensausmaß abhängt, sind einerseits die geografische Breite sowie die Länge der Leitungen, deren Nord/Süd-West/Ost-Ausdehnung und schließlich die Leitfähigkeit des Untergrunds (Material und Feuchtigkeit). Vor allem bei sehr langen Leitungen sind durch Erdrotation und Einfallsinkel des Sonnensturms nicht beide Enden der Leitung zugleich betroffen. Dadurch kommt es nicht nur zu induzierten Spannungen, sondern auch zu einem starken Spannungsgefälle zwischen den Endpunkten, das mehr oder weniger gut über den Boden ausgeglichen werden kann. Das ist vor allem deshalb problematisch, weil sich der Ausfall von Hochspannungstransformatoren, wie zum Beispiel 1989 in der Region Quebec in Kanada, nichts ist, nicht leicht/schnell in Ordnung bringen lässt. Man geht davon aus, dass eine Reparatur Wochen bis Monate in Anspruch nehmen kann, auch abhängig von der Verfügbarkeit der benötigten Teile am Weltmarkt. Bei einem Schadensereignis, das mit dem Carrington-Event vergleichbar ist, wären viele Gebiete auf der Erde betroffen, was die Verfügbarkeit der Ersatzteile dramatisch verschlechtern würde (Strauß et al. 2017). Eine im Oktober 2025 herausgegebene Warnung der Europäischen Weltraumagentur (ESA) betont die Dringlichkeit von Vorbereitungsmaßnahmen. Die Warnung beruht

¹⁰ Die Teilchen des koronalen Masseauswurfs trafen mit einer Geschwindigkeit von ca. 2.000 km/s auf die Erde, brauchten nur 17,5 Stunden (bei einer durchschnittlichen Laufzeit von 24-36 Stunden), um die Distanz zwischen Sonne und Erde zurückzulegen: en.wikipedia.org/wiki/Carrington_Event. Ein anderes derart starkes Ereignis trat 1872 auf (sog. Chapman-Silverman-Storm), als Polarlichter bis in den Sudan und die Karibik zu sehen waren: mps.mpg.de/polarlichter-ueber-der-karibik. Im Jahr 2012 verfehlte ein Sonnensturm, der in seiner Intensität mit dem Carrington-Event vergleichbar gewesen wäre, die Erde nur knapp: spiegel.de/wissenschaft/weltall/sonnensturm-2012-fast-katastrophe-auf-erde-plasma-verfehlt-planet-a-982652.html. Die hohe Intensität scheint nicht nur eine Frage des Timings und der Interferenzen einzelner Flares zu sein, sondern, wie 2012 beobachtet wurde, auch daher zu röhren, dass multiple Schockwellen nacheinander die Erde treffen. Die späteren finden ein schon stark verformtes Magnetfeld vor und können daher viel weiter eindringen.

¹¹ de.wikipedia.org/wiki/Sonneneruption.

auf einer Szenarioanalyse, die bei extremen, aber realistischen Sonnenstürmen¹² schwerwiegende Folgen prognostiziert.

Als vorbeugende Maßnahme kommt die Installation von Gleichstromschutzschaltern in Betracht. Damit würden die Leitungen immer noch kurzzeitig ausfallen (was auch großflächige Stromausfälle nach sich ziehen kann), aber es käme zu weniger physikalischen Schäden. Ähnlich verhält es sich bei Satelliten. Wenn die Vorwarnzeit groß genug ist, können die Systeme heruntergefahren werden. Dadurch werden größere Schäden an den elektronischen Bauteilen vermieden. Auch hier wäre also ein Netzausfall mit all seinen Konsequenzen zu beobachten, physikalische Schäden könnten jedoch minimiert werden, was bei Satelliten aufgrund der schlechten Zugänglichkeit für Reparaturen besonders wichtig ist.

Gibt es präventive Maßnahmen?

Das Internet betreffend wird erwartet, dass derart intensive Schadensereignisse wie das Carrington-Event zu einem großflächigen Ausfall mit physischen Schäden führen würden, der sich nicht kurzfristig beheben ließe. Da die Abhängigkeit unserer Gesellschaft vor allem von Strom und Internet sehr hoch ist und weiterhin kontinuierlich zunimmt, ist klar, dass gravierende Auswirkungen auf das gesellschaftliche Leben weltweit und in Österreich zu erwarten wären, so dass ein Leben, wie wir es gewohnt sind, über zumindest Monate nicht vorstellbar wäre.¹³

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Die Forschungsaktivitäten in Österreich zu dem Themenkomplex werden bspw. am Institut für Weltraumforschung der Österreichischen Akademie der Wissenschaften, bei GeoSphere Austria, an der TU Graz und auch in Kooperation mit Betreibern kritischer Infrastrukturen wie der Austrian Power Grid (APG) durchgeführt. Sowohl was Kompetenzen als auch Forschungsressourcen, wie das Conrad-Observatorium, betrifft, ist Österreich in der Lage, einen relevanten Beitrag zur internationalen Forschung zu leisten. (Schachinger et al 2020) In immer mehr Staaten werden die Forschungsanstrengungen auf diesem Gebiet gebündelt und institutionalisiert.

Unterstützung der Forschungsanstrengungen und die Erarbeitung einer nationalen Strategie

Die Erkenntnisse aus solchen Projekten sind für Österreichs kritische Infrastrukturen essentiell. Auch wenn Österreich aufgrund seiner geografischen Lage von den Auswirkungen kleinerer Sonnenstürme nicht unmittelbar betroffen wäre, haben die starken Sonnenstürme, unbedacht ihrer Seltenheit, ein enormes Schadenspotential. Obendrein wird auf Grund der zuvor beschriebenen Beobachtungen 2012 und anderer Forschungsergebnisse aus der jüngeren Vergangenheit (O'Hare et al 2019) vermutet, dass Ereignisse mit der Intensität des Carrington-Events viel häufiger sind als bisher angenommen (einmal alle zehn Jahre), und auch noch deutlich stärkere Schadensereignisse möglich sind, was darauf hin-

Risiko bisher deutlich unterschätzt

¹² esa.int/Space_in_Member_States/Germany/Durch_den_starksten_jemals_registrierten_Sonnensturm_fliegen.

¹³ Details zu den Folgen eines großflächigen Internetausfalls in Österreich finden sich bei Schachenhofer et al. 2022.

weist, dass das Risiko auch in Österreich bisher womöglich deutlich unterschätzt wurde. Um hier keine Doppelgleisigkeiten in der Forschung und der Ressourcennutzung entstehen zu lassen, wäre es auch sinnvoll, eine nationale Strategie zum Umgang mit dem Thema zu etablieren.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

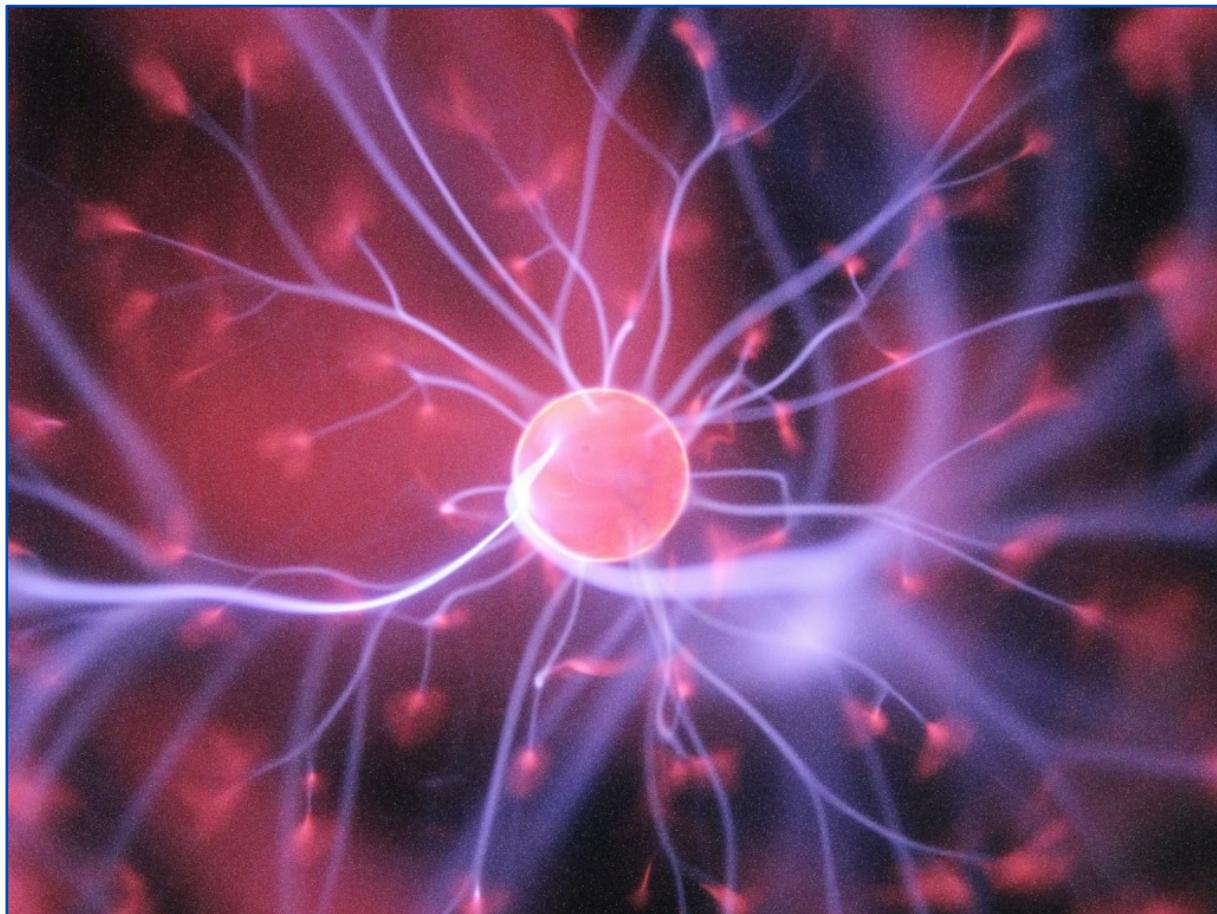
In Vorbereitung einer nationalen Strategie zum Thema „Weltraumwetterphänomene“ sollte eine umfassende Bestandsaufnahme über Forschungsstand und -bedarf erfolgen. Auf Basis einer solchen Studie sollten in der Folge in Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Krisen- und Katastrophenschutzmanagement (SKKM) und den Betreibern kritischer Infrastrukturen Notfallpläne erarbeitet werden. Hierbei kann auch auf das Wissen in anderen Staaten, die schon länger mit dem Thema befasst sind, zurückgegriffen werden (bspw. USA, Kanada, Skandinavien ...). Besonders wichtig erscheint die Prävention (Abschirmung, Frühwarnsysteme, Vorgehensweise im Katastrophenfall u. dgl. m.) sowie eine eventuelle Verbesserung der internationalen Zusammenarbeit auf dem Gebiet.

*Aktionsplan
Weltraumwetter*

ZITIERTE LITERATUR

- Hayakawa, H., Cliver, E., Clette, F. et al. (2023), The extreme space weather event of 1872 February: Sunspots, Magnetic Disturbance, and Auroral Displays, *The Astrophysical Journal*, Vol 959, No 1, DOI 10.3847/1538-4357/acc6cc.
- Jaswal, P., Saha, C., Nandy, D. (2023), Discovery of a relation between the decay rate of the Sun's magnetic dipole and the growth rate of the following sunspot cycle: a new precursor for solar cycle prediction, *Monthly Notices of the Royal Astronomic Society*, 528, L27-L32, doi.org/10.1093/mnrasl/slad122.
- O'Hare, P., Mekhaldi, F., Adolphi, F. et al. (2019), Multiradionuclide evidence for an extreme solar proton event around 2,610 B.P. (~660 BC), *PNAS* 116 (13) 5961-5966, doi.org/10.1073/pnas.1815725116.
- Schachenhofer, L., Gronalt, M., Krieger-Lamina, J. et al. (2022), ISIDOR – Folgen einer langandauernden und großflächigen Einschränkung der internetbasierten Dienste und Infrastrukturen (Endbericht), Wien, doi:10.1553/ITA-pb-2022-04.
- Schachinger, P., Albert, D., Renner, H. et al. (2020), Niederfrequente Sternpunktströme im Übertragungsnetz: Ein Überblick über aktuelle und zukünftige Forschung in Österreich, Tagungsband EnInnov 2020, S. 205f, tugraz.at/fileadmin/user_upload/tugrazExternal/4778f047-2e50-4e9e-b72d-e5af373f95a4/files/allg/EnInnov2020_Tagungsband.pdf.
- Strauß, S., Krieger-Lamina, J. (2017), Digitaler Stillstand – Die Verletzlichkeit der digital vernetzten Gesellschaft – Kritische Infrastrukturen und Systemperspektiven, Wien, PB 2017/01, epub.oeaw.ac.at/ita/ita-projektberichte/2017-01.pdf.

BIOCOMPUTER (AKTUALISIERT)



© CC0 (Hal Gatewood/unsplash)

ZUSAMMENFASSUNG

Das menschliche Gehirn hat einzigartige Fähigkeiten, die technisch bisher nur teilweise nachgeahmt werden können. Allerdings orientiert sich heutige KI-Software in ihrem Aufbau, sogenannten neuronalen Netzen, an der Funktionsweise neuronalen Strukturen. Versucht wird außerdem, die physische Architektur des Gehirns in Hardware zu reproduzieren (neuromorphic engineering). Auch können biologische Systeme, wie aus menschlichen Stammzellen hergestellte *Hirnorganoide* oder Bakterienzellen, bereits für Rechenleistungen instrumentalisiert werden, während DNA als langfristiges Speichermedium fungiert. Biocomputer könnten eine Chance sein, die ressourcen- und energieintensiven herkömmlichen Rechensystemen auf längere Sicht zu ersetzen, da bereits wenige Gramm Zellen hohe parallele Rechenleistungen erbringen. Die Entwicklungen stehen aber noch am Anfang, auch wenn in den letzten Jahren beeindruckende Fortschritte gemacht wurden.

*Alternative
Biocomputer*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Der Siliziumtransistor – und mit ihm das Informationszeitalter – hat das Leben von Milliarden Menschen in wenigen Jahrzehnten grundlegend verändert. Eine Grundlage der digitalen Revolution ist die sich etwa alle 20 Monate verdoppelnde Transistordichte pro Fläche auf einem Chip, auch bekannt als Moore's Law. Nun scheint die Siliziumtechnologie langsam an physikalische Grenzen zu stoßen, da die nötige Verkleinerung der Schaltkreise nicht mehr lange fortführbar ist, auch wenn es weiterhin etwas Raum für höhere Transistordichten gibt. Die heutige Verbesserung der Leistungsfähigkeit von Computern beruht daher vor allem auf Effizienzgewinnen bei der Software, auf der Entwicklung von Algorithmen für neue Problemstellungen (z. B. maschinelles Lernen) und neuen Maschinenmodellen (Parallel- und Vektorverarbeitung), die neue Hardware besser nutzt, als es das alte gängige Model (serial random-access) (Leiserson et al., 2020).

Aus diesem Grund und aufgrund des enormen *Ressourcen- und Energiebedarfs* herkömmlicher Datenverarbeitung werden alternative Rechentechnologien für die zukünftige Entwicklung interessant. Neben Systemen, die Quanteneffekte zur Informationsverarbeitung nutzen (siehe *Zukunft der Quantentechnologie*), sind auf verschiedenen Gebieten starke Fortschritte zu verzeichnen, die sich unter dem Begriff der *Biocomputer* zusammenfassen lassen. Diese versuchen, entweder biologische Strukturen wie die Hirnarchitektur nachzuahmen (neuromorph) oder direkt biologische Zellen und Systeme wie Organoide für Rechenleistungen zu instrumentalisieren.

Ein vielversprechender Ansatz alternativer Rechentechnologien besteht darin, sich die Eigendynamik einzelner Bauelemente (wie Memristoren) zunutze zu machen. Memristoren sind eine Klasse von Bauelementen, die durch ihre internen elektrophysikalischen Prozesse komplexe Datenverarbeitung erlauben, so dass jedes Element aufwendige digitale Schaltungen ersetzen kann. Solche Bauteile ermöglichen neue Computerarchitekturen, die sich beispielsweise am Aufbau des Gehirns orientieren (neuromorphe Systeme) und sowohl hohe Energieeffizienz als auch hohe Rechenkapazität erlauben (Kumar et al., 2022). Einfach ausgedrückt bestehen neuromorphe Systeme nicht wie herkömmliche Systeme aus Rechen- und Speicherelementen, sondern aus „Neuronen und Synapsen“, die beide Daten verarbeiten und speichern können (Aimone et al., 2022). Es werden verschiedene Ansätze verfolgt: künstliche synaptische Bauteile, z. B. Memtransistoren, optisch oder elektrolytisch-neurale Synapsen oder ferroelektrische Bauteile (Seok et al., 2024). Derzeit werden neuromorphe Computer vor allem für Anwendungen im Bereich des maschinellen Lernens und der Neurowissenschaften angewendet (sog. kognitive Anwendungen). Sie sind aber darüber hinaus für viele andere Berechnungsprobleme attraktiv, etwa Komposition, Graphenalgorithmen, beschränkte Optimierung und Signalverarbeitung. Insgesamt gilt neuromorphes Computing als Voraussetzung für die nächste Generation der künstlichen Intelligenz (KI), da herkömmliche Computersysteme das Potenzial von KI-Anwendungen aufgrund ihres hohen Energieverbrauchs und ihrer begrenzten Effizienz bei der Informationsverarbeitung beschränken (Ajayan et al., 2022). Der Bereich hat sich über die in akademischen Einrichtungen entwickelten Prototypen hinaus weiterentwickelt und umfasst nun Produktionssysteme, Lernmodelle und Design-Tools, die mit Praxisexperimenten gekoppelt sind. Auf dieser

*Neuromorphe Systeme,
organoide Intelligenz
und Zellen als
Computer*

*Neuromorphe
Computer:
Rechnerarchitektur
orientiert am Gehirn*

Grundlage hat die Industrie weitere Systeme mit Anwendungen in den Bereichen wissenschaftliches Rechnen, Augmented/Virtual Reality, Wearables, Smart Farming sowie Smart Cities entwickelt (Kudithipudi et al., 2025).

Während mit neuromorphen Computern versucht wird, biologische Komponenten und Funktionen nachzuahmen, wird mit einem anderen Ansatz versucht, Zellsysteme echte Rechenoperationen durchführen zu lassen. *Organoid*, also stark vereinfachte und miniaturisierte Versionen von Organen, die aus Stammzellen gewonnen werden, sind nur wenige Millimeter groß. Durch bestimmte Signalmoleküle kann die Reifung zu Nervenzellen (Neuronen) ausgelöst werden, die als Konglomerat bestimmte Hirnfunktionen zeigen. Diese werden mit elektronischen Bauteilen kombiniert und können bereits jetzt einfache Rechenoperationen durchführen. Erste Experimente zeigen, dass neuronalen Kulturen beigebracht werden kann, Videospiele zu spielen¹ oder Merkmale des Reservoir-Computings zu zeigen, einer bestimmten Form des maschinellen Lernens. Dabei sitzt ein Hirnorganoid auf einem hochdichten Multielektroden-Array, das Senden und Empfangen von Informationen ermöglicht. Mit dieser Anordnung wurden bereits Erfolge bei Spracherkennung und komplexeren, nichtlinearen Berechnungen erzielt (Cai et al., 2023).

Organoid Intelligenz

Organoid Intelligenz (OI) beschreibt damit ein neu entstehendes, multidisziplinäres Forschungsfeld, in dem an der Entwicklung biologischer Datenverarbeitung unter Verwendung von 3D-Kulturen menschlicher Gehirnzellen und Technologien für Gehirn-Maschine-Schnittstellen gearbeitet wird (Smirnova et al., 2023). Auch hier gibt es die Hoffnung, dass solches Biocomputing schneller, effizienter und leistungsfähiger sein könnte als Silizium-basierte Rechner und künstliche Intelligenz und dabei nur einen Bruchteil der Energie benötigt (Smirnova et al., 2023). Derzeit gibt es noch einige Hürden. Beispielsweise werden komplexere, dauerhafte Hirnorganoide benötigt, angereichert mit Zellen und Genen, die mit dem Lernen in Verbindung stehen. Außerdem werden neue mathematische Modelle, Algorithmen und Schnittstellentechnologien benötigt, um besser mit Hirnorganoiden zu kommunizieren. Aktuelle Hirnorganoide verfügen nicht über die anatomische Komplexität, Netzwerkorganisation oder sensomotorische Integration, die für Intelligenz oder Empfindungsfähigkeit erforderlich sind (Nestor & Wilson, 2025). Auch fehlt noch ein tieferes Verständnis darüber wie sie lernen und rechnen, und auch wie die riesigen Datenmengen, die sie erzeugen werden, verarbeitet und gespeichert werden können (Smirnova et al., 2023). Bei größer und intelligenter werdenden Systemen liegen ethische Fragestellungen auf der Hand, etwa, wenn Organoid Aspekte des Bewusstseins entwickeln. Auch der Schutz der Persönlichkeitsrechte und Interessen von Zellspendern ist sicherzustellen (Hartung et al., 2024). Aktuelle Darstellungen neuronaler Aktivität sind häufig vereinfachend und von Fehlinterpretationen geprägt, welche Systemen mit begrenzten biologischen Fähigkeiten fälschlicherweise neurophysiologische Eigenschaften zuschreiben (Nestor & Wilson, 2025).

*Aus menschlichen
Stammzellen
gewonnene Mini-Hirne
kombiniert mit
Elektronik*

¹ spektrum.de/news/intelligenz-neurone-in-der-petrischale-lernen-pong-spielen/2078757.

In der Informatik wird aus einer Reihe von Eingaben und Regeln eine Ausgabe erzeugt. Biologische Systeme (wie menschliche oder Bakterienzellen) nehmen physio-chemische Reize wahr und reagieren darauf, um entsprechend ihrer internen Konfiguration eine Reaktion zu erzeugen, z. B. bestimmte Proteine aufzubauen. Mit Hilfe der Werkzeuge *synthethischer Biologie* (z. B. CRISPR-Cas9) können diese Abläufe so verändert werden, dass eine Programmierung von Informationsverarbeitung in lebender Materie möglich wird (Gofñi-Moreno, 2024). Beide Rechenparadigmen (digital und analog) wurden bisher in lebenden Zellen implementiert, um sogenannte genetische Schaltkreise zu bauen. Eine Vielzahl von Schaltungen funktioniert auf Basis zweier diskreter, binär kodierter Ebenen (digital: 0,1), darunter Speicherelemente, Zähler, Zustandsautomaten, Kippschalter, Digitalisierer und hochkomplexe logische Funktionen. Das analoge Paradigma hingegen rechnet mit einer kontinuierlichen Menge von Zahlen und wird als Alternative für Aufgaben vorgeschlagen, die keine Entscheidungsfindung erfordern (Rizik et al., 2022).

Zellen als Computer

*Genetische
Schaltkreise und
Bakterienkolonien als
neuronale Netzwerke*

In jeder Zelle gibt es mehrere Signalwege, die eine parallele Informationsverarbeitung ermöglichen. Daher gelingt es auch, mehrere Schaltkreise in einer einzigen Zelle – in Anlehnung an Mehrkernprozessoren – zu kombinieren, was im Prinzip enorme Rechenkapazität ermöglicht (Kim et al., 2019). Auch die Kommunikationswege zwischen biologischen Zellen erlauben neue Formen der verteilten Datenverarbeitung. Inspiriert durch die strukturelle Ähnlichkeit von künstlichen neuronalen Netzwerken (der Grundlage von KI) und zellulären Netzen, können bereits Berechnungen in Bakterienkonsortien zur Erkennung von Mustern ausgeführt werden (Li et al., 2021). Da bereits logarithmische Rechnungen ausgeführt werden können, ist eine effiziente Implementierung künstlicher neuronaler Netze mit E.coli-Zellen möglich, die als neuromorphes Computing (s. o.) mit Zellverbänden angesehen wird (Rizik et al., 2022). Insgesamt werden solche Arten von Biocomputern bereits zur Lösung praktischer Probleme in der Diagnostik, der Umweltsensorik oder bei zellbasierten Therapien eingesetzt (Qiu et al., 2025).

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Anwendungen von Biocomputern sind bei unterschiedlichen Herausforderungen wie Umweltsanierung, Arzneimittelforschung, Herstellung neuartiger Materialien und medizinischer Diagnose denkbar. Dafür sind jedoch noch erhebliche Verbesserungen bei der Manipulation biologischer Prozesse, bei der Verbesserung von Schnittstellen sowie beim Verständnis und der Messung von Zellzuständen erforderlich.² Hindernisse sind u. a. begrenzte zelluläre Ressourcen, ein hohes Maß an zufälligen Schwankungen bei den Zellreaktionen sowie unerwünschte Wechselwirkungen zwischen synthetischen Teilen und Wirtszellen (Rizik et al., 2022). Biocomputer haben das Potenzial, hohe Rechenleistung bei minimalem Ressourceneinsatz zu liefern. Hinsichtlich des riesigen und derzeit steigenden Energieverbrauchs der herkömmlichen IT-Infrastruktur und -nutzung

*Hoher Bedarf an
ressourcenarmen
Computersystemen*

² radar.gesda.global/sub-topics/cellular-computing.

bei gleichzeitiger Notwendigkeit, Treibhausgasemissionen stark zu senken (siehe *Klimaschutzrisiko Digitalisierung*), ist die Erforschung alternativer ressourcenarmer Computersysteme wichtig. Die Kommerzialisierung erster Prozesse und einzelner Bauteile wird in den nächsten fünf Jahren erwartet.² Da die Erforschung von Biocomputern noch relativ neu ist, kann hier vorausschauend eine innovative Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur aufgebaut und parallel an der Standardisierung gearbeitet werden, um die Systemintegration zu vereinfachen.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Während bei zellulären Computern jahrzehntelang die Theorieentwicklung im Vordergrund stand, weil die experimentellen Möglichkeiten sehr begrenzt waren, ist das heute umgekehrt. Neue Verfahren wie CRISPR eröffnen einen großen Experimentierraum, was den Ausbau der Grundlagenforschung in Überschneidungsbereichen von theoretischer Informatik und (synthetischer) Biologie lohnend macht (Goñi-Moreno, 2024). Damit sich die Technologie der organoiden Intelligenz in ethischer und sozialer Hinsicht verantwortlich weiterentwickeln kann, wird der Ansatz einer „eingebetteten Ethik“ gefordert, bei dem transdisziplinäre Teams aus Ethiker:innen, Forscher:innen und Mitgliedern der Öffentlichkeit ethische Fragen identifizieren, diskutieren und mit dem Ziel analysieren, diese Erkenntnisse in die zukünftige Forschung und Arbeit einfließen zu lassen (Smirnova et al., 2023).

„Eingebettete Ethik“
und vorausschauende
Folgenabschätzung

ZITIERTE LITERATUR

- Aimone, J. B., et al. (2022). A review of non-cognitive applications for neuromorphic computing. *Neuromorphic Computing and Engineering*, 2(3), 032003, dx.doi.org/10.1088/2634-4386/ac889c.
- Ajayan, J., et al. (2022). Advances in neuromorphic devices for the hardware implementation of neuromorphic computing systems for future artificial intelligence applications: A critical review. *Microelectronics Journal*, 130, 105634, scencedirect.com/science/article/pii/S0026269222002634.
- Cai, H., et al. (2023). Brain organoid reservoir computing for artificial intelligence. *Nature Electronics*, 6(12), 1032-1039, doi.org/10.1038/s41928-023-01069-w.
- Goñi-Moreno, Á. (2024). Biocomputation: Moving Beyond Turing with Living Cellular Computers. *Commun. ACM*, 11, doi.org/10.1145/3635470.
- Hartung, T., et al. (2024). Brain organoids and organoid intelligence from ethical, legal, and social points of view. *Frontiers in Artificial Intelligence*, 6, frontiersin.org/articles/10.3389/frai.2023.1307613.
- Kim, H., et al. (2019). A CRISPR/Cas9-based central processing unit to program complex logic computation in human cells. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 116(15), 7214-7219, pnas.org/doi/abs/10.1073/pnas.1821740116.
- Kudithipudi, D., et al. (2025). Neuromorphic computing at scale. *Nature*, 637(8047), 801-812, doi.org/10.1038/s41586-024-08253-8.
- Kumar, S., et al. (2022). Dynamical memristors for higher-complexity neuromorphic computing. *Nature Reviews Materials*, 7(7), 575-591, doi.org/10.1038/s41578-022-00434-z.

- Leiserson, C. E., et al. (2020). There's plenty of room at the Top: What will drive computer performance after Moore's law? *Science*, 368(6495), eaam9744, science.org/doi/abs/10.1126/science.aam9744.
- Li, X., et al. (2021). Synthetic neural-like computing in microbial consortia for pattern recognition. *Nature Communications*, 12(1), 3139, doi.org/10.1038/s41467-021-23336-0.
- Nestor, M. W., & Wilson, R. L. (2025). Assessing the Utility of Organoid Intelligence: Scientific and Ethical Perspectives. *Organoids*, 4(2), 9, mdpi.com/2674-1172/4/2/9.
- Qiu, X., et al. (2025). Biocomputing at the crossroad between emulating artificial intelligence and cellular supremacy. *Current Opinion in Biotechnology*, 92, 103264, scencedirect.com/science/article/pii/S0958166925000084.
- Rizik, L., et al. (2022). Synthetic neuromorphic computing in living cells. *Nature Communications*, 13(1), 5602, doi.org/10.1038/s41467-022-33288-8.
- Seok, H., et al. (2024). Beyond von Neumann Architecture: Brain-Inspired Artificial Neuromorphic Devices and Integrated Computing. *Advanced Electronic Materials*, n/a(n/a), 2300839, doi.org/10.1002aelm.202300839.
- Smirnova, L., et al. (2023). Organoid intelligence (OI): the new frontier in biocomputing and intelligence-in-a-dish. *Frontiers in Science*, 1, frontiersin.org/journals/science/articles/10.3389/fsci.2023.1017235.

NEGATIVEMISSIONSTECHNOLOGIEN (AKTUALISIERT)



© CC0 (Wander Fleur/unplash)

ZUSAMMENFASSUNG

Auch wenn Maßnahmen zur Treibhausgasminderung Priorität haben, werden ergänzende Maßnahmen zur CO₂-Entnahme (Negativemissionstechnologien, NET) wahrscheinlich verstärkt notwendig sein, um die Erderwärmung auf unter 2 °C zu begrenzen. Ihr Einsatz muss aber streng an Nachhaltigkeitsprinzipien ausgerichtet werden. Auch wenn manche Ansätze das Potenzial haben, große Mengen an Kohlenstoff längerfristig zu binden, ist bei deren Umsetzung die detailliertere Anpassung an lokale Gegebenheiten entscheidend dafür, ob sie überhaupt funktionieren und nicht gegenteilige Effekte haben. Neben landbasierten Verfahren, wie Aufforstung oder Pflanzenkohle, stehen verschiedene Kohlenstoffabscheidungs-, -speicherungs- und -nutzungsverfahren im Fokus. Die meisten NET sind flächenintensiv, was die Skalierung erschwert, andere benötigen große Mengen an Energie und Ressourcen. Weitere Umweltrisiken, etwa Auswirkungen auf die Biodiversität oder die mögliche Reversibilität der Speicherung, sowie die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Technologien sind zu bedenken.

*Negativemissionen:
keine einfachen
Lösungen in Sicht*

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Ob die globale Erwärmung auf 1,5 °C oder 2 °C begrenzt werden kann, entscheidet sich weitgehend in diesem Jahrzehnt. Es sind sofortige und tiefgreifende Senkungen der Treibhausgasemissionen in allen Sektoren erforderlich, um letztendlich netto Null-CO₂-Emissionen zu erreichen. Bei einer Überschreitung der Erderwärmung über ein bestimmtes Niveau werden negative Emissionen – also Kohlenstoffdioxidentnahme (Carbon-Dioxide Removal, CDR) – nötig, um die Temperatur wieder zu senken und langfristig innerhalb des begrenzten Kohlenstoffbudgets zu bleiben (siehe auch *Geoengineering*). Dies wirft große Bedenken hinsichtlich der Machbarkeit und Nachhaltigkeit auf (IPCC, 2023). Insbesondere Nicht-CO₂-Emissionen aus der Landwirtschaft (Methan, Stickstoffdioxid, fluorisierte Gase) aus bestimmten industriellen Verfahren sowie Restemissionen aus dem Energiesektor werden als schwer vermeidbar eingestuft; hier sollen Entnahmeverfahren Abhilfe schaffen (IPCC, 2022; Ragwitz M., 2023).

Entscheidendes Jahrzehnt für die Begrenzung der Erderwärmung

Natürliche und technische Verfahren zur Entnahme von Treibhausgasen aus der Atmosphäre umfassen biologische, physikalische und chemische Prozesse. Diese sind nur dann klimawirksam, wenn die entnommenen Gase langfristig nicht zurück in die Atmosphäre gelangen. Landbasierte Prozesse binden CO₂ in der Vegetation oder im Boden; dazu zählen Aufforstung, Klimafarming (Carbon Farming) sowie die Herstellung von Pflanzenkohle (auch Biokohle/Biochar). Bei anderen Verfahren steht die chemische und physikalische Abscheidung von CO₂ im Vordergrund: entweder aus Abgasen, wie nach der Verbrennung von Biomasse zur Energieproduktion (Bioenergie, BE), oder direkt aus der Luft (direct air, DA). Das abgeschiedene CO₂ wird entweder in geologischen Formationen gespeichert (CCS, Carbon Capture and Storage) oder industriell genutzt (CCU, Carbon Capture and Utilization). Viele der diskutierten NET sind flächenintensiv, wobei sie in Konkurrenz zur Nahrungs- und Futtermittelproduktion stehen oder dem Naturschutz, etwa durch Biodiversitätsverluste, schaden. Die Entnahme direkt aus der Luft benötigt zwar weniger Fläche, ist dafür sehr energie- und ressourcenintensiv. Andere NET, wie etwa Ozeandüngung und -alkalisierung, sind aufgrund ihrer hochriskanten Umweltauswirkungen stark umstritten und für Österreich zudem wenig relevant.

NET nur klimawirksam, wenn CO₂ langfristig im Boden oder in Produkten gespeichert wird

Der Markt für *Technologien zur Kohlenstoffabscheidung, -nutzung und -speicherung* (CCUS) hat in den letzten Jahren ein starkes Wachstum gezeigt (Itul, 2023). CO₂ kann in verschiedenen Prozessen in der Chemie- und Erdölindustrie (Harnstoffproduktion, Kraftstoffe), der Lebensmittelindustrie (Kühlung, Verarbeitung), der Mineralisierung (Backpulver, CO₂-Betonhärtung), der Energieerzeugung (Wärme-pumpen), der Energiepflanzenproduktion (Algenzucht), der Pharmazie (chemische Synthese), der Zellstoff- und Papierindustrie (Injektion in den Metallguss) und anderen Bereichen (z. B. Wasseraufbereitung) eingesetzt werden (Peres et al., 2022). Aufgrund des hohen Bedarfs der Industrie an CO₂-neutralen Kohlenstoff ist eine steigende Konkurrenz zwischen CCU und CCS-Verfahren zu erwarten (Ragwitz M., 2023). Derzeit beruhen die meisten CO₂-Abscheidungsverfahren auf Absorption, Adsorption, Membranen und chemischer Kreislaufführung. Sie finden Anwendung in der Landwirtschaft, bei der Umwandlung von CO₂ in Brennstoffe (katalytische Verfahren), Chemikalien (photokatalytische Verfahren), Polymere und Baumaterialien (Peres et al., 2022). Neue Verfahren zur Abscheidung und Verarbeitung von CO₂ sind in der chemischen Industrie erprobt, um wert-

CCUS – Abscheidung und Nutzung von CO₂: neue Technologien, alte Hoffnungen

volle Produkte wie Ethanol, Polyurethan, Harnstoff oder Pharmazeutika, herzustellen; die technische Entwicklung der Prozesse ist teilweise abgeschlossen. Die Kommerzialisierung dieser Verfahren steht allerdings noch am Anfang (siehe auch *CO₂ als Ressource*).

Viele der aus diesen Prozessen resultierenden Produkte können bisher wirtschaftlich nicht mit herkömmlichen Produkten konkurrieren oder es fehlen die entsprechenden Produktstandards. Außerdem fehlt eine standardisierte Methode, um sicherzustellen, dass die Technologien insgesamt CO₂-Emissionen effektiv reduzieren (GAO, 2022). Ein echter Beitrag zu negativen Emissionen scheint derzeit nicht greifbar. Eine Studie, die 74 CCU-Verfahren untersucht hat, kam zum Schluss, dass nur vier die Tauglichkeit haben, einen relevanten Beitrag zum Erreichen der Pariser Klimaziele leisten zu können, darunter z. B. zementlose Bausteine aus Stahlschlacke (de Kleijne et al., 2022). Auch eine andere Studie, die verschiedene, aus CO₂ hergestellte, Produkte betrachtet, hält fest, dass deren Beitrag zur CO₂-Entnahme sehr gering ist. Beispielsweise können für die Synthese von Harnstoff, der für die energieintensive Düngemittelindustrie sehr wichtig ist, bei einer weltweiten Produktionsmenge von ca. 150 Mio. Tonnen, nur 0,3 % der jährlich weltweit emittierten CO₂-Menge genutzt werden (Richers & Schütz, 2022). Die öffentliche Wahrnehmung von CCUS ist international gering, und Reaktionen häufig negativ sind, etwa wenn Investitionen in CCUS zulasten von Investitionen in erneuerbare Energien und anderen kohlenstoffarmen Alternativen gehen (Tardin-Coelho et al., 2025). Andere Bedenken umfassen: Sicherheit, Umweltauswirkungen, Kosten und Verteilung der Vorteile – insbesondere in benachteiligten Gebieten; Oder auch Konflikte bei der Landnutzung, Zweifel an Rentabilität, Nachhaltigkeit, Wirksamkeit, Einsatzgeschwindigkeit, Skalierbarkeit, Regulierung, technologische Unsicherheiten und Unreife. (Tardin-Coelho et al., 2025).

Bei Verfahren zur *Bioenergieproduktion mit Kohlendioxidabscheidung und -speicherung und/oder -nutzung* (BECCS, BECCU) wird CO₂ durch Photosynthese von Pflanzen fixiert. Die so aufgebaute Biomasse wird zur Energiegewinnung verbrannt und entstehendes CO₂ abgeschieden und im Boden gespeichert. Primär limitierende Faktoren sind hier der Flächenverbrauch für die Biomasseproduktion sowie die Konkurrenz mit anderen Nutzungsarten der Biomasse. Für eine negative Emissionsbilanz ist auch hier entscheidend, welche Art von Biomasse verarbeitet wird (siehe auch Pflanzenkohle). Mögliche Umweltauswirkungen umfassen Entwaldung und Walddegradation sowie Nachteile für den Erhalt der Biodiversität, abhängig davon, welche Vegetation genutzt wird (Ragwitz M., 2023).

Direct Air Capture sind Verfahren, die CO₂ chemisch aus der Umgebungsluft abscheiden (DACCs, DACCU), um dieses dann geologisch zu speichern oder der industriellen Nutzung zuzuführen. Der Flächenverbrauch ist viel geringer als bei den anderen NET. Da der CO₂-Gehalt der Atmosphäre aber 100-300-mal geringer ist als der bei Punktquellen, wird sehr viel Energie benötigt, was sehr hohe Kosten von \$ 600-\$ 1,000 pro Tonne CO₂ verursacht.¹ Diese Energie muss dabei klimaneutral erzeugt werden, denn nur so können negative Emissionen verwirklicht werden. Hinzu kommt ein erheblicher Ressourcenbedarf zur Produktion dieser (Groß-)Technologie. Außerdem besteht weiterhin das Risiko eines technologischen Lock-ins, also der Abhängigkeit von einer solchen Großtechnologie, wenn deren Abschaltung oder Ausfall zu schweren Klimakonsequenzen führt, weil andere Wege der Emissionsreduktion unzureichend umgesetzt wurden. Die

*Derzeit marginaler
Beitrag zum
Klimaschutz*

*BECCUS –
Bioenergie mit
Kohlenstoffabscheidung
und -speicherung bzw.
-nutzung*

*Direct Air CCUS –
technischer Fortschritt,
alte Risiken*

¹ weforum.org/publications/carbon-dioxide-removal-best-practice-guidelines/.

meisten der DACCS/BECCS-Verfahren sind nicht im industriellen Maßstab erprobt und bergen daher hohe Risiken hinsichtlich der Wirtschaftlichkeit und Nachhaltigkeit.

Beschleunigte Verwitterung basiert auf chemischer CO₂-Bindung, bei der zermahlene Silikat- oder Karbonatminerale auf Böden CO₂ binden. Dieser Prozess ist vor allem in feucht-warmen Agrarsystemen relevant, doch das Potenzial für Österreich ist gering; nur 3,6 % des globalen Potenzials entfällt auf die EU. Energiekosten und Treibhausgas-Emissionen bei Extraktion, Mahlen, Transport und Bodenausbringung werden bei Abschätzungen meist nicht berücksichtigt (Kraxner, 2024).

Bei *Aufforstung* entziehen die wachsenden Bäume der Atmosphäre für längere Zeiträume CO₂. Verstärkt wird der Effekt, wenn das Holz später als Baumaterial verwendet wird und dann den enthaltenen Kohlenstoff noch länger in Gebäuden speichert. Allerdings sind Feuer und Schädlinge hohe Risiken für die reale Speicherdauer des Kohlenstoffs in Wäldern; in Zukunft wird mit einer Zunahme solcher Störereignisse gerechnet (siehe Waldbrand: *Bekämpfung und Wiederherstellung*). Der Flächenbedarf ist hoch, was Konkurrenz mit anderen Nutzungen, z. B. Landwirtschaft, bedeutet. Aufforstung verbessert Bodenqualität und Wasserspeicherung. Biodiversität hängt von Baumarten und Vegetation ab. Waldflächen reflektieren weniger Licht als Schnee, was Erwärmung fördert (Ragwitz M., 2023). Mittelfristige Aufforstung hilft Österreich, bis 2050 Klimaziele zu erreichen und technologische Emissionsreduktionen zu ermöglichen (Kraxner, 2024).

Unter bestimmten Voraussetzungen kann die Erzeugung von Pflanzenkohle und deren Einbringung in Böden große Mengen an Kohlenstoff binden und langfristig speichern, da Biokohle im Boden über Jahrhunderte stabil bleiben kann. Unter Berücksichtigung der richtigen Ausgangsmaterialien (Reststoffe am Ende der Nutzungskette) und Pyrolysetechnik kann Pflanzenkohle als Kohlenstoffsenke genutzt werden. Die Technologie ist ausgereift (TRL, technology readiness level 8-9) und wird vom Weltklimarat als aussichtsreiche Maßnahme eingeschätzt (Soja, 2022). Reststoffe wie Grünschnitt, Trester oder Getreidespelzen eignen sich (bei der Kompostierung entweicht sonst bis zu 60 % des Kohlenstoffs als CO₂ oder Methan). Globale Pflanzenkohle-Entfernung: bis zu 3 Gigatonnen CO₂-Äquivalente jährlich (Lehmann et al., 2021), knapp 10 % der weltweiten Emissionen. Vorteile: bessere Bodenqualität, Ertragssteigerung durch mehr Nährstoffe und Wasser, Bodensanierung durch Schadstoffabsorptions, Vermeidung von Phosphor- und Nitrat-Auswaschung. Seit Jahrtausenden in der Landwirtschaft, z. B. im Amazonasbecken, eingesetzt. Bei der Herstellung der Pflanzenkohle durch pyrolytische Verkohlung unter Luftabschluss bei 400-1.000 °C entstehen auch giftige und Rauchgase, die allerdings in modernen Anlagen aufgefangen, verbrannt und zur Wärme oder Stromproduktion genutzt werden. In der europäischen Biochar-Richtlinie (EBC) (bzw. ÖNORM S 221) ist die Pyrolysetechnik geregelt, welche Biomasse zur Herstellung verwendet werden darf und welche Eigenschaften Pflanzenkohle haben muss (etwa PAK-(Polyaromatische Kohlenstoffe) und Schwermetallgehalte²). EBC-zertifizierte Biokohle ist in Österreich per Erlass³ seit Längerem, in der EU erst seit 2022 als Zusatzstoff in Düngemitteln

*Beschleunigte
Verwitterung –
wenig Möglichkeiten
in Österreich*

*Aufforstung:
Wald als
Kohlenstoffsenke*

*Pflanzenkohle,
Biokohle, Biochar:
pyrolytische
Kohlenstoffabscheidung
und Speicherung*

² european-biochar.org/de/.

³ bio-austria.at/a/bauern/pflanzenkohle/.

und Kompost zugelassen. Österreichweit gibt es drei EBC-zertifizierte Betriebe⁴, eine flächendeckende Anwendung in dafür passenden Böden (etwa Wein- und Waldviertel) ist allerdings bei Weitem nicht umgesetzt. Biokohle wird auch als Zusatzstoff in Baustoffe wie Beton eingebracht, um diesen rechnerisch CO₂-neutral oder sogar negativ zu machen.⁵

Kohlenstoff kann auch bei bestimmter Landbewirtschaftung im Boden gespeichert werden, etwa bei Agro-Forst-Systemen. Diese sind zwar auch flächenabhängig, aber Nahrungs- und Futtermittelproduktion ist weiterhin möglich. Außerdem gibt es neben der Kohlenstoffspeicherung weitere positive Auswirkungen auf Boden-, Luft- und Wasserqualität, allerdings auch Unsicherheiten, wie ein möglicher Anstieg von NO₂-Emissionen.

Da trockengelegte Moore durch ihre Verrottung sehr viele Treibhausgase (bis zu 5 % der menschlichen Treibhausgase) freisetzen, wird im Zusammenhang mit der CO₂-Speicherung auch häufig die Wiedervernässung von Mooren diskutiert. Hier handelt es sich aber lediglich um eine CO₂-Vermeidungsstrategie (wenn auch eine wichtige), nicht um negative Emissionen im engeren Sinne, da dafür der Torfkörper zu langsam wächst und deshalb das CO₂-Entnahmepotential als gering eingeschätzt wird (Ragwitz M., 2023).

**Kohlenstoffbindung
im Boden**

**Moore – wenig
Potenzial für negative
Emissionen, aber
wichtig zur
Vermeidung von
Treibhausgasen**

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Technischer Fortschritt, aber auch das weitgehende Scheitern der Reduktion von Treibhausgasemissionen lassen die Debatte um Negativemissionstechnologien wiederaufleben. Die Abscheidung von CO₂ aus der Atmosphäre oder direkt bei industriellen Punktquellen (z. B. Zementwerke) und dessen Rückführung in industrielle Prozesse gewinnen auch für Unternehmen an Attraktivität. Ungeachtet dessen stellt sich die Frage, wie groß das Potenzial von NET vor dem Hintergrund von Nachhaltigkeitszielen tatsächlich ist – und welche Nebeneffekte der NET-Einsatz auf den öffentlichen Diskurs um Emissionsreduktionen hätte und wie diese klug gemanagt werden können. Mehr Klarheit die österreichische Carbon-Management-Strategie.⁶ Diese zeigt auch den komplexen rechtlichen Rahmen; beispielsweise wäre bei der diskutierten Aufhebung des 2011 bundesweit beschlossenen CCS-Verbots eine Vielzahl bisher beschlossener EU-Regelungen in nationales Recht zu übertragen.

Umstritten:
techno-ökonomische
Leistungsfähigkeit
und Wirkung auf
Reduktionsstrategien

⁴ bmluk.gv.at/dam/jcr:f56da234-a3a0-4746-b39b-236e98b21ad0/Biokohle-Potenzial_und_Grenzen_der_Anwendbarkeit_in_der_Land_und_Forstwirtschaft_240319_Final_clean_korr_BF.pdf.

⁵ burgenland.orf.at/stories/3180987.

⁶ bmf.gv.at/dam/bmfgvat/klimapolitik/%C3%96sterreichische-Carbon-Management-Strategie.pdf.

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

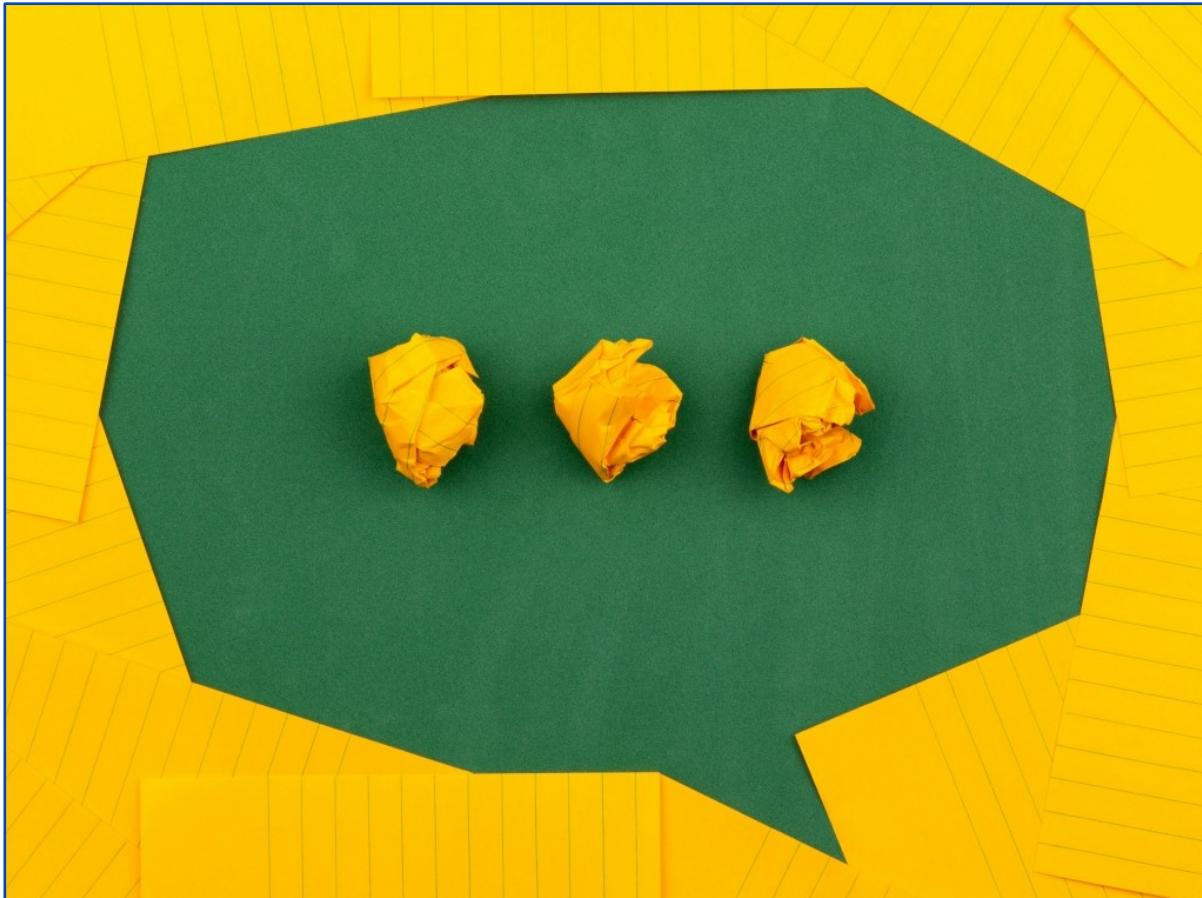
Das Potenzial verschiedener NET sollte einerseits für den österreichischen Kontext spezifisch auf (prognostizierte) Kosten, das Potenzial, die Dauer der Kohlenstoffbindung, mögliche Umweltauswirkungen, den technologischen Reifegrad und die gesellschaftliche Akzeptanz untersucht werden. Eine vorausschauende Folgenanalyse der Wechselwirkungen zwischen den jeweiligen Verfahren mit dem Energiesystem sowie mit der Land- und Forstwirtschaft sollte durchgeführt werden. Zusätzlich wäre eine Analyse des (hoffnungsgesetzten) Diskurses, insbesondere im Bereich neuer CCUS-Technologien, wichtig um Mythen und Fakten bezüglich der Technologien zu unterscheiden.

*Trotz neuer
Technologien:
keine einfachen
Lösungen am Horizont*

ZITIERTE LITERATUR

- de Kleijne, K., et al. (2022). Limits to Paris compatibility of CO₂ capture and utilization. *One Earth*, 5(2), 168-185.
- GAO (2022). *Decarbonization: Status, Challenges, and Policy Options for Carbon Capture, Utilization, and Storage*, [gao.gov/products/gao-22-105274](https://www.gao.gov/products/gao-22-105274).
- IPCC (2022). Summary for Policymakers. In J. S. P.R. Shukla, et al. (Hrsg.), *Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, UK and New York, NY, USA.
- IPCC (2023). Climate Change 2023: Synthesis Report. Summary for Policymakers, de-ipcc.de/358.php.
- Itul, A., et al. (2023). *Clean Energy Technology Observatory: Carbon capture storage and utilisation in the European Union – 2023 Status Report on Technology Development, Trends, Value Chains and Markets*.
- Kraxner, F., et al. (2024). Kapitel 5. Mitigation des Klimawandels. In R. Jandl, et al. (Hrsg.), *APCC Special Report: Landnutzung und Klimawandel in Österreich* (S. 275). Springer Spektrum: Berlin/Heidelberg. S. 275–338.
- Lehmann, J., et al. (2021). Biochar in climate change mitigation. *Nature Geoscience*, 14(12), 883-892, doi.org/10.1038/s41561-021-00852-8.
- Peres, C. B., et al. (2022). Advances in Carbon Capture and Use (CCU) Technologies: A Comprehensive Review and CO₂ Mitigation Potential Analysis. *Clean Technologies*, 4(4), 1193-1207. doi:10.3390/cleantechnol4040073.
- Ragwitz M., et al. (2023). *Szenarien für ein klimaneutrales Deutschland. Technologieumbau, Verbrauchsreduktion und Kohlenstoffmanagement (Analyse). Schriftenreihe „Energiesysteme der Zukunft“ (ESYS)*, doi.org/10.48669/esys_2023-3.
- Richers, U., & Schütz, R. (2022). *Möglichkeiten und klimarelevante Auswirkungen der stofflichen Nutzung von Kohlenstoffdioxid*. Karlsruhe: KIT Scientific Publishing, ksp.kit.edu/site/books/m/10.5445/KSP/1000143474/.
- Soja, G. (2022). *Pflanzenkohle zur CO₂-Entfernung aus der Atmosphäre. CCCA Fact-Sheet #38*, ccca.ac.at/fileadmin/00_DokumenteHauptmenue/02_Klimawissen/FactSheets/38_pflanzenkohle_202209.pdf.
- Tardin-Coelho, R., et al. (2025). Carbon capture utilisation and storage (CCUS) and public perceptions: A systematic literature review. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 145, 104393, [sciedirect.com/science/article/pii/S175058362500091X](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S175058362500091X).

EIN NICHT-ENGLISCHES SPRACHMODELL (AKTUALISIERT)



© CC0 (Volodymyr Hryshchenko/unsplash)

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der Veröffentlichung von ChatGPT und anderen Sprachmodellen (Large Language Models – LLMs) entstanden ein Hype und große Erwartungen auf Disruptionen in Wirtschaft und Gesellschaft. Basis für die Modelle sind vor allem Trainingsdaten auf US-Englisch. Das hat technisch bedingt Auswirkungen auf die Qualität in anderen Sprachen aber auch kulturelle Einflüsse, weil die Sprachelogiken z. B. im Deutschen anders sind. Dazu gesellen sich rechtliche Probleme in der Anwendung (z. B. Datenschutzkonformität). Weiters ergeben sich wirtschaftliche Fragen hinsichtlich der Geheimhaltung von Geschäftsgeheimnissen. Als politische Dimension gilt eine noch größere Abhängigkeit von den globalen Konzernen und eine weiter verringerte digitale Souveränität. In den letzten Monaten gab es Fortschritte, (offene) Sprachmodelle auf nicht-englischer Sprache zu entwickeln und Infrastruktur in der EU aufzubauen.

*USA und China
beherrschen den Markt*

Wo bleibt Europa?

ÜBERBLICK ZUM THEMA

Seit der Veröffentlichung von ChatGPT im Herbst 2022 besteht kein Zweifel, dass die großen Sprachmodelle (LLM) einen großen Sprung in der Entwicklung von Systemen der sog. Künstlichen Intelligenz darstellen. Inwieweit der Hype um große Sprachmodelle (wie ChatGPT, Gemini, Mistral, Claude, Grok etc.) berechtigt ist und diese tatsächlich die in sie gesteckten Erwartungen erfüllen, muss sich erst zeigen. Bereits jetzt zeichnen sich aber Verwerfungen in Wirtschaft und Gesellschaft ab, etwa durch Pläne für umfangreiche Entlassungen unter Verweis auf KI.¹

LLM mit disruptivem Potential

Es zeigt sich, dass durch die hauptsächliche Nutzung von US-englischen Trainingsdaten für die bestehenden Modelle technisch bedingte Beschränkungen in der Qualität der Nutzung und des Outputs in anderen Sprachen entstehen. Dazu kommen kulturelle Einflüsse über Ausdrucksformen und Sprachlogiken sowie rechtliche und wirtschaftspolitische Aspekte. Absehbar sind mittlerweile zwei unterschiedliche Entwicklungsstrategien, die entweder darauf abzielen, das größte und beste Modell zu haben, oder sehr speziell auf Anforderungen aus der wirtschaftlichen Realität (z. B. Prozesse bei Kunden) abgestimmt zu sein (Bomke 2024). Die zweite Strategie könnte sein, Eigenheiten bestehender Modelle, z. B. in Fragen von Datenschutz, Urheberrecht etc. entgegenzuwirken. Diese Eigenschaften wurden unter europäischen Gesichtspunkten als Problem erkannt. Dreh- und Angelpunkt europäischer Anstrengungen ist das AI-Innovation-Package der Europäischen Kommission,² im Rahmen dessen in der EU **KI-Rechenzentren** aufgebaut werden sollen, fünf davon besonders sogenannte Gigafactories.³

AI-Innovation-Package der Europäischen Kommission

Alle derzeit diskutierten großen Sprachmodelle bauen größtenteils auf US-englischen Trainingsdaten auf. Diese Struktur in den Trainingsdaten hat technische Auswirkungen auf die Qualität der Ergebnisse in anderen Sprachen (Nicholas/ Bhatia 2023). Texte müssen für die Erstellung der Modelle in maschinell verarbeitbare Einheiten, genannt Token, zerlegt werden. Ein Token kann als ein Stück Text betrachtet werden, das ein Modell auf einmal verarbeitet. In der deutschen Sprache könnte ein Token ein Wort, ein Satzzeichen, ein Teil eines Wortes oder sogar nur ein Buchstabe sein. Ein Token kann in verschiedenen Sprachen unterschiedliche Längen haben, z. B. kann es in Englisch oft ein Wort sein, während es in Sprachen wie Chinesisch oft ein Zeichen ist.⁴ Diese Arbeit übernehmen Software-Programme, sogenannte „Tokenizer“. Sind diese auf Englisch trainiert, verwenden sie die Strukturmerkmale der englischen Sprache. Da andere Sprachen andere Strukturmerkmale aufweisen, führt das dazu, dass Worte zerschnitten und auf mehrere Tokens verteilt werden. Eine bewährte Faustregel für das Verhältnis ist etwa im Englischen: 1 Wort ≈ 1,3 Token, im Deutschen: 1 Wort ≈ 1,8 Token,

US-Englisch dominiert die Trainingsdaten – mit Auswirkungen auf die Effektivität des Modells

¹ Derzeit trifft dies z.B. die IT-Branche, wo Berufseinsteiger:innen zunehmend schlechte Aussichten auf Jobs haben: derstandard.at/story/3000000290507/accenture-intel-microsoft-tech-konzerne-streichen-zehntausende-jobs-was-ist-los.

² digital-strategy.ec.europa.eu/en/factpages/ai-innovation-package.

³ digital-strategy.ec.europa.eu/en/policies/ai-factories.

⁴ online-marketing-leipzig.de/das-tokenlimit-ein-einstieg-fuer-anfaenger-mit-tipps-zum-prompting/.

im Spanischen: 1 Wort \approx 2 Token und im Französischen: 1 Wort \approx 2 Token.⁵ Da alle LLMs ein (technisches) Token-Limit⁶ haben (und die Leistungen der Anbieter in der Regel nach Token abgerechnet werden) hat die Anwendung auf Englisch trainierter Tokenizer auf anderssprachige Trainingsdaten zur Folge, dass weniger Texte (je Prompt) produziert werden können und vor allem sprachliche Sinneinheiten nicht gut abgebildet werden.

Evaluierungen verschiedener Sprachmodelle haben gezeigt, dass deutliche Abweichungen mehrsprachiger LLMs zwischen verschiedenen Sprachen existieren: Beim gleichen Modell schnitt die am schlechtesten unterstützte Sprache zwischen 8 % und beinahe 50 % besser als die beste ab – und Englisch immer am besten (Hupkes & Bogoychev, 2025). Dabei zeigte sich auch, dass viele der üblichen Benchmarks von Sprachmodellen in nicht-englischer Sprache auf maschinell übersetzten Fragen aus dem Englischen aufbauen – und damit lokale Feinheiten nicht abgebildet werden. Schlussendlich sind damit viele Benchmarks nicht besonders aussagekräftig für den Einsatz in nicht-angelsächsischen Kontexten.

Auch 2025 noch große Qualitätsunterschiede zwischen Sprachen

Neben den technischen Auswirkungen sind es somit auch kulturelle Eigenheiten, die sich in den Trainingsdaten und damit den Antworten der Modelle abilden (siehe Ramesh et al. 2024, Fenech-Borg et al., 2025). Mit der Vorherrschaft US-englischer Trainingssätze werden auch US-amerikanische Formulierungen, Denkweisen, Ethik-Richtlinien etc. mittransportiert, was zu einer tendenziellen Angleichung von Kommunikationsformen im Sinne einer globalisierten Sprech- und Denkweise führen kann. Neben den möglichen kulturellen Auswirkungen werden aber vor allem rechtliche Probleme in der Anwendung offenbar. Viele der Modelle wurden mit Daten aus dem Internet, teilweise aus Social Media Plattformen trainiert. Es ist bei vielen der derzeitigen Modelle nicht klar, woher die Daten stammen, ob personenbezogene Daten darin verarbeitet wurden, ob die davon betroffenen Datensubjekte um ihr Einverständnis gefragt wurden, ob sie also im Einklang mit der DSGVO und damit wesentlichen europäischen Grundwerten genutzt werden können. Bei vielen Daten stehen auch Urheberrechtsverletzungen im Raum, wie etwa im prominenten Fall der New York Times, die OpenAI verklagt hat (Chen, 2025).

Kulturelle, ethische und rechtliche Probleme

Im Sommer 2025 haben die ETH Zürich, EPFL und das Schweizer Nationale Supercomputing Center das Modell Apertus veröffentlicht: Ein großes Sprachmodell unter Berücksichtigung Schweizer Werte: Mehrsprachigkeit, Transparenz und dem Gemeinwohl verpflichtet (ETH Zürich, 2025). Im Sinne der Transparenz sind sowohl die gesamte Trainingsarchitektur als auch alle Trainingsdaten, Quellcode, Anleitungen und die trainierten Modelle offen verfügbar. Gleichzeitig wurden die Daten im Einklang mit schweizerischem und europäischem Urheberrecht ausgewählt und persönliche Daten entfernt. Es ist auch vollständig mit dem EU-AI-Act kompatibel. Anders als viele andere Sprachmodelle wurde es von Grund auf mehrsprachig entwickelt – mit besonderer Rücksicht auch auf Schweizerdeutsch und Rätoromanisch.

Offenes, mehrsprachiges Modell Apertus aus der Schweiz

⁵ deinkikompass.de/blog/openai-gpt-token-guide.

⁶ Z. B. GPT 32.765, Llama2 2.048, Claude_2 100.000 und PaLM 8.000 siehe empolis.com/blog/entfesselte-langs-trotz-token-beschränkung/.

Neben der eingeschränkten Eignung für nicht-englische Sprachen stellen sich noch wirtschaftliche Überlegungen Fragen, insbesondere zur Offenlegung von z. B. Geschäftsgeheimnissen durch den Einsatz großer Sprachmodelle. Dabei steigt die Gefahr für gezielte Angriffe, je tiefer KI-Systeme in andere digitale Infrastrukturen integriert werden, um etwa gezielt sensible Daten zu stehlen (Constantin, 2025). Nichtdestotrotz wird das wirtschaftliche Potenzial großer KI-Sprachmodelle von vielen als vielversprechend angesehen. Ihre Anpassungsfähigkeit an unterschiedlichste branchen- und unternehmensspezifische Anforderungen und ihre hohe Wiederverwendbarkeit eröffnen unzählige Anwendungsfälle. Anhand von Praxisbeispielen verdeutlicht eine Publikation der deutschen Akademie der Technikwissenschaften (acatech) die Chancen sowie Herausforderungen der Sprachmodelle. Die Autor:innen empfehlen den Aufbau eines offenen, kommerziell nutzbaren Datensatzes in deutscher Sprache, der europäischen Werten und Regeln entspricht und die Entwicklung von Sprachmodellen in Deutschland unterstützt (Löser 2023).

Wirtschaftliche Überlegungen

Zu den o. a. technischen, rechtlichen, kulturellen und wirtschaftlichen Fragestellungen kommt noch die politische Dimension hinzu. Die Nutzung vornehmlich in den USA und China produzierter Modelle führt zu noch größeren Abhängigkeiten von den großen amerikanischen sowie chinesischen Technologiekonzernen, was im Sinne anzustrebender *Digitaler Souveränität* kontraproduktiv erscheint. Ziel ist deshalb, ein offenes Sprachmodell auf Basis europäischer, nicht-englischer oder deutscher bzw. österreichischer Sprache zu entwickeln⁷ und so sicherzustellen, dass sowohl sprachliche als auch kulturelle und rechtliche Eigenheiten des deutschen und europäischen Sprachraumes Berücksichtigung finden. Eine wichtige Initiative in diese Richtung stellt die von der EU geförderte EuroLLM Initiative dar: Wie Apertus (s. o.) soll EuroLLM dezidiert mehrsprachig (alle offizielle EU-Sprachen abbildend), transparent und mit EU-Recht vereinbar sein (Martins et al., 2025). Erste kleine Modelle dieser Initiative zeigen bereits vielversprechende Ergebnisse im Vergleich zu kommerziellen LLMs kommerzieller Anbieter.

Geopolitik und digitale Souveränität

Vorteile eines dezidiert deutschsprachigen Modells könnten sein, dass die Modelle schlanker sein können. Das wirkt sich auch positiv auf die verringerten Hardware-Anforderungen (z. B. bei den schnellen, für KI-Modelle notwendigen Grafikkarten) und die erhöhte Betriebsgeschwindigkeit aus. Ein gezielt vorselektiertes Datenmaterial kann die Qualität erhöhen, den Fokus auf bestimmte Sachgebiete ermöglichen und eine optimale Nutzer:innenführung mit Sensibilisierung für die Ergebnisse beinhalten. Außerdem entstünden geringere Kosten während des Betriebs (vgl. Meffert 2023).

EuroLLM: ein offenes Sprachmodell für die EU

Höhere Effizienz bei sprachlicher Fokussierung

⁷ D. h. Trainingsdaten aus den fünf größten europäischen Sprachen oder auch konkret dem deutschen Sprachraum zu verwenden und geeignete Tokenizer für die europäischen Sprachen bzw. die deutsche Sprache zu entwickeln und zu verwenden.

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Aus dem oben Dargelegten geht hervor, dass die Entwicklung eines Sprachmodells auf Basis nicht-englischer Trainingsdaten Vorteile technischer, kultureller und ökonomischer Natur bringen kann. Um die Unterschiede zwischen den Sprachen, auch zwischen den Varietäten Deutsch und Österreichisch innerhalb des Modells hochzuhalten und den Standort Österreich in diese Entwicklung einzubringen, erscheint es notwendig, über mögliche Kooperationen nachzudenken (z. B. mit Apertus oder EuroLLM), sodass auch genuin österreichische Inhalte in die Trainingsdaten integriert werden. Die österreichische KI-Landschaft⁸ kann dazu sicher wichtige Beiträge liefern. Nicht zuletzt sei auf die Einrichtung des Exzellenz-Clusters zu Bilaterale KI verwiesen.⁹

*Förderung der
österreichischen
KI-Landschaft sowie
der sprachlichen und
wirtschaftlichen
Eigenständigkeit*

Grundlage dafür könnte auch die oben genannte EU-Initiative zum Aufbau von KI-Rechenzentren bilden (siehe auch [Nachhaltige KI-Rechenzentren](#)), wovon eines in Österreich im Entstehen ist, die AI Factory Austria AI:AT.¹⁰ Diese Recheninfrastruktur soll dabei unter anderem auch der österreichischen Verwaltung zur Verfügung stehen, um für die Verwaltung maßgeschneiderte KI-Lösungen zu entwickeln.

*AI Factory Austria
AI:AT*

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

Wie gezeigt werden konnte, macht es einen Unterschied, welche Sprache für das Training von großen Sprachmodellen verwendet wird. Durch die Sprache wird auch ein kultureller und Werte-Bias durch das Modell mitgelernt.

*TA-Studie zum
Sprach- und Kultur-
Bias von LLM*

Das Parlament könnte eine TA-Studie beauftragen, die auf Basis bestehender Erkenntnisse zu den Einflüssen unterschiedlicher Sprachen auf die Leistungsfähigkeit von Sprachmodellen ermittelt, inwieweit es aus Sicht der österreichischen Wirtschaft, der Konsument:innen und Bürger:innen angezeigt wäre, ein eigenes Modell zu entwickeln. Besonderes Augenmerk könnte auch auf österreichische sprachliche Eigenheiten gelegt werden, um diese auch in Zukunft zu erhalten.

⁸ aiaustria.com, ai-landscape.at, asai.ac.at, brutkasten.com/artikel/nxai-ai-experte-sepp-hochreiter-gruendet-neues-ki-startup.

⁹ fwf.ac.at/aktuelles/detail/oesterreichs-naechste-exzellenzcluster-starten.

¹⁰ ai-at.eu.

ZITIERTE LITERATUR

- Bomke, L., 2024, Intel, Allianz und Unilever setzen auf Silo AI, *Handelsblatt*, Wochende 5./6./7. April 2024.
- Chen, N. (2025, 9. Juni). *Stolen Stories or Fair Use? The New York Times v. OpenAI and the Limits of Machine Learning*. Columbia Undergraduate Law Review. culawreview.org/ddc-x-culr-1/nyt-v-openai-and-microsoft.
- Constantin, L. (2025, 8. August). Black Hat: Researchers demonstrate zero-click prompt injection attacks in popular AI agents. *CSO Online*. csoonline.com/article/4036868/black-hat-researchers-demonstrate-zero-click-prompt-injection-attacks-in-popular-ai-agents.html.
- ETH Zürich. (2025, 2. September). Apertus: Ein vollständig offenes, transparentes und mehrsprachiges Sprachmodell. ETH Zürich. ethz.ch/de/news-und-veranstaltungen/eth-news/news/2025/09/medienmitteilung-apertus-ein-vollstaendig-offenes-transparentes-und-mehrsprachiges-sprachmodell.html.
- Fenech-Borg, E. Z., et al. (2025). *The Cultural Gene of Large Language Models: A Study on the Impact of Cross-Corpus Training on Model Values and Biases* (No. arXiv:2508.12411). arXiv. doi.org/10.48550/arXiv.2508.12411.
- Hupkes, D., & Bogoychev, N. (2025). MultiLoKo: A multilingual local knowledge benchmark for LLMs spanning 31 languages (No. arXiv:2504.10356). arXiv. doi.org/10.48550/arXiv.2504.10356.
- Löser, A., Tresp, V. et al., 2023, *Große Sprachmodelle entwickeln und anwenden – Ansätze für ein souveränes Vorgehen*, München: Whitepaper aus der Plattform Lernende Systeme, acatech, doi.org/10.48669/pls_2023-6.
- Martins, P. H., et al. (2025). EuroLLM: Multilingual Language Models for Europe. *Procedia Computer Science*, 255, 53–62. doi.org/10.1016/j.procs.2025.02.260.
- Meffert, K., 2023, Künstliche Intelligenz: Deutsche Texte in KI-Sprachmodellen, *Dr. DSGVO Blog*, dr-dsgvo.de/kuenstliche-intelligenz-deutsche-texte-in-ki-sprachmodellen.
- Nicholas, G. und Bhatia, A., 2023, *Lost in Translation: Large Language Models in Non-English Content Analysis*, im Auftrag von: Center for Democracy & Technology: cdt Research, cdt.org/insights/lost-in-translation-large-language-models-in-non-english-content-analysis/; auch veröffentlicht als: arxiv.org/abs/2306.07377.
- Ramesh, K., Sitaram, S. und Choudhury, M., 2024, *Fairness in Language Models Beyond English: Gaps and Challenges*; arxiv.org/pdf/2302.12578.pdf.

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 05/2025 bis 10/2025 ergab insgesamt 34 Einträge (ohne ITA und EPTA). Diese Dokumente wurden in der Folge nach den im Abschnitt 1.2 beschriebenen Relevanzkriterien ausgewertet, wobei insbesondere die Österreichrelevanz eine Rolle spielte.

Folgende Themen wurden jüngst international behandelt:³

- *Biowissenschaften*: Neue Gentechnik; Neurowissenschaft und Erziehung; Embryo-Modelle
- *Energie*: Anpassung der Stromnetze; Fusionsenergie
- *Gesellschaft*: Öffentliche Bibliotheken
- *Gesundheit/Medizin*: Medizin-Infrastrukturen der Zukunft; Proteine und Ernährung; Telemedizin
- *Informationstechnologien*: Europäische Streaming-Plattform, Inklusion in der Online-Welt; Quantentechnologie und quantensicheres Internet
- *Künstliche Intelligenz*: Humanoide Roboter; KI in der öffentlichen Verwaltung
- *Umwelt/Klima*: Umweltschonendes Softwareprogrammieren (Green Coding); Wasser-Infrastruktur; Geoengineering; Starkregen in der Stadt; europäische Urwälder; Waldbrand-Management; nachhaltiges Textilrecycling
- *Wirtschaft*: Kosten des freien Internet; Plattform-Arbeit; Geotextilien; Macht von BigTech; Steuerwettbewerb (Luxemburgs); Weltraumpolitik (Norwegens); Digitale Souveränität; europäische Mikroelektronikindustrie
- *Wissenschaft allgemein*: Zukünftiger Speicherring in CERN; Vertrauen in die Wissenschaft; F&E-Investments (Niederlande)

*Auswertung der
EPTA-Datenbank
ergab für den
Berichtszeitraum
insgesamt 34 Studien*

*Jüngst behandelte
Themen im Überblick*

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 internationalen Studien vorgeschlagen:⁴

¹ eptanetwork.org.

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

³ Teils Mehrfachzuordnungen.

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

Thema	Titel der Studie	Land; Institution	Jahr
Geoengineering	La géoingénierie [Geoengineering]	Frankreich; OPECST	2025-10
Inklusion	Inclusive online – Towards design of apps and environments where people can be free and safe [Inklusion in der Online-Welt – Auf dem Weg zu Apps und Umgebungen, in denen Menschen frei und sicher sein können]	Niederlande; Rathenau	2025-08
Bibliotheken	Die Zukunft der Bibliotheken	Deutschland; TAB	2025-07
Starkregen in der Stadt	Multifunktionale urbane Retentionsräume: Schutz vor Starkregenereignissen	Deutschland; TAB	2025-07
Textil-Recycling	Nachhaltiges Textilrecycling: vom Abfall zum Rohstoff	Deutschland; TAB	2025-07
Weltraum	The Norwegian Space Industry Enters a New Era [Die norwegische Raumfahrtindustrie tritt in ein neues Zeitalter ein]	Norwegen; NBT	2025-07
Digitale Souveränität	Setting course toward digital autonomy – Action options for policymakers and buyers [Kurs auf digitale Autonomie – Handlungsoptionen für politische Entscheidungsträger und Käufer]	Niederlande; Rathenau	2025-07
Neurowissenschaften	Les neurosciences dans l'éducation [Neurowissenschaften in der Erziehung]	Frankreich; OPECST	2025-06
Humanoide Roboter	Humanoid robots from now to 2040's – AI-assisted societal impact analysis using Radical Technology Inquirer methodology [Humanoide Roboter von heute bis 2040 – KI-gestützte Analyse der gesellschaftlichen Auswirkungen unter Verwendung der Methodik von Radical Technology Inquirer]	Finnland; ComFuture	2025-06
Plattform-Arbeit	Le travail de plateforme. Définitions, enjeux, perspectives européennes et comparées [Die Arbeit auf Plattformen. Definitionen, Herausforderungen, europäische und vergleichende Perspektiven]	Luxemburg; CellSciLux	2025-06

ÖAW

WWW.OEAW.AC.AT