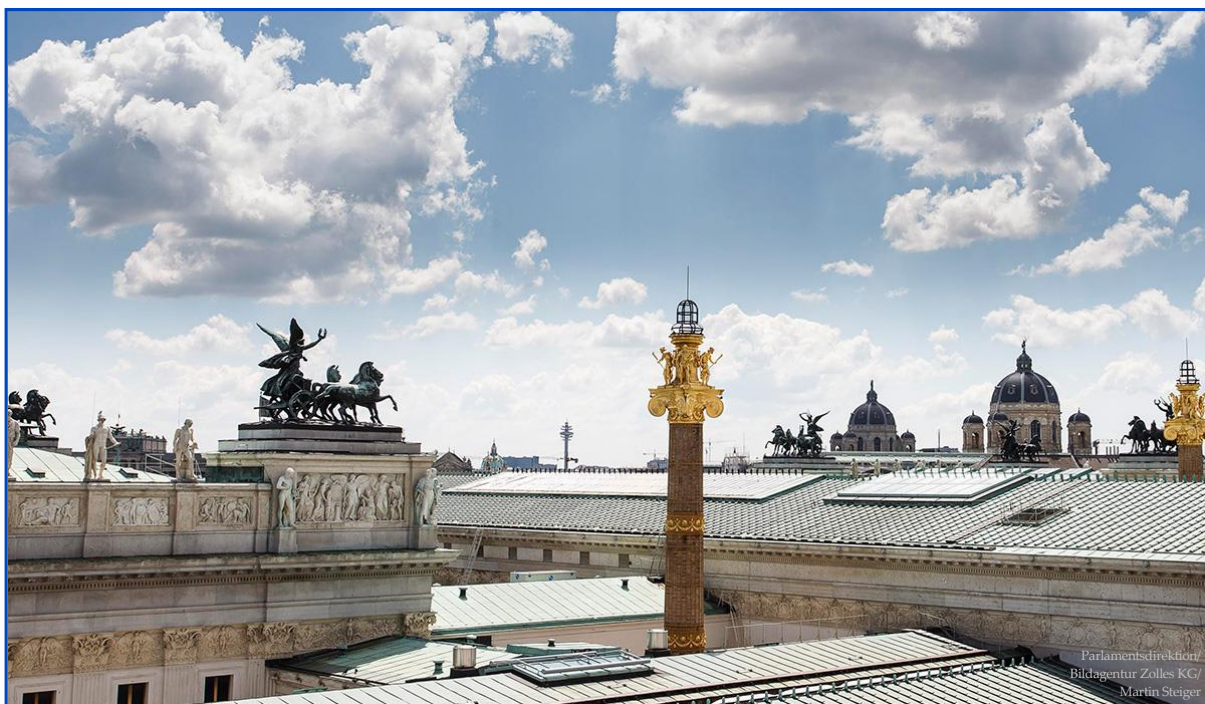




Parlamentsdirektion
Bildagentur Zolles KG/
Martin Steiger

BERICHT

WIEN, MAI/2024

ITA-2024-02

WWW.OEAW.AC.AT/ITA

FORESIGHT UND TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG: MONITORING VON ZUKUNFTSTHEMEN FÜR DAS ÖSTERREICHISCHE PARLAMENT

MAI 2024

FORESIGHT UND TECHNIKFOLGENABSCHÄTZUNG: MONITORING VON ZUKUNFTSTHEMEN FÜR DAS ÖSTERREICHISCHE PARLAMENT

MAI 2024

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 *Wolfgang Eppler [WE] (ITAS)*

Felix Gnisa [FG] (ITAS)

Niklas Gudowsky-Blatakes [NG] (ITA)

Christoph Kehl [CK] (ITAS)

Jaro Krieger-Lamina [JKL] (ITA)

Michael Nentwich [MN] (ITA)

Walter Peissl [WP] (ITA)

Pauline Rioussel [PR] (ITAS)

Christine Rösch (ITAS)

Bericht im Auftrag des österreichischen Parlaments
Wien, Mai/2024

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

Bericht Nr.: ITA-2024-02 (Wien, Mai/2024)

ISSN: 1819-1320

ISSN-online: 1818-6556

epub.oeaw.ac.at/ita/ita-projektberichte/ITA-2024-02.pdf

parlament.gv.at/fachinfos/rlw/zukunftsthemen

© 2024 ÖAW-ITA – Alle Rechte vorbehalten

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
	RESILIENTE DÜNGERVERSORGUNG	15
	EMOTIONSERKENNUNG ALS HOFFNUNGSGEBIET FÜR KI?	21
	SONNENSTÜRME UND WELTRAUMWETTER	27
	BIOCOMPUTER	33
	NEGATIVEMISSIONSTECHNOLOGIEN	38
	EIN NICHT-ENGLISCHES KI-SPRACHMODELL	44
3	AKTUELLE EPTA-STUDIEN	50

ZUSAMMENFASSUNG

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

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 Pflanzkohle 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.

*Resiliente
Düngerversorgung*

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 dahinter liegenden 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.

*Emotionserkennende
KI*

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 Mitleidenenschaft 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?

*Sonnenstürme und
Weltraumwetter*

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

Biocomputer

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 Rechensysteme 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.

Auch wenn Maßnahmen zur Treibhausgasmindering Priorität haben, werden ergänzende Maßnahmen zur CO₂-Entnahme (Negativemissionstechnologien, NET) wahrscheinlich verstärkt notwendig sein, um die Erderwärmung auf ein unter 2°C zu begrenzen. Ihr Einsatz muss aber streng an Nachhaltigkeitsprinzipien ausgerichtet werden. Auch wenn manche Ansätze das Potenzial haben, große Mengen Kohlenstoff längerfristig zu binden, sind bei deren Umsetzung die detaillierte 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- und Speicherungs-/Nutzungsverfahren im Fokus. Die meisten NET sind flächenintensiv, was die Skalierung erschwert, andere benötigen große Mengen an Energie und Ressourcen. Weitere Umweltrisiken, wie etwa Auswirkungen auf die Biodiversität oder die mögliche Reversibilität der Speicherung, sowie die Wechselwirkung zwischen verschiedenen Technologien sind zu bedenken.

*Negativemissions-
technologien*

Mit der Veröffentlichung von ChatGPT und anderen Sprachmodellen (Large Language Modells – LLMs) entstanden ein Hype und große Hoffnungen auf positive 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 Sprachenlogiken im Englischen und z. B. im Deutschen unterschiedlich 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. Ziel könnte deshalb sein, ein offenes Sprachmodell auf Basis deutscher Sprache zu entwickeln, wobei sowohl Österreich als auch die Schweiz an der Entwicklung teilhaben sollten, um das volle Potential ausschöpfen zu können.

*Ein nicht-englisches
KI-Sprachmodell*

Darüber hinaus ergab die Analyse der Berichte, die von Mitgliedsinstitutionen des Netzwerks der Europäischen Parlamentarischen Technikfolgenabschätzungseinrichtungen (EPTA) seit November 2023 fertiggestellt wurden, dass folgende Themen für das österreichische Parlament besonders interessant erscheinen:

*Aktuelle Studien
anderer
parlamentarischer
TA-Einrichtungen*

- Alternative Eiweißquellen für Lebens- und Futtermittel
- KI-Modellierung von Extremwetterereignissen
- Digitale Altersdiskriminierung
- Forensische Technologien
- Zukunft des Gartenbaus
- Privatsphäre und Generative KI

- Immersive Technologien
- Ausblick Materialwissenschaft
- Weltraumwetter
- Verbesserung des Recyclings
- Zukunft des Düngemiteleinsatzes
- Einsatz von KI in der Bildung
- Verkehrsressourcenplanung

Zu all diesen Themen liegen aktuelle Endberichte von TA-Einrichtungen aus Deutschland, Frankreich, Großbritannien, den USA, Katalonien, Norwegen, Japan, den Niederlanden und der Europäischen Union 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 potentiellen Anwendungsfelder von Zukunftstechnologien sind mit hohen Erwartungen und vielfältigen Versprechen verbunden. Während der Umsetzung zeigt sich aber oft, dass mit diesen Technologien auch Effekte einhergehen, die zunächst nicht augenscheinlich sind. Demgegenüber setzt die Foresight-Komponente auf die Gestaltbarkeit von Innovationen: Werden die Potenziale von Zukunftstechnologien frühzeitig in ihrer Bandbreite analysiert, eröffnen sich Gestaltungsspielräume für nachhaltige Innovationspfade.

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

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

*Identifikation
zentraler
Zukunftsthemen für die
österreichische Politik*

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

*Zwei Dimensionen
verantwortungsvoller
und
zukunftsorientierter
Technikentwicklung*

1.1 VORGANGSWEISE

Der Monitoring-Prozess wird in den folgenden Schritten durchgeführt:

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

Quellenauswertung

Themenselektion

1.2 RELEVANZKRITERIEN

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

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

Inhaltliche Relevanz

Österreichbezug

Parlamentsbezug

1.3 BASISQUELLEN FÜR DIESE BERICHTSVERSION

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

Sekundärauswertung

- A. *Auswahl wissenschaftlicher Fachzeitschriften*, insbesondere: Research Policy; Technological Forecasting and Social Change; Futures; foresight; Zeitschrift für Zukunftsforschung; proZukunft; European Journal of Futures Research; Futures Research Quarterly; World Futures Review; TATuP – Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis; Nature; Science; Scientific American; IEEE Spectrum.
- B. *Proceedings von Konferenzen einschlägiger wissenschaftlicher Netzwerke*, insbesondere: European Forum for Studies of Policies for Research and Innovation" (Eu-SPRI Forum); Future-Oriented Technology Analysis (FTA); European Association for the Study of Science and Technology (EASST); The Society for Social Studies of Science (4S); Netzwerk Technikfolgenabschätzung (NTA); European Parliamentary Technology Assessment (EPTA); European Academies Science Advisory Council (EASAC); International Network of Government Science Advice (INGSA); Schweizerische Vereinigung für Zukunftsforschung (swissfuture); European Technology Assessment Conference (ETAC) and globalTA series.
- C. *Zukunftstrends und Megatrends-Publikationen bekannter internationaler Akteure*, insbesondere: Meta-Council on Emerging Technologies (World Economic Forum); OECD Science, Technology and Innovation Outlook; MetaScan3 Emerging Technologies; Office for Science UK: Technology and Innovation Futures; EC-JRC Megatrends; Standardization Opportunities from Horizon Scanning der internat. Normungsinstitute.
- D. *TA- und Foresight-Datenbanken*, insbesondere: Projekt- und Publikationsdatenbank des EPTA-Netzwerks; Publikationsdatenbank des NTA openTA; die Open Repository Base on International Strategic Studies; Knowledge4policy-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:

Methoden

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 Text-mining-Plattform TIM Open Access³ der EU-Kommission eingesetzt.

Als spezifische Basisquellen für diese Berichtsversion dienten folgende Sekundärquellen:

*Für diesen Bericht
spezifisch
ausgewertete Quellen*

- LinkedIn: Big Ideas Technologie und Innovation 2024⁴
- Die 10 wichtigsten strategischen Technologietrends von Gartner für 2024⁵
- The GESDA 2023 Science Breakthrough Radar⁶
- 10 Breakthrough Technologies 2024⁷
- Resilience to Long-term Trends and Transitions to 2050⁸
 - acatech – Publikationen 2024⁹
 - World Economic Forum Reports 2024, inkl. Global Risks Report 2024¹⁰

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 de.linkedin.com/pulse/big-ideas-2024-im-kommenden-jahr-wichtig-wird-linkedin-news-dach-8izyc?trk=public_post_feed-article-content.

⁵ gartner.de/de/artikel/die-10-wichtigsten-strategischen-technologie-trends-von-gartner-fuer-2024.

⁶ radar.gesda.global/GESDA%202023%20Science%20Breakthrough%20Radar%2020231010.pdf.

⁷ technologyreview.com/2024/01/08/1085094/10-breakthrough-technologies-2024/.

⁸ gov.uk/government/publications/resilience-to-long-term-trends-and-transitions-to-2050.

⁹ acatech.de/publikation/.

¹⁰ weforum.org/publications/.

2 AKTUELLE SOZIO-TECHNISCHE ENTWICKLUNGEN

Die folgenden sechs sozio-technischen Entwicklungen wurden im Berichtszeitraum November 2023 bis Mai 2024 als besonders relevante und aktuelle Themen für das Parlament und für Österreich identifiziert. Die Auswahl zeigt ein breites Spektrum an Themen mit weitreichenden sozialen, ökonomischen, politischen und ökologischen Auswirkungen. In all diesen Bereichen hat Österreich Kompetenzen vorzuweisen, die aus Sicht der Forschungs-, Innovations- und Technologiepolitik wirtschaftliche Entwicklungspotenziale darstellen. Zugleich zeigen diese sozio-technischen Entwicklungen neuen parlamentarischen Handlungsbedarf als auch parlamentarische Gestaltungsspielräume – jeweils in einem breiteren gesamtgesellschaftlichen Kontext.

*Berichtszeitraum
November 2023
bis Mai 2024*

Themen Mai 2024

6 neue Themen

Resiliente Düngerversorgung

Emotionserkennung als Hoffungsgebiet für KI?

Sonnenstürme und Weltraumwetter

Biocomputer

Negativemissionstechnologien

Ein nicht-englisches KI-Sprachmodell

RESILIENTE DÜNGERVERSORGUNG



© 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. Die Produktion und Anwendung von Mineraldüngern ist 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 viehstarken Regionen 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

Der Einsatz von Mineraldüngern hat auch eine sozioökonomische Dimension. Denn Versorgungsengpässe 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, biodiversitäts- und gesundheitsfördernder Wertschöpfungsketten unabdingbar. Dazu bedarf es einer langfristigen Konzeption der Nährstoffpolitik und einer nationalen Nährstoffstrategie, die verschiedene politische Ziele, Technologien und Strategien von der Düngemittelproduktion über die Anwendung bis hin zum Nährstoffrecycling umfasst.

*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.

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 tiefen Lage (200 bis 1.000 m) 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 chloridarmer Kalidünger vermarktet werden, ist aber aufgrund des geringeren Kaliumgehalts kein vollständiger Ersatz für Kalidünger.

*Hoffnungsträger
Polyhalit als 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 gebundenes 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).

*Forschung
zur verbesserten
Pflanzenaufnahme von
Kalium und Phosphor*

Eine weitere Möglichkeit besteht darin, Phosphor aus Klärschlamm zu recyceln.⁶ 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 Klärschlammes wurden 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.

*Phosphorrecycling
aus Klärschlamm hat
großes Potenzial*

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

⁵ d-nb.info/964804751/34.

⁶ parlament.gv.at/dokument/fachinfos/zukunftsthemen/118_phosphorrecycling.pdf.

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 klimaneutral gestaltet werden. Dies zeigt die erste kommerzielle Anlage zur Herstellung von grünem Ammoniak in Puertollano (Spanien).⁷ 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 mit Hilfe von Licht, Wasser und Molybdän-Katalysatoren bei Raumtemperatur erzeugt wird, noch weit von der industriellen Reife entfernt (Durrani, 2024).

*Erforschung
alternativer
Verfahren zur
Stickstoffherzeugung*

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.⁸ 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.⁹ 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*.¹⁰ Es bestehen jedoch Wissenslücken über die Wirkung von Pflanzenkohle.¹¹

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

⁷ fertiheria.com/en/greenammonia/h2f-project/.

⁸ tab-beim-bundestag.de/projekte_digitalisierung-der-landwirtschaft.php.

⁹ landwissen.at/wp-content/uploads/2023/11/BML_Broschuere_Biologische_Landwirtschaft_231108_BF.pdf.

¹⁰ parlament.gv.at/dokument/XXV/AB/8575/imfname_538434.pdf.

¹¹ 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 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 sozio-ökonomischen 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

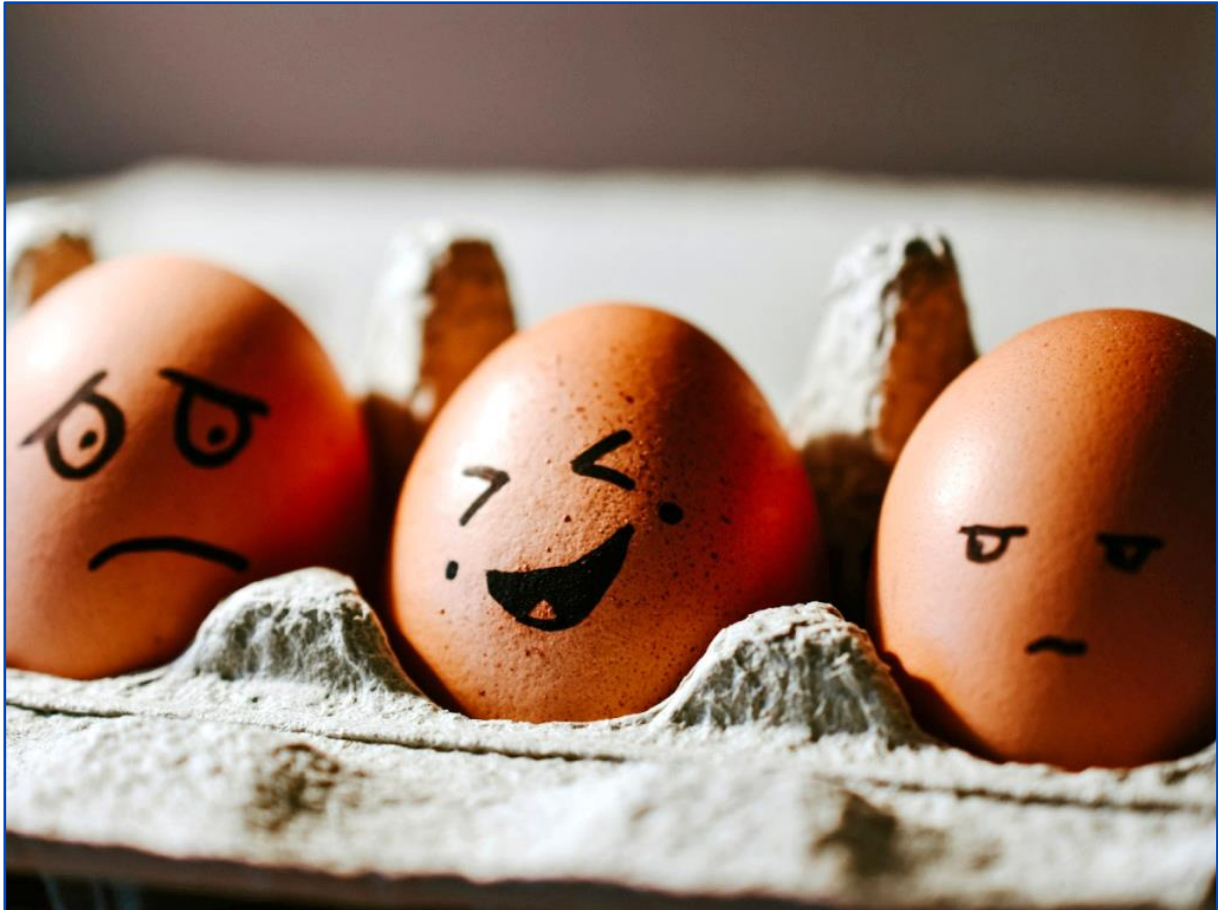
Um für Österreich geeignete Strategien und Maßnahmen zur Reduktion des Düngereinsatzes um 20 % (Farm-to-Fork-Strategie) und für ein effizientes und klimaneutrales Nährstoffmanagement zu entwickeln, bedarf es einer umfassenden Analyse des Forschungs- und Wissensstandes sowie der rechtlichen Rahmenbedingungen. 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 sozioökonomische 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 Phosphorrezyklate aus der Aufbereitung von Klärschlamm aus Sicht eines Düngemittelherstellers“.
- Daneshgar, Saba, Arianna Callegari, Andrea Capodaglio, und David Vaccari. 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, Ari, Petra Stankovics, Yahya Shafiyuddin Hilmi, Gergely Toth, Marzena Smol, und Zoltan Toth. 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 FÜR KI?



© 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 dahinter liegenden 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 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. Als Datenspuren werden hier Interaktionsmuster genutzt, um Profile von Nutzer:innen zu erstellen (Kosinski, Stillwell & Graepel 2013). Eine weitere Möglichkeit besteht in der Erfassung visueller Daten durch Systeme der Gesichtserkennung. Hier wird die Mimik eines Gesichts genutzt, um Gefühlszustände von Personen zu 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).

*Emotionserkennung:
neue Möglichkeiten
mit KI*

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 Systeme zur emotionalen Gesichtserkennung werden bei Grenzbehörden in den USA oder Großbritannien sowie Interpol seit einigen Jahren eingesetzt, um bei Einreisekontrollen verdächtige Personen zu identifizieren (Crawford et al. 2019). 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 Woebot⁴ oder Wysa⁵ basierend auf KI-Sprachmodellen angeboten. Die Anwendungen sollen den Zugang zu therapeutischen Angeboten vor dem Hintergrund knapper Therapieplätze er-

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

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

² bussgeldkatalog.org/muedigkeitserkennung.

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

⁴ woebothealth.com.

⁵ wysa.com.

leichtern und mittels strukturierter Übungen und Selbsthilfefinhalten kurzfristige Hilfe bei Depressionen oder Angststörungen bieten (Swartz 2023). In der Pflege wird ein Einsatz im Zusammenhang mit Pflege-Robotern diskutiert (Korn 2019). 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).

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). 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.⁶ 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 Europäischen Union jedoch sind Anwendungsgebiete, die mit dem Arbeitsplatz oder dem Bildungsbereich in Zusammenhang stehen, gemäß der neuen KI-Verordnung (AI Act) zukünftig verboten. Sie gelten als Hochrisiko-KI-Systeme, da ihr Einsatz bspw. in Bewerbungsgesprächen oder im schulischen Umfeld u. a. das Risiko der Diskriminierung birgt. Zudem könnten sie potentiell 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.

*Hochrisiko-
Anwendungen:
Arbeitswelt und
Bildungsbereich*

Für alle KI-Systeme zur Emotionserkennung gilt, dass neuronale Netze 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 beobachtbaren Variablen des Verhaltens und Aussehens von Personen ist jedoch problematisch und umstritten. Emotionen sind nicht unmittelbar empirisch überprüfbar, weshalb ihr Ersatz durch messbare Stellvertretermerkmale (proxy features) nicht überprüft und bewertet werden kann. Dadurch steht die Verlässlichkeit der Modelle grundsätzlich in Frage. Zum einen müssen Trainingsdaten oftmals von Menschen mit bestimmten Emotionen klassifiziert werden, um eine KI zu trainieren. Dazu werden meist Klassifikati-

Herausforderungen:

- *Zuverlässigkeit der Modelle*
- *Bias*
- *Diskriminierung*
- *Datenschutz*

⁶ algorithmwatch.org/de/sprachanalyse-hr/.

Ansätze 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 Gefährdet: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 Überwachten.

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 beeinflussen (Kramer et al. 2014) und damit auch politische Mobilisierung lenken kann.

*Emotionalisierung
politischer
Öffentlichkeiten*

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.⁷ 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 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 auch Grauzonen – wie etwa der zwar verbotene Einsatz im Bereich des Arbeitsplatzes, aber die erlaubte Anwendung im Personalmanagement anzeigt. 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 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.

⁷ Siehe Version vom 13. März 2024, [europarl.europa.eu/RegistreWeb/search/simpleSearchHome.htm?references=P9_TA\(2024\)0138&language=de](https://europarl.europa.eu/RegistreWeb/search/simpleSearchHome.htm?references=P9_TA(2024)0138&language=de).

ZITIERTE LITERATUR

- Büching, C. et al. (2019). Learning Analytics an Hochschulen. In: Wittpahl, V. (Hg.): Künstliche Intelligenz. Berlin/Heidelberg, 142–160, doi.org/10.1007/978-3-662-58042-4_9.
- Crawford, K. et al. (2019). AI Now 2019 Report, New York, ainowinstitute.org/publication/ai-now-2019-report-2 (22.04.2022).
- 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.
- Khare, S. K. et al. (2024). Emotion recognition and artificial intelligence: Asystematic review (2014–2023) and research recommendations. Information Fusion 102, 102019. doi.org/10.1016/j.inffus.2023.102019.
- Korn, O. (2019): Soziale Roboter – Einführung und Potenziale für Pflege und Gesundheit. Wirtschaftsinformatik & Management 11, 126–135, doi.org/10.1365/s35764-019-00187-5.
- Kosinski, M. et al. (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.
- Meyer, R. (2019). Operative Porträts. Eine Bildgeschichte der der Identifizierbarkeit von Lavater bis Facebook. Konstanz University Press: Konstanz.
- Meyer, R. (2021). Gesichtserkennung. Digitale Bildkulturen. Verlag Klaus Wagenbach: Berlin.
- 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.
- Tursunbayeva, A. et al. (2018). People analytics—A scoping review of conceptual boundaries and value propositions. International Journal of Information Management 43, 224–247. doi.org/10.1016/j.ijinfomgt.2018.08.002.
- 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.
- Zheng Y. et al. (2016). Emotions in context-aware recommender systems. In: Tkalcic, M. et al. (Hg.): Emotions and Personality in Personalized Services. Springer International Publishing, 311–326, dx.doi.org/10.1007/978-3-319-31413-6_15.

SONNENSTÜRME UND WELTRAUMWETTER



© 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 Mitleidenenschaft 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 Sonnenfleckenzyklus 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

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

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).

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

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/h 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.

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.

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 Intensität des Teilchenstroms verformt sich das Erdmagnetfeld und wird schwächer. Ab einer bestimmten Stärke wird das Erdmagnetfeld verformt und abgeschwächt, weiter vordringende Protonen erhöhen die Elektronendichte in der Atmosphäre, was zu steigender Adsorption 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.

... und was machen sie mit unserem Erdmagnetfeld?

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 1859.⁵ Es wird berichtet, dass die Polarlichter damals sogar in Rom sichtbar waren. Die im 19. Jahrhundert großräumig vorhandene Infrastruktur war das Telegraphennetz. Die Abhängigkeit von Stromnetzen oder anderen Kommunikationsnetzen bestand noch nicht. Der Strom der geladenen Teilchen erzeugte in den Telegraphenleitungen durch Induktion hohe Gleichstrom-Spannungen. Da die Leitungen für derartige Ereignisse nicht abgesichert waren, kam es in vielen Telegraphenstationen zu Stromschlägen, Überspannungen, Funkenschlag und Bränden, durchgeschmorten Leitungen und insgesamt zu erheblichen Schäden an der Infrastruktur. Eine Zeit 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.

Massive Beeinträchtigungen in der Vergangenheit

⁵ 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-Sturm), 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 rühren, dass multiple Schockwellen nacheinander die Erde treffen. Die späteren finden ein schon stark verformtes Magnetfeld vor und können daher viel weiter eindringen.

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 Behördenfunk wären in Mitleidenschaft gezogen.⁶ 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 Einfallswinkel 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).

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 Internetausfall 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. sodass ein Leben, wie wir es gewohnt sind, über zumindest Monate nicht vorstellbar wäre.⁷

⁶ de.wikipedia.org/wiki/Sonneneruption.

⁷ Details zu den Folgen eines großflächigen Internetausfalls in Österreich finden sich bei Schachenhofer et al 2022.

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 Forschungs-
anstrengungen 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 hinweist, dass das Risiko auch in Österreich womöglich deutlich unterschätzt wurde bisher. 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.

*Risiko bisher deutlich
unterschätzt*

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

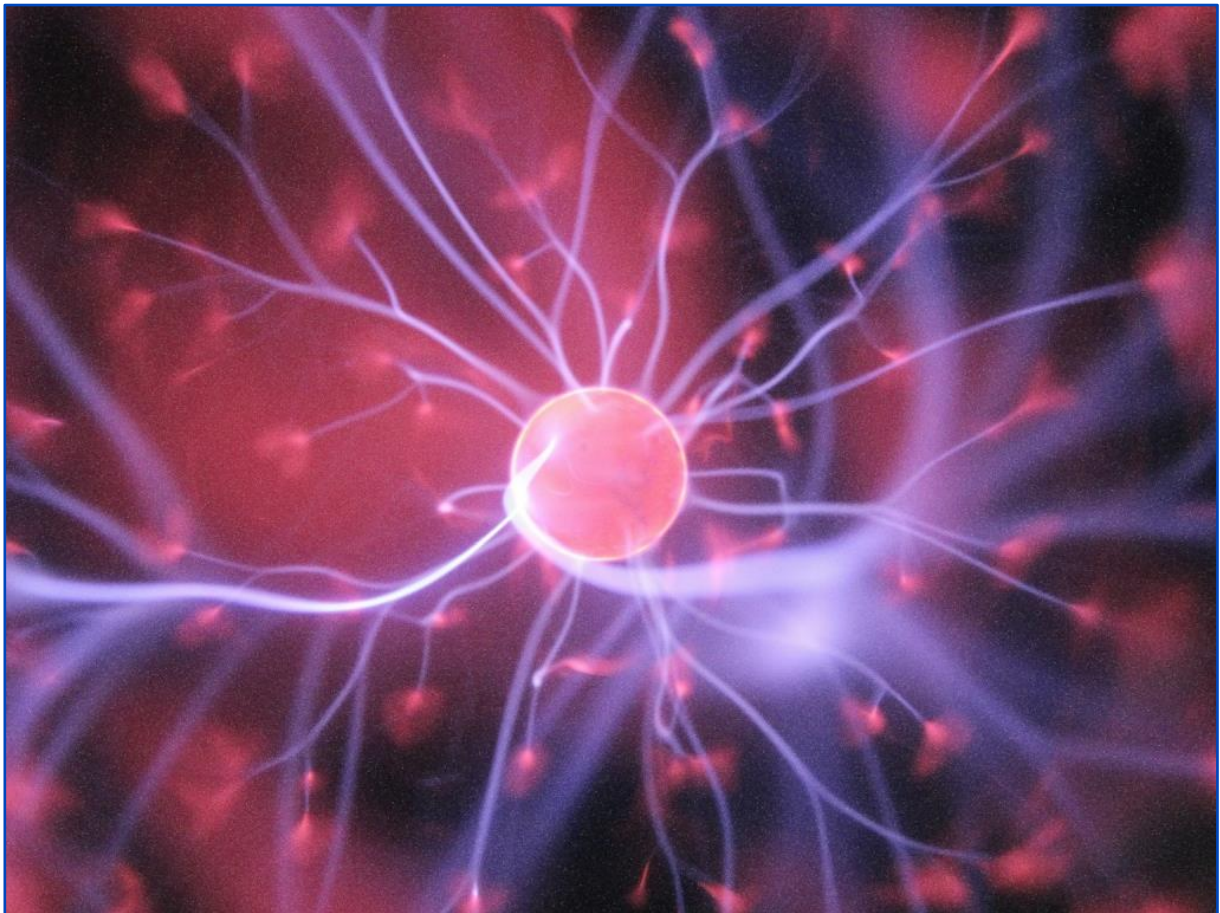
In Vorbereitung einer nationalen Strategie zum Thema „Weltraumwetterphänomene“ sollte eine umfassende Bestandsaufnahme über Forschungsstand und -bedarf erfolgen. Auf Basis einer solchen Studie sollten in der Folge in Zusammenarbeit mit dem Staatlichen Krisen- und Katastrophenschutzmanagement (SKKM) und 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](https://doi.org/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.oew.ac.at/ita/ita-projektberichte/2017-01.pdf.

BIOCOMPUTER



© 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 Rechensysteme 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 von 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 scheint, auch wenn es immer noch 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 starke Fortschritte auf verschiedenen Gebieten 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 auch für viele andere Berechnungsprobleme attraktiv, wie etwa Komposition, Graphenalgorithmen, beschränkte Optimierung und Signalverarbeitung. Insgesamt wird neuromorphes Computing als Voraussetzung für die nächste Generation der künstlichen Intelligenz (KI) angesehen, da herkömmliche Computersysteme das Potenzial von KI-Anwendungen aufgrund ihres hohen Energieverbrauchs und ihrer begrenzten Effizienz bei der Informationsverarbeitung beschränken (Ajayan et al., 2022).

*Neuromorphe Systeme,
organoide Intelligenz
und Zellen als
Computer*

*Neuromorphe
Computer:
Rechnerarchitektur
orientiert am Gehirn*

Während mit neuromorphen Computer versucht wird, biologische Komponenten und Funktionen nachzuahmen, wird mit einem anderen Ansatz der Weg verfolgt, 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, welche als Konglomerat bestimmte Hirnfunktionen zeigen. Diese werden mit elektronischen Bauteilen kombiniert und können schon jetzt einfache Rechenoperationen ausführen. 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, was Senden und Empfangen von Informationen ermöglicht. Mit dieser Anordnung wurden bereits Erfolge bei Spracherkennung und komplexeren, nicht-linearen 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. 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).

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

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 *synthetischer Biologie* (z. B. CRISPR-Cas9) können diese Abläufe so verändert werden, dass eine Programmierung von Informationsverarbeitung in lebender Materie möglich wird (Goñi-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 Paradig-

Zellen als Computer

*Genetische
Schaltkreise und
Bakterienkolonien als
neuronale Netzwerke*

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

ma hingegen rechnet mit einer kontinuierlichen Menge von Zahlen und wird als Alternative für Aufgaben vorgeschlagen, die keine Entscheidungsfindung erfordern (Rizik et al., 2022).

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 von künstlichen neuronalen Netzen mit E.coli-Zellen möglich, was als neuromorphes Computing (s. o.) mit Zellverbänden angesehen wird (Rizik et al., 2022).

RELEVANZ DES THEMAS FÜR DAS PARLAMENT UND FÜR ÖSTERREICH

Anwendungen von Biocomputern sind bei unterschiedlichen Herausforderungen wie Umweltsanierung, Arzneimittelforschung, Herstellung neuartiger Materialien und medizinische Diagnose denkbar. Dafür sind jedoch noch erhebliche Verbesserungen bei der Manipulation biologischer Prozesse, Verbesserung von Schnittstellen, sowie bei Verständnis und Messung von Zellzuständen erforderlich.² Hindernisse sind u. a. begrenzte zelluläre Ressourcen, ein hohes Maß an zufälligen Schwankungen bei den Zellreaktionen und unerwünschte Wechselwirkungen zwischen synthetischen Teilen und Wirtszellen (Rizik et al., 2022). Biocomputer haben das Potenzial für große Rechenleistung bei minimalem Ressourceneinsatz. Hinsichtlich des riesigen und derzeit steigenden Energieverbrauchs der herkömmlichen IT-Infrastruktur und -nutzung 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 erwartet². Da die Erforschung von Biocomputern noch relativ neu ist, kann hier vorausschauend eine innovative Forschungs- und Entwicklungsinfrastruktur aufgebaut und parallel an Standardisierung gearbeitet werden, um Systemintegration zu vereinfachen.

*Hoher Bedarf an
ressourcenarmen
Computersystemen*

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

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 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](https://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, [sciencedirect.com/science/article/pii/S0026269222002634](https://www.sciencedirect.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.
- 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.
- 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/10.1002/aelm.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



© CC0 (Wander Fleur/unplash)

ZUSAMMENFASSUNG

Auch wenn Maßnahmen zur Treibhausgasreduzierung Priorität haben, werden ergänzende Maßnahmen zur CO₂-Entnahme (Negativemissionstechnologien, NET) wahrscheinlich verstärkt notwendig sein, um die Erderwärmung auf ein unter 2°C zu begrenzen. Ihr Einsatz muss aber streng an Nachhaltigkeitsprinzipien ausgerichtet werden. Auch wenn manche Ansätze das Potenzial haben, große Mengen Kohlenstoff längerfristig zu binden, sind bei deren Umsetzung die detaillierte 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- und Speicherungs-/Nutzungsverfahren im Fokus. Die meisten NET sind flächenintensiv, was die Skalierung erschwert, andere benötigen große Mengen an Energie und Ressourcen. Weitere Umweltrisiken, wie 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 Machbarkeit und Nachhaltigkeit auf (IPCC, 2023). Insbesondere Nicht-CO₂-Emissionen aus der Landwirtschaft (Methan, Stickstoffdioxid, fluorierte 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).

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 speichern CO₂ in der Vegetation oder im Boden; dazu zählen Aufforstung, Klimafarming (Carbon Farming) oder 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 aber sehr energie- und ressourcenintensiv. Andere NET, wie etwa Ozeandüngung und Ozeanalkalisierung, sind wegen ihrer hochriskanten Umweltauswirkungen stark umstritten und auch für Österreich wenig relevant.

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 (Wärmepumpen), 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-neutralem 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

Entscheidendes Jahrzehnt für die Begrenzung der Erderwärmung

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

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

und Verarbeitung von CO₂ sind in der chemischen Industrie erprobt, um wertvolle 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 bei der Synthese von Harnstoff, welcher 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).

*Derzeit marginaler
Beitrag zum
Klimaschutz*

Bei Verfahren zur *Bioenergieproduktion mit Kohlendioxidabscheidung und -speicherung und/oder -nutzung* (BECCS, BECCU) wird CO₂ von Pflanzen über Photosynthese 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 und die Konkurrenz mit anderen Nutzungsarten von Biomasse. Für eine negative Emissionsbilanz ist auch hier entscheidend, welche Art der 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).

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

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

*Direct Air CCUS –
technischer Fortschritt,
alte Risiken*

¹ [weforum.org/publications/carbon-dioxide-removal-best-practice-guidelines/](https://www.weforum.org/publications/carbon-dioxide-removal-best-practice-guidelines/).

Beschleunigte Verwitterung (enhanced rock weathering) beruht ebenso wie DACCS auf chemischer CO₂-Bindung. Zermahlene Silikat- und/oder Karbonatminerale werden dabei auf Böden ausgebracht und binden aufgrund der großen Oberfläche des Gesteinsmehls im natürlichen Verwitterungsprozess CO₂. Dieser Prozess ist vor allem für feucht-warme Agrarsysteme relevant, weshalb das Potenzial für Österreich als sehr gering eingeschätzt wird; nur 3,6 % des globalen Potenzials entfallen auf die EU. Darüber hinaus werden häufig Energiekosten und die damit verbundenen Treibhausgas-Emissionen aus Extraktion, Mahlen, Transport und Bodenausbringung bei Abschätzungen zum Absenkungspotenzial der beschleunigten Verwitterung nicht berücksichtigt (Kraxner, 2024).

Beschleunigte Verwitterung – wenig Möglichkeiten in Österreich

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*). Auch ist der Flächenbedarf hoch und es kommt zur Konkurrenz mit anderen Nutzungsformen, etwa der Landwirtschaft. Durch Aufforstung wären aber eine verbesserte Bodenqualität und Wasserrückhaltefähigkeit zu erwarten. In Bezug auf Biodiversität könnten Vor- und Nachteile eintreten, je nach gepflanzten Baumarten und vorheriger Vegetation. Auch ist der Albedo-Effekt nicht zu vernachlässigen, also wieviel Sonnenlicht Waldflächen reflektieren; sie sind im Vergleich zu anderen Landnutzungsformen oder Schnee- und Eisflächen dunkler, reflektieren also weniger Sonnenlicht, was zur Erwärmung beitragen kann (Ragwitz M., 2023). Insgesamt wird davon ausgegangen, dass eine mittelfristige Aufforstung in Österreich dem Erreichen der definierten Klimaziele bis 2050 dienlich ist und Zeit zur Entwicklung anderer Technologien zur Emissionsreduktion verschafft (Kraxner, 2024).

Aufforstung: Wald als Kohlenstoffsенke

Unter bestimmten Voraussetzungen kann die Erzeugung von Pflanzenkohle und deren Einbringung in Böden große Mengen 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 Kohlenstoffsенke genutzt werden. Die Technologie ist ausgereift (TRL, technology readiness level 8-9) und wird vom Weltklimarat als aussichtsreiche Maßnahme eingeschätzt (Soja, 2022). Es eignen sich Reststoffe wie Grünschnitt, Trester oder Getreidespelzen, welche ansonsten der Kompostierung oder Fermentierung zugeführt werden (bei der Kompostierung entweicht bis zu 60 % des enthaltenen Kohlenstoffs als CO₂ oder Methan in die Atmosphäre). Global könnten mit Pflanzenkohle jährlich bis zu 3 Gigatonnen CO₂-Äquivalente aus der Atmosphäre entfernt werden (Lehmann et al., 2021), was knapp 10 % der weltweiten Emissionen entspricht. Daneben gibt es weitere positive Effekte: Die Bodenqualität wird in Bezug auf Struktur, Drainagefähigkeit und Anteil der organischen Substanz verbessert; in der Landwirtschaft sind Ertragssteigerungen durch die erhöhte Verfügbarkeit von Nährstoffen und Wasser möglich; weiters ist Bodensanierung möglich, da Biokohle Schadstoffe absorbiert und das Auswaschen von Phosphor und Nitrat verringert. Die Anreicherung von landwirtschaftlichen Böden mit Pflanzenkohle ist eine sehr alte Technik, die bereits seit Jahrtausenden in vielen Regionen der Welt (Ama-

Pflanzenkohle, Biokohle, Biochar: pyrolytische Kohlenstoffabscheidung und Speicherung

zonasbecken, aber auch in Europa) eingesetzt wird. 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 schon länger, in der EU erst seit 2022 als Zusatzstoff in Düngemitteln und Kompost zugelassen. Mittlerweile haben sich österreichweit zehn EBC-zertifizierte Betriebe entwickelt⁴, 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, wie zum Beispiel bei Agro-Forst-Systemen. Diese sind zwar auch flächenabhängig, aber Nahrungs- und Futtermittelproduktion ist weiter 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.

*Kohlenstoffbindung
im Boden*

Da trockengelegte Moore durch ihre Verrottung sehr viele Treibhausgase (bis zu 5 % der menschlichen Treibhausgase) freisetzen, wird im Zusammenhang mit CO₂-Speicherung auch oft 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).

*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 (wie z. B. Zementwerken) und dessen Rückführung in industrielle Prozesse gewinnt auch für Unternehmen an Attraktivität. Ungeachtet dessen stellt sich die Frage, wie groß das Potential von NET vor dem Hintergrund von Nachhaltigkeitszielen eigentlich tatsächlich ist – und welchen Nebeneffekte NET-Einsatz auf den öffentlichen Diskurs um Emissionsreduktionen hätte und wie diese klug gemanagt werden können. Mehr Klarheit im Umgang mit natürlichen und technischen Treibhausgassenken, schwer vermeidbaren Restemissi-

*Umstritten:
techno-ökonomische
Leistungsfähigkeit
und Wirkung auf
Reduktionsstrategien*

² european-biochar.org/de/.

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

⁴ european-biochar.org/de/companies.

⁵ burgenland.orf.at/stories/3180987/.

onen, sowie CCUS soll die österreichische Carbon-Management-Strategie bringen, welche Mitte 2024 vorgestellt werden soll.⁶

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 (hoffnunggetriebenen) Diskurses, insbesondere im Bereich neuer CCUS-Technologien, wichtig um Mythen und Fakten bezüglich der Technologien zu unterscheiden.

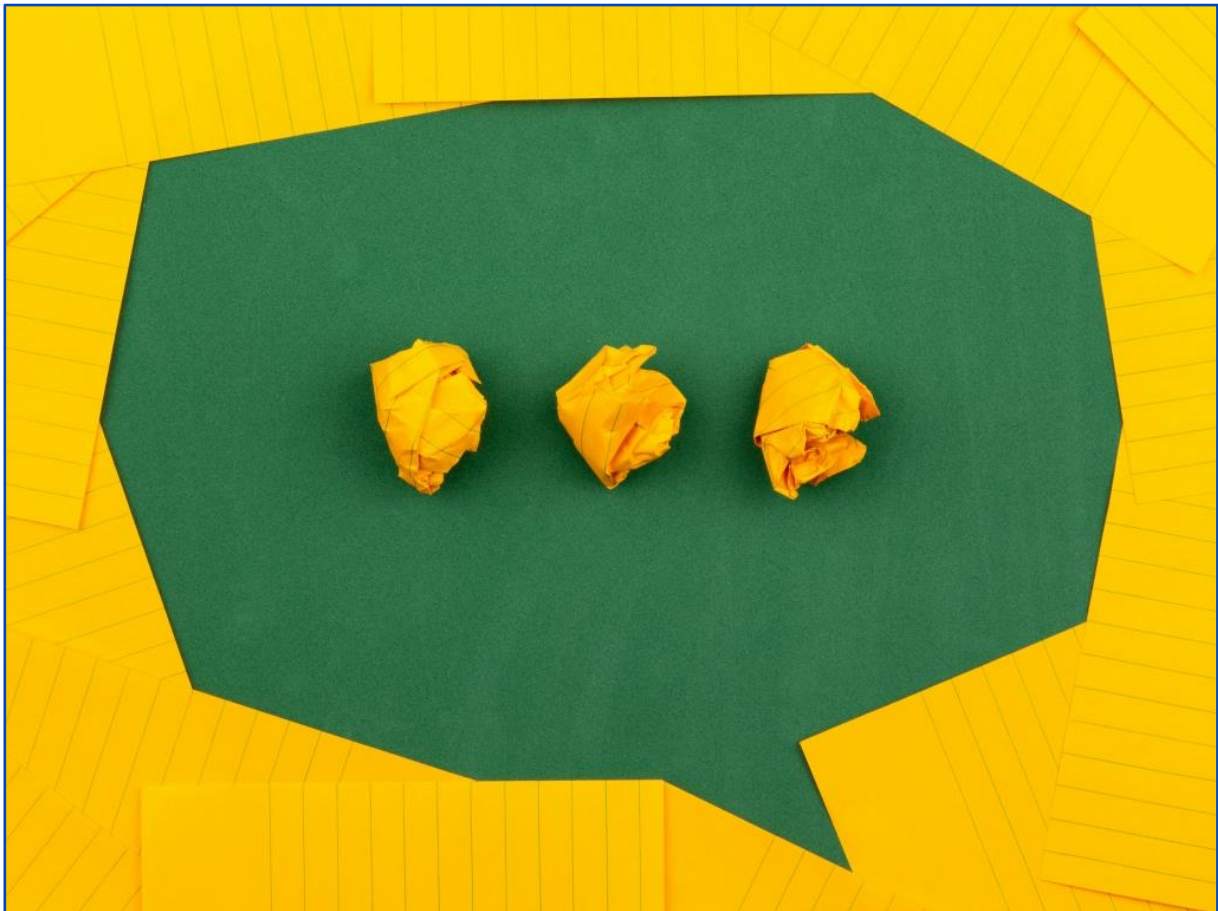
*Trotz neuer
Technologien:
keine einfachen
Lösungen am Horizont*

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](https://www.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.

⁶ bmf.gv.at/themen/klimapolitik/carbon_management.html.

EIN NICHT-ENGLISCHES KI-SPRACHMODELL



© CC0 (Volodymyr Hryshchenko/unsplash)

ZUSAMMENFASSUNG

Mit der Veröffentlichung von ChatGPT und anderen Sprachmodellen (Large Language Modells – LLMs) entstanden ein Hype und große Hoffnungen auf positive 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 Sprachenlogiken im Englischen und z. B. im Deutschen unterschiedlich 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. Ziel könnte deshalb sein, ein offenes Sprachmodell auf Basis deutscher Sprache zu entwickeln, wobei sowohl Österreich als auch die Schweiz an der Entwicklung teilhaben sollten, um das volle Potential ausschöpfen zu können.

*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, Microsoft Bing, Google Bard, BLOOM etc.) berechtigt ist und diese tatsächlich disruptiven Charakter aufweisen und zu entsprechenden Verwerfungen in Wirtschaft und Gesellschaft führen wird, muss sich erst zeigen.

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 unter europäischen Gesichtspunkten auch anderen, als Problem erkannte, Eigenheiten bestehender Modelle sein, wie z. B. die Fragen von Datenschutz, Urheberrechtsverletzungen etc. entgegenwirken.

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.¹ 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 $\approx$ 1,3 Token, im Deutschen: 1 Wort $\approx$ 1,8 Token, im Spanischen: 1 Wort $\approx$ 2 Token und im Französischen: 1 Wort $\approx$ 2 Token.² Da alle LLMs ein (technisches) Token-Limit³ 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. Darüber hinaus zeigen Ali et al. (2023), dass mehrsprachige Tokenizer, die auf den fünf häufigsten europäischen Spra-

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

¹ online-marketing-leipzig.de/das-tokenlimit-ein-einstieg-fuer-anfaenger-mit-tipps-zum-prompting/.

² deinkompass.de/blog/openai-gpt-token-guide.

³ Z. B. GPT 32.765, Llama2 2.048, Claude_2 100.000 und PaLM 8.000 siehe empolis.com/blog/entfesselte-llms-trotz-token-beschaenkung/.

chen (Dt., Engl., Span., Frz., It.) trainiert werden, eine Vergrößerung des Vokabulars um den Faktor Drei im Vergleich zum Englischen erfordern. Wenn englischsprachige Tokenizer für das Training mehrsprachiger LLMs eingesetzt werden, konnte gezeigt werden, dass dies zu einer starken Leistungsver schlechterung und zusätzlichen Trainingskosten von bis zu 68 % führt. Auch in einem Research Paper von Meta (Touvron et al. 2023) wurde festgestellt, dass ein „training corpus with a majority in English means that the model may not be suitable for use in other languages.“ Und „(m)ost data is in English, meaning that Llama 2 will perform best for English-language use cases.“ Die Pre-Trainingsdaten sind zu nahezu 90 % auf Englisch. Andere Sprachen wie Deutsch, Französisch, Chinesisch, Spanisch, Niederländisch, Italienisch, Japanisch, Polnisch, Portugiesisch und andere bekannte machen zusammen weniger als 2 % aus.⁴

Neben den technischen Auswirkungen sind es vor allem kulturelle Eigenheiten, die sich in den Trainingsdaten und damit den Antworten der Modelle abbilden (see Ramesh et al. 2024). 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. Die Trainingsdaten sind oft nicht offengelegt. 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. Darüber hinaus ist bei vielen Daten auch nicht klar, ob Urheberrechte verletzt wurden.

*Kulturelle, ethische
und rechtliche
Probleme*

Dazu kommen noch wirtschaftliche Überlegungen, denn es ist nicht immer geklärt, ob z. B. Geschäftsgeheimnisse durch die Nutzung großer Sprachmodelle offenbart werden könnten. Nichtsdestotrotz 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.

*Geopolitik und
digitale Souveränität*

⁴ slator.com/meta-warns-large-language-model-may-not-be-suitable-non-english-use/.

Ziel ist deshalb, ein offenes Sprachmodell auf Basis europäischer, nicht-englischer oder deutscher bzw. österreichischer Sprache zu entwickeln⁵ und so sicherzustellen, dass sowohl sprachliche als auch kulturelle und rechtliche Eigenheiten des deutschen und europäischen Sprachraumes Berücksichtigung finden. Wichtig erscheint auch, dass neben Deutschland sowohl Österreich als auch die Schweiz an der Entwicklung mitwirken (bei Interesse auch Liechtenstein und Luxemburg), um alle Varietäten der deutschen Sprache abzubilden, und nationale Unterschiede (z. B. bei rechtlichen Anforderungen) gut abdecken zu können.

Ziel: ein offenes Sprachmodell auf Basis deutscher Sprache

Die Entwicklung eines deutschen Sprachmodells sollte in eine europäische Strategie eingebettet sein, denn eine starke europäische KI-Industrie ist nicht nur aus rein ökonomischen Gründen bedeutsam. Hirschbrich (2024) weist darauf hin, dass ein starker KI-Wettbewerb auf Augenhöhe unterschiedlichster Anbieter aus möglichst vielen demokratischen Staaten auch aus geopolitischen Gründen anzustreben sei. Eine europäische KI sei Trägerin europäischer Werte, unserer rechtlichen sowie ethischen Standards.

Derzeit bestehen bereits Projekte, allgemeine deutsche Sprachmodelle (Aleph Alpha, Fraunhofer mit OpenGPT-X etc.)⁶ als auch spezifische Modelle für den klinischen Bereich (Idrissi-Yaghir et al. 2024) zu bauen. Diese berücksichtigen auch die häufigsten europäischen Sprachen, was für die o.a. europäische Positionierung am Weltmarkt wichtig ist. Eine weitere Initiative ist Laion,⁷ die das freie Llama-Modell für Deutsch angepasst hat, das vor allem die englischsprachige Dominanz brechen soll (Grüner 2023). Vorteile eines 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).

Erste Initiativen

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, sodass auch genuin österreichische Inhalte in die Trainingsdaten integriert wer-

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

⁵ 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.

⁶ youtube.com/watch?v=IoBSYIOarwM, aleph-alpha.com/de/.

⁷ laion.ai/blog/leo-lm/.

den. Die österreichische KI-Landschaft⁸ kann dazu sicher wichtige Beiträge liefern. Nicht zuletzt sei auf die Einrichtung des neuen Exzellenz-Clusters zu Bilaterale KI verwiesen.⁹

VORSCHLAG WEITERES VORGEHEN

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

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. In einer Kosten-/Nutzenabwägung wäre auf Basis der Ergebnisse zu entscheiden, inwieweit es für Österreich vorteilhaft wäre, sich an entsprechenden Aktivitäten in Europa, insbesondere in Deutschland, maßgeblich zu beteiligen.

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

ZITIERTE LITERATUR

- Ali, M., Fromm, M., Thellmann, K. und 18 Co-Authors, 2023, *Tokenizer Choice For LLM Training: Negligible or Crucial?*, arxiv.org/pdf/2310.08754.pdf.
- Bomke, L., 2024, Intel, Allianz und Unilever setzen auf Silo AI, *Handelsblatt*, Wochenende 5./6./7. April 2024,.
- Grüner, S., 2023, Riesiges Sprachmodell für Deutsch trainiert, *golem.de*, golem.de/news/laion-riesiges-sprachmodell-fuer-deutsch-trainiert-2309-178081.html.
- Hirschbrich, M., 2024, Es braucht einen KI-Wettbewerb auf Augenhöhe, *Der Standard*, 26.3.24, derstandard.at/story/3000000212698/warum-es-einen-ki-wettbewerb-auf-augenhoehe-braucht.
- Idrissi-Yaghir, A., et al., 2024, *Comprehensive Study on German Language Models for Clinical and Biomedical Text Understanding*; [Aufgerufen am: 2024-04-18 2024], arxiv.org/pdf/2404.05694.pdf.
- 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.
- Meffert, K., 2023, Künstliche Intelligenz: Deutsche Texte in KI-Sprachmodellen, *Dr. DSGVO Blog*, dr-dsgvo.de/kuenstliche-intelligenz-deutsche-texte-in-ki-sprachmodellen.

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.

- 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*; 2024], arxiv.org/pdf/2302.12578.pdf.
- Touvron, H., Martin, L. und Kevin Stone et al., 2023, Llama 2: Open Foundation and Fine-Tuned Chat Models, Meta, ai.meta.com/research/publications/llama-2-open-foundation-and-fine-tuned-chat-models/.

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 25 Mitglieder, darunter sehr viele europäische Länder, aber auch aus den USA, Lateinamerika und 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 11/2023 bis 04/2024 ergab insgesamt 50 Einträge. Diese Dokumente wurden in der Folge nach den im Abschnitt 1.2 beschriebenen Relevanzkriterien ausgewertet, wobei insbesondere die Österreichrelevanz eine Rolle spielte.

*Auswertung der
EPTA-Datenbank
ergab für den
Berichtszeitraum
insgesamt 50 Studien*

Folgende Themen wurden jüngst international behandelt:

*Jüngst behandelte
Themen im Überblick*

- *Informationstechnologien:* Immersive Technologien; Kritische kommunale Infrastrukturen; Digitale Zwillinge; Post-Quantum-Welt; Soziale Umsetzung von IT; Cybersicherheit; Online-Werbung; Digitale Altersdiskriminierung
- *Künstliche Intelligenz:* Forensik; Generative KI; Verantwortlicher Umgang mit KI; KI-Modellierung von Naturkatastrophen; KI-Bewusstsein; Politikoptionen; KI und Genanalyse
- *Demokratie/Inneres:* Teilnahme an Wahlen
- *Energie:* Energiespeicherung im großen Maßstab; Nuklearenergie; Energieunabhängigkeit; Strategische Autonomie in der Kernenergie; Fusionsenergie; Demand Side Response; Gerechtigkeit in der Energiewende
- *Gesundheit/Medizin:* Pränatale Nahrungsergänzung; Zugang zu medizinischen Leistungen; Ursprünge von Pandemien; KI und Genanalyse; Embryo-Modelle aus menschlichen Stammzellen
- *Wirtschaft:* Alternative Proteinquellen; Materialwissenschaften; Online-Werbung; Zukunft des Gartenbaus
- *Umwelt/Klima:* Recycling; CO₂-Steuer; Weltraumwetter; Mikro-Wasser-
verunreinigungen; Erwärmung der Ozeane; Wasserknappheit; Optionen für Net Zero; CO₂-Kompensationen; Klimabildung; Dünger der Zukunft; Restaurierung von Frischwasserhabitaten; Zukunft des Gartenbaus; Wildfeuer; Verkehrsressourcenplanung
- *Sonstiges:* Akademische Freiheit; Komplexe Systeme; Generationenwechsel; Weltraumpolitik

¹ eptanetwork.org.

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

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:³

Thema	Titel der Studie	Land; Institution	Jahr
Proteinquellen	Alternative protein sources for food and feed [Alternative Eiweißquellen für Lebens- und Futtermittel]	EU; STOA	04/2024
KI-Modellierung von Extremwetterereignissen	Artificial Intelligence in Natural Hazard Modeling: Severe Storms, Hurricanes, Floods, and Wildfires [KI bei der Modellierung von Starkstürmen, Fluten und Waldbränden]	USA; STAA	12/2023
Digitale Altersdiskriminierung	Digital inequality and the elderly: an age-wise digital divide [Digitale Ungleichheit und die Ältere Bevölkerung: digitale Altersdiskriminierung]	Spanien; CAPCIT	2023
Forensische Technologie	Forensic Technology: Algorithms Offer Benefits for Criminal Investigations, but a Range of Factors Can Affect Outcomes [Forensische Technologie: Algorithmen bieten Vorteile für strafrechtliche Ermittlungen, aber eine Reihe von Faktoren kann die Ergebnisse beeinflussen]	USA; STAA	01/2024
Gartenbau	Future of Horticulture [Zukunft des Gartenbaus]	UK; POST	10/2023
Generative KI	Generative AI brings new data privacy challenges [Neue Herausforderungen bei der Privatsphäre durch Generative KI]	Norwegen; NBT	02/2024
Immersive Technologien	Immersive Technologies [Immersive Technologien]	Niederlande; Rathenau	11/2023
Materialwissenschaft	Materials Science: The State of the Art and Future Options [Materialwissenschaft: Der Status Quo und zukünftige Optionen]	Japan; RLRB	03/2024
Weltraumwetter	Space Weather [Weltraumwetter]	Frankreich; OPECST	11/2023
Recycling	Strategien und Instrumente zur Verbesserung des Rezyklateinsatzes. Mit Fallstudien zu Kunststoffverpackungen, Elektrogeräten sowie Baustoffen	Deutschland; TAB	03/2024
Düngemiteleininsatz	The future of fertiliser use [Zukunft des Düngemiteleininsatzes]	UK; POST	01/2024
KI in der Bildung	Use of artificial intelligence in education delivery and assessment [Einsatz von KI bei der Vermittlung und Bewertung von Bildung]	UK; POST	01/2024
Verkehrsressourcenplanung	What if the problem with cars was not their method of propulsion? [Was wäre, wenn das Problem mit den Autos nicht der Antrieb ist?]	EU; STOA	10/2023

³ 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.



WWW.OEAW.AC.AT