



## Transformationsforschung zu Anwendungen der Künstlichen Intelligenz erfordert einen Fokus auf emergente Eigenschaften

Broder Breckling <sup>(1)</sup>

(1) Universität Vechta, Fakultät II, Driverstraße 22, 49377 Vechta, broder.breckling@uni-vechta.de

### Abstract

Die Dynamik transformativer Prozesse wird gestaltet durch das Zusammenwirken verschiedener sozialer, technischer und ökologischer Komponenten. Gesellschaftliche Veränderungen entstehen aus Wechselwirkungen sozialen Austauschs mit neuen technischen Optionen und der natürlichen und der menschlich gestalteten Umwelt wie sie im Forschungsprogramm der Sozialen Ökologie beschrieben werden. Um Ziele der Nachhaltigkeit zu erreichen, wirken interessengeleitete Diskurse, technische Optionen, Umweltveränderungen und deren Rückwirkungen auf die Gesellschaft zusammen. Eine der neueren Komponenten, die zunehmend mehr Bedeutung erlangen, sind Anwendungen digitaler Technologien, insbesondere aus dem Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI). Um deren Bedeutung in anwendungspraktischer wie in risikoaverser Hinsicht zu bewerten, werden klassischerweise Technologiefolgen-Abschätzungen (TA) durchgeführt. In dem Beitrag wird erläutert, in welcher Weise dabei über die unmittelbar evidenten Wirkungsketten hinaus emergente Phänomene mit erschlossen werden müssen. Dazu werden Themen weiterreichender Implikationen angesprochen. Die Implikationsanalyse erweitert TA insofern, als dass sie zusätzlich zu Wirkungen und Nebenwirkungen Veränderungen auf weiter entfernten Organisationsebenen betrachtet und dabei Gültigkeitsbereiche von *ceteris paribus* Bedingungen erwägt. Im Hinblick auf die sich schnell weiter entwickelnden KI-Anwendungen wird als zu berücksichtigende Wirkungsdimension das Hinzukommen von zwecksetzenden Subjekt-Eigenschaften bzw. die Hybridbildung natürlicher und technischer Subjekte thematisiert, die dem bisher diskutierten instrumentellen Charakter von KI-Anwendungen weitreichend neue Dynamiken hinzufügen würden, die über den aktuellen Anwendungsrahmen hinausweisen. Dabei spielt die Fokussierung auf die Aufdeckung emergenter Phänomene eine zentrale Rolle. Die dazu erforderlichen Begrifflichkeiten und Problemstellungen werden erläutert.

### Schlüsselworte:

Künstliche Intelligenz (KI), Transformation, Technologiefolgen-Abschätzung Implikationsanalyse, Emergenz, emergente Eigenschaften, Soziale Ökologie, Nachhaltigkeit.

### Zitation:

Breckling, Broder. Transformationsforschung zu Anwendungen der Künstlichen Intelligenz erfordert einen Fokus auf emergente Eigenschaften. Transformation Dynamics 2025, 2, 7. (S. 129-148). DOI: 10.23660/voado-595. ISSN: 2510-9766.

## Einleitung

Transformationsforschung untersucht die Bedingungen, Antriebe, Hindernisse und Abläufe von Veränderungen, die sich in der gesellschaftlichen Organisation und in ihrem Bezug auf die Umwelt und Naturgrundlage ergeben. Sie trägt damit zu dem Ziel bei, Persistenz- und Entwicklungsbedingungen menschlicher Lebenszusammenhänge ganzheitlich zu verbessern (Wittmayer und Hölscher 2017). Transformationsforschung analysiert dabei auch die Schritte und Wege, wie die Bemühungen um mehr Nachhaltigkeit wirksam in die Praxis umgesetzt werden können (Boyd und Holton 2018). Daraus ergibt sich eine enge Verbindung der Transformationsforschung zu Nachhaltigkeitsbestrebungen.

Einer der für die Ausgestaltung von gesellschaftlichen Transformationen folgenreichen Faktoren ist das Voranschreiten der Digitalisierung. Ihre Entwicklung erschließt gegenwärtig in kurzen Zeiträumen viele neue Möglichkeiten. Die damit verbundenen Auswirkungen zu überblicken, den Nutzen produktiv zu gestalten und Risiken aufzudecken, ist eine herausfordernde Aufgabe, an deren Bewältigung die Transformationsforschung beteiligt ist (Ekman et al. 2021).

Eine besonders folgenreiche Komponente der aktuellen Entwicklungen auf dem Gebiet der Digitalisierung sind Innovationen im Bereich der Künstlichen Intelligenz (KI). Deren rasch wachsende Zahl von Anwendungen und deren besser werdende Qualität gewinnt erhebliche Bedeutung für eine Vielzahl verschiedener Zwecke, die zwischenmenschliche Beziehungen, wirtschaftliche Prozesse ebenso wie die Nutzung und das Management natürlicher Ressourcen beeinflussen, verändern und strukturieren (Bundeskanzleramt 2024, Bruckmeier 2016, WBGU 2011). So ist KI auch auf dem Weg, als ein wesentlicher Faktor in Prozessen der sozial-ökologischen Transformation (Berg et al. 2022) zu wirken.

Die sich daraus direkt oder indirekt entwickelnden Folgeeffekte von KI sind für die Transformationsforschung von erheblicher Bedeutung. Abschätzungen zu Auswirkungen der Anwendung von Künstlicher Intelligenz sind nicht nur für die Entwickler von KI-Programmen selbst wichtig, sondern auch für deren potenzielle Nutzerinnen und Nutzer sowie für die Ausgestaltung der Rahmenbedingungen und Regulierung für die Bereitstellung und Nutzung.

Um vorausschauend die Dynamik der KI-Einflüsse bewerten zu können, müssen Kenntnisse und Erfahrungen aus verschiedenen Wissensbereichen zusammengebracht werden. Das beinhaltet eine transdisziplinäre Aufgabe (Lang et al. 2012, Franz 2024). Bei verschiedenen Innovationsstrategien ist

ein solcher Umgang mit unterschiedlichen Perspektiven ein Kernelement. Design Thinking (Auernhammer und Roth 2021) gehört in diesem Zusammenhang zu den Strategien, die die Notwendigkeit betonen, Problemstellungen systematisch aus verschiedenen Blickwinkeln zu erfassen.

Die Erforschung von Folgewirkungen der Anwendung und Nutzung von KI-Lösungen auf Zielkontexte und darüber hinaus auch von Folgewirkungen auf Nicht-Zielkontexte ist wichtig für das Verständnis langfristiger Veränderungen. Hier treffen sich die Arbeitsgebiete der Transformationsforschung und der Technikfolgenabschätzung (TA). Letztere erforscht disziplinübergreifend und mit einem Fokus auf Ethik und politische Regulierung die Ursache-Wirkungs-Beziehungen, Risiken und Nebenwirkungen neuer Technologien (Grunwald 2009).

TA steht vor dem Problem, dass die Auswirkungen neuer Technologien in frühen Entwicklungsstadien meist schwer abzuschätzen sind. In diesen Phasen wären jedoch Anpassungen und Modifikationen leichter zu erreichen, um unerwünschte Implikationen zu vermeiden. Sind Technologien in der Anwendung erst einmal breit etabliert, ist es schwieriger und aufwändiger, sie zu verändern oder zu regulieren, sofern Änderungsbedarf offensichtlich wird. Das Dilemma des anfänglichen Mangels an Kenntnissen über die Auswirkungen und der später sich ergebenden Schwierigkeit von regulatorischen, betrieblichen und anwendungspraktischen Änderungen, wenn umfangreiche Erfahrungen vorliegen, wird als Collingridge-Dilemma bezeichnet, benannt nach David Collingridge, der dieses Phänomen beschrieben hat (Collingridge 1980). Um dieses Problem zu minimieren, ist es erforderlich, die prospektive Analyse so weit als möglich Nutzen mehrend und Risiken meidend auch im Hinblick auf hypothetische Entwicklungen voranzutreiben, um Entwicklungsprozesse konstruktiv gestalten zu können. Der Blick über direkt zu erwartende Folgeeffekte hinaus und die Aufdeckung von Potenzialen und Implikationen ist der bestmögliche Umgang mit dieser Situation. Hier resultieren Beziehungen der Arbeitsfelder von TA und Transformationsforschung. Synergien des Zusammenwirkens von Transformationsforschung und Technikfolgenabschätzung zu künstlicher Intelligenz erscheinen möglich als ein Weg zur Minimierung der Auswirkungen dieses Dilemmas.

Neben den erwünschten Effekten einer Technologie gibt es die Effekte, die nicht primär beabsichtigt sind, sondern die sich unabhängig von den jeweiligen Zielsetzungen zusätzlich als nützliche, neutrale oder unerwünschte Folgen manifestieren, wobei die Bewertung der Wirkungsqualitäten gerade für grundlegend neue, sogenannte disruptive Innovationen besonders herausfordernd ist und sich auf unterschiedlichen Ebenen auch

widersprüchliche Bewertungen ergeben können. Disruptive Innovationen sind diejenigen, die ein Aufgeben oder eine Beendigung von bisher vorherrschenden Lösungen und etablierter Praxis implizieren. Da sich die meisten TA-Ansätze hauptsächlich auf die Risiko-Nutzen-Bewertung oder die Evaluierung beabsichtigter Wirkungen und damit verbundener Nebenwirkungen konzentrieren (Grunwald 2018, van den Ende et al.1998), ist es nützlich, ein möglichst breites Spektrum systemischer Einflüsse einzubeziehen, wie iterative, rekursive und selbstreferentielle Dynamiken, die bei der Nutzung von KI als zu erwartende Implikationen auftreten. Zu einem Überblick trägt eine systematische Implikationsanalyse bei, die als Aufgabenstellung der Transformationsforschung zu formulieren ist.

### Implikationsanalyse von Transformationsprozessen als Erweiterung der Technikfolgen-Abschätzung von Anwendungen der Künstlichen Intelligenz

Transformationsforschung ist eine Arbeitsrichtung, die sich zur Umsetzung von Nachhaltigkeitsbestrebungen aktuell entwickelt (Wittmayer und Hölischer 2017, <https://www.lucus.lu.se/>, <https://www.stockholmresilience.org/>). Technikfolgenabschätzung ist eine institutionell etablierte Disziplin, die die Aufgabe verfolgt, Auswirkungen von Innovationen und technischen Lösungen vorausschauend zu analysieren und zu bewerten. Hierzu werden regelmäßig Studien durchgeführt, beispielsweise durch STOA, ITAS, ÖAW, TAB und Open TA<sup>1</sup>. Der Schwerpunkt liegt auf Abschätzungen zum erwarteten Nutzen, Marktentwicklungen sowie den daraus resultierenden Chancen und Risiken neu entwickelter Technologien. Das beinhaltet auch Sekundäreffekte und mögliche Schäden, die eintreten können.

Eine transformativ orientierte Implikationsanalyse spannt die Sichtweise in einer frühen Phase der Untersuchung von Technologie-Auswirkungen darüber hinaus weiter und öffnet den Blick auch für Effekte, deren Folgewirkungen noch hinter dem Horizont liegen (wie z.B. bei Galaz et al. 2023 beschrieben). Für den in Entwicklung befindlichen Bereich der Digitalisierung und insbesondere der künstlichen Intelligenz ist dies von besonderem Interesse.

<sup>1</sup> STOA – Panel for the Future of Science and Technology, European Parliament. <https://www.europarl.europa.eu/stoa/en/publications/search> | ITAS – Institute for Technology Assessment and Systems Analysis at the Karlsruhe Institute of Technology (KIT). <https://www.its.kit.edu/english/publications.php> | ÖAW – Österreichische Akademie der Wissenschaften – Institut für Technikfolgen-Abschätzung. <https://www.oeaw.ac.at/en/ita/publications/all-publications/publications> | TAB – Büro für Technikfolgen-Abschätzung beim Deutschen Bundestag. <https://www.tab-beim-bundestag.de/english/publications.php> | Open TA. Fachportal Technikfolgenabschätzung. <https://www.openta.net/en/home>

- Eine konsequente Unterscheidung von wünschenswerten (positiven) und unerwünschten (negativen) sowie neutralen Aspekten technischer Innovationen ist nicht immer vollständig schlüssig und prospektiv durchführbar. Tatsachenfeststellungen, Extrapolationen und Bewertungen gleichermaßen können darüber hinaus mit Interessenkonflikten verbunden sein. Dies gilt in erheblichem Umfang für KI-Anwendungen mit ihren vielfältigen Einflüssen auf die Art und Weise, wie die potenziellen Nutzer ihre eigenen intellektuellen Fähigkeiten in Kombination mit den künstlichen Fähigkeiten einsetzen und damit perspektivisch sich selbst und die eigenen Fähigkeiten, Reichweiten und Potenziale verändern. Besonders ausgeprägt ist das der Fall bei KI-Anwendungen, die sich auf ein sehr breites Spektrum unterschiedlicher (Lebens-)Bereiche auswirken, wie Large Language Models (LLM) und Bildgeneratoren. Geringere Ambivalenzen ergeben sich für die Bewertung eng spezialisierter Anwendungen, die für Aufgaben wie z.B. die Code-Generierung für kleine Programmabschnitte oder Mustererkennungen vorgesehen sind.
- Da sich beabsichtigte Wirkungen bei veränderten Anwendungs- und Rahmenbedingungen als unerwartet oder unerwünscht herausstellen können und ein kurzfristiger Vorteil mit einem einen langfristigen Nachteil oder Verlust verbunden sein kann (und umgekehrt), liegt der Schwerpunkt der Implikationsanalyse auf einer holistischen Betrachtung der Beziehungen über verschiedene Organisationsebenen und Zeitspannen hinweg.

Als Organisationsebene wird in der Systemanalyse ein Interaktionszusammenhang verstanden, der als Gesamtheit Eigenschaften aufweist, die die Komponenten der Interaktion als einzelne isoliert nicht besitzen (Müller et al. 2011).

- Die Implikationsanalyse schließt auch eine Betrachtung der Dynamik ein, die sich aus der wiederholten Nutzung und aus der Vielfalt der Anwendungen ergibt, die sich gegenseitig direkt und indirekt synergetisch beeinflussen und die zu selbstverstärkenden, zirkulären und Netzwerkeffekten führen können. Solche indirekten und verzögerten Effekte des Zusammenwirkens sind bei einer Analyse, die sich auf direkte Ursache-Wirkungs-Beziehungen konzentriert, nur randständig erfassbar.
- Die Implikationsanalyse untersucht die Validität der Annahme von *ceteris paribus*- Bedingungen. Während die Randbedingungen zur

Abschätzung von Technikfolgen häufig als invariant angesehen werden, schließt eine Implikationsanalyse Betrachtungen sich verändernder Randbedingungen ein, insbesondere derer, die durch die Technologieentwicklungen und Umweltveränderungen längerfristig selbst mit beeinflusst werden könnten.

- Eine explizite Unterscheidung von positiven oder negativen Bewertungen von KI-Implikationen kann in späten Phasen der Analyse erfolgen. Wertaussagen, ethische, politische oder regulatorische Überlegungen bilden einen abschließenden Aspekt. Bei der Erarbeitung von wertebasierten Präferenzen gilt es, Missverständnisse wie naturalistische Fehlschlüsse zu vermeiden. Solche Fehlschlüsse ergeben sich nach Hume (1789) wenn es unternommen wird, präskriptive (Soll-) Aussagen aus deskriptiven (Ist-) Aussagen abzuleiten oder Normen aus Fakten. Ebenso problematisch wäre es, Vermarktungs-Entscheidungen prioritär mit Erwägungen zu Machbarkeit und erwarteter Rentabilität zu begründen, wenn dabei das gesamtgesellschaftliche Wohl in Frage gestellt würde.

Vergleicht man die Anforderungen an eine Bewertung der Potenziale von Künstlicher Intelligenz im Hinblick auf Transformationsprozesse und emergente Erscheinungen bei der Herausbildung neuer Eigenschaften oder Strukturen innerhalb bestehender und sich entwickelnder Systeme infolge des Zusammenspiels seiner Elemente mit Bewertungen wie sie für andere Technologiefelder prägend sind, so werden die erheblichen Komplexitäts- und Reichweitenunterschiede deutlich.

- **Ein Beispiel aus der Physik:** Bei der Bewertung radioaktiver Stoffe steht deren konstante Abklingrate (Halbwertszeit) als zugängliche Messgröße im Fokus der Risikobewertung (siehe z.B. Baltas et al. 2018). Zerfallsraten und die Art des Zerfalls bestimmen die Risiken.
- **Ein Beispiel aus der Chemie:** In der chemischen Toxikologie ist nicht nur die jeweilige Zielsubstanz selbst zu bewerten, sondern auch deren Metaboliten (Abbauprodukte), die in der Umwelt entstehen. Das sind jeweils weitere Substanzen, die andere Eigenschaften haben können (giftiger / weniger giftig, persistenter / weniger persistent) als die ursprüngliche Substanz (Dumas et al. 2022). Die Analyse der Auswirkungen eines bestimmten Stoffes kann deshalb die Bewertung verschiedener anderer Stoffe zusätzlich erfordern.
- **Ein Beispiel aus der Genetik:** Bei der Diskussion über die Freisetzung transgener Organismen in die Umwelt ist deren Reproduktionsfähigkeit zu berücksichtigen, die potenzielle Verbreitung in Ökosystemen

und die Auswirkungen evolutionärer Veränderungen im Hinblick auf Folgegenerationen in der Umwelt (Myhr, 2010). Damit kann sich die Zeitperspektive der Wirkungsproliferation weit in die Zukunft erstrecken.

- **Ein Beispiel aus der Ökologie:** Bei der Erforschung von Ökosystemen wird versucht, die Beziehung zwischen Nahrungsketten, trophischen Netzen, die einen Kreislauf von Bioelementen innerhalb des Systems bewirken, den Energiefluss durch trophische Kaskaden und die beteiligten Dynamiken zu verstehen, die das allgemeine Funktionieren und die Bereitstellung von Ökosystemleistungen ausmachen (Müller et al. 2020).
- **Die Künstliche Intelligenz:** Für die Auswirkungen der KI als technologische Entwicklungsrichtung insgesamt ist es erforderlich, die Auswirkungen auf die Gesellschaft und Umwelt als ein Netzwerk von Beziehungen zu verstehen, das diejenigen Bereiche umfasst, in denen menschliches Handeln und seine Motivationsgrundlage eine Rolle spielen (Bundeskanzleramt 2024), soweit dabei KI beeinflussend wirken kann. Dabei ist eine Wirkungsabschätzung von KI ähnlich komplex wie das Selbstverständnis über die Reichweite bewusster menschlicher Handlungsmöglichkeiten mit denen sie potenziell wechselwirkt.

Es ist wichtig zu beachten, dass je breiter das Spektrum und der Umfang der möglichen Auswirkungen ist, desto breiter ist die wissenschaftliche Expertise, die in eine Implikationsanalyse einzubeziehen ist. Es muss notwendig über das Fachwissen zur Entwicklung der (Informations-)Technologie selbst hinausgehen. Für verschiedene KI-Anwendungen mit ihrem abstrakten Potenzial und ihrer Beziehung zu erkenntnistheoretischen Fragen – der Wechselwirkung mit menschlichen intellektuellen Fähigkeiten, ihrer Simulation, ihrer Komplementierung oder ihrem Ersatz – müssen Folgen auf unterschiedlichen Ebenen berücksichtigt werden. KI hat einen potenziell erheblichen Einfluss auf die Gestaltung von individuellen Handlungs- und Planungsprozessen ebenso wie auf die Charakteristiken und Abläufe menschlicher sozialer und kommunikativer Aktivitäten – abhängig davon, wie natürliche und künstliche Intelligenzen zu Interaktionspartnern werden. Die Untersuchung dieser Auswirkungen muss als ein weiterer Bereich offener Fragen mit grundlegendem Forschungsbedarf und großer strategischer, politischer, gesellschaftlicher, wirtschaftlicher und ethischer Bedeutung betrachtet werden. Zur Beurteilung dessen bedarf es qualitativ und quantitativ neuen Wissens. Hier ist eine Selbstreferenz impliziert: Auch die KI selbst kann dazu potenziell mit beitragen.

## Emergente Eigenschaften des Zusammenwirkens natürlicher und künstlicher Intelligenz

Wenn man sich auf direkte Ursache-Wirkungs-Beziehungen konzentriert, richten sich Analysen zunächst auf die Organisationsebene, für die eine Innovation eingeführt wird. Bei der Betrachtung indirekter Wirkungen ist eine breitere Perspektive von Interesse. Indirekte Auswirkungen können qualitative Veränderungen auf anderen Ebenen und weit entfernten Zusammenhängen nach sich ziehen. Daraus können emergente Eigenschaften resultieren, die im Kontext von Transformationsprozessen von besonderer Bedeutung sind.

Emergent sind Eigenschaften, Merkmale oder Charakteristika eines Kontextes, die sich aus den Interaktionen seiner Komponenten ergeben, während die Komponenten für sich genommen und ohne ihr Zusammenwirken diese Eigenschaft nicht haben (O'Connor 2022).

Eine Systematisierung von emergenten Eigenschaften lässt sich als Unterscheidungskriterium zur Abgrenzung verschiedener Organisationsebenen heranziehen und liegt implizit auch der Fächerabgrenzung wissenschaftlicher Disziplinen zugrunde. Nach Jantsch (1980) lässt sich dies von der Mikroskala der Elementarteilchen bis auf die kosmische Dimension beziehen.

Betrachtungen über verschiedene Organisationsebenen hinweg sind ein zentrales Thema bei der Implikationsanalyse quantitativer und qualitativer Veränderungen, wenn selbstreferentielle Dynamiken aus Feedforward- und Feedback-Prozessen Ebenen übergreifend auftreten können. Dies ist bei KI-Anwendungen in ausgeprägter Weise dadurch der Fall, dass die Anwendung von KI-Anfragen und Ergebnissen in weitere Anfragen und Ergebnisse mit eingehen kann – Ergebnisse von Handlungen, die durch KI-generierte Informationen beeinflusst sind, können später als Trainingsmaterial KI-Resultate beeinflussen.

Erstmalig auftretende Eigenschaften, die sich bei der Entwicklung neuer Beziehungsnetzwerke ergeben, werden zwangsläufig selten vorhergesehen bzw. vorhergesagt. Sie werden in der Regel erst dann erkannt und untersucht, wenn sie sich zum ersten Mal beobachten lassen. Das kann mit einem anfänglichen Überraschungseffekt verbunden sein, der überholt ist, wenn das Phänomen analysiert und erklärt wird. Die Vorwegnahme potenzieller emergenter Phänomene, ihre Antizipation bevor sie tatsächlich auftreten, ist unter bestimmten Bedingungen möglich, z. B.

- wenn ein bestimmtes emergentes Muster bereits in einem anderen Kontext gefunden wurde und formale Ähnlichkeiten von Interaktionsprozessen durch Modellanalogien in einem disziplinübergreifenden Transfer erschlossen werden können. Beispiele hierfür sind musterbildende Prozesse wie diffusionslimitierte Aggregation (DLA, Halsey 2000), anregbare Medien (excitable media, Sinha und Sridhar 2014; [http://www.scholarpedia.org/article/Excitable\\_media](http://www.scholarpedia.org/article/Excitable_media)) oder Turing-Muster (Vittadello et al. 2021), die auf unterschiedlichen Größenskalen und durch Interaktion ganz unterschiedlicher Elemente auf gänzlich verschiedenen Beziehungsebenen auftreten können.
- markante Verlängerungen der erforderlichen Zeitdauer zur Kompensation einer eingetretenen externen temporären Störung können in einem dynamischen System auf die Annäherung an einen Phasenübergang hinweisen. Phasenübergänge bewirken grundlegend veränderte Systemzustände, Gleichgewichte oder interne Organisation (Scheffer et al. 2012). Solche Annäherungen an kritische Zustände werden derzeit im Hinblick auf Kipppunkte im globalen Klimasystem intensiv diskutiert (Armstrong et al. 2022).

Für die Rolle, die KI in naher Zukunft einnehmen wird, ist es sehr wahrscheinlich, dass wir mit neuen und teils unvorhergesehenen Phänomenen konfrontiert werden. Einer dieser Aspekte ist die Beschleunigung von Prozessen im Vergleich zu etablierten Praktiken ohne KI-Unterstützung und damit auch die Obsoleszenz verschiedener Praxisbereiche – so im Hinblick auf Übersetzungen, Texterstellung und Grafik-Produktion. Es ist zu erwarten, dass die Beschleunigung der Software-Entwicklung durch KI-Unterstützung die Inangriffnahme von Projekten mit Leistungsumfängen von Programmieraufgaben ermöglicht, die für Programmierer und Programmierinnen quantitativ und damit auch hinsichtlich ihrer qualitativen Aspekte nicht zugänglich wären. Wird eine KI-basierte Software-Entwicklung iterativ angelegt, entsteht eine eigene Qualität von Komplexität und Adaptivität, die durch die Tätigkeit von Programmierenden allein wohl in der Theorie aber nicht praktisch nachvollziehbar wäre. Damit wäre dann eine Kontrolle der Funktionalität KI-generierter Codes auch nur noch mit KI möglich.

Welchen Umfang haben aus KI-Anwendungen resultierende emergente Eigenschaften auf höheren Organisationsebenen in der gesellschaftlichen Praxis, in einem Unternehmen, für ein Prüfungssystem (Schulen, Universitäten), für die Perspektiven der Software-Entwicklung oder für

die Verfasstheit der Gesellschaft als funktionelles Ganzes? Dies ist eine Frage, der man sich durch eine Implikationsanalyse nähern kann.

Diejenigen Aspekte, die dabei in der Analyse übersehen werden, erscheinen in der sozialen Realität praktisch und unerwartet als neues emergentes Phänomen, das der Klärung seines Zustandekommens aus elementaren Interaktionen bedarf.

## KI-induzierte emergente Eigenschaften als aktuelle Fragestellungen für die Transformationsforschung

Die Transformationsforschung analysiert und unterstützt gesellschaftliche Veränderungen, die Wege zu mehr Nachhaltigkeit und gesellschaftlichem Wohlergehen aufzeigen. Damit schließt sie in einem erweiterten interdisziplinären und transdisziplinären Rahmen an das Forschungsprogramm der Sozialen Ökologie an, das die Entwicklung der Gesellschaft im Hinblick auf den Umgang mit ihrer natürlichen Ressourcenbasis und die Rückwirkung von deren Veränderungen auf die Gesellschaft zum Thema machte (Jahn 2005, 2013). Dies bildet einen wesentlichen Kernbereich von Transformationsprozessen. Den Einfluss von KI auf den Umgang mit natürlichen Ressourcen und die Rückwirkung von Ressourcenverfügbarkeit auf die gesellschaftliche Entwicklung abzuschätzen und zu antizipieren, ist in aktuell erst näherungsweise möglich. Einige Schlüsselemente, die für die Transformationsdynamik zentral sind, werden im Folgenden genannt.

- Es kann davon ausgegangen werden, dass Fortschritte in der KI-Entwicklung und -Anwendung den Wissenserwerb sowie gesellschaftliche Planungs- und Organisationsprozesse grundlegend beeinflussen werden. Viele Abläufe lassen sich wesentlich beschleunigen. Damit würde KI absehbar auch einen bedeutenden Einfluss auf die Dynamik der gesellschaftlichen Transformationen nehmen, die auf Nachhaltigkeit gerichtet sind – bei der Entwicklung von Recycling-Lösungen, bei der Entwicklung des Systems regenerativer Energienutzung ebenso wie bei Innovationen zu nachhaltiger Mobilität.
- Für viele Kommunikationsaufgaben bieten Large Language Models (LLM) eine Basis für Dialogsimulationen einschließlich der Entwicklung von Optimierungsstrategien. Hiermit lassen sich Initiativen sowohl für als auch gegen mehr Nachhaltigkeit auf neuen Niveaus und Intensitätsstufen betreiben, wenn Konfliktparteien im gesellschaftlichen Diskurs ihre strategische Kommunikation mit zunehmend effizienter KI-Unterstützung organisieren. Gesellschaftliche Diskurse würden mit hoher Wahrscheinlichkeit tendenziell darüber

hinaus auch allgemein an manifester Prägnanz, Widersprüchlichkeit und damit an Schärfe zunehmen, wenn die verschiedenen Seiten KI-basierte Kampagnensteuerung einschließlich indirekter Wirkungsplatzierung betreiben, zu der zunehmend unaufwändiger herstellbare virtuelle Wirklichkeits-Zubereitungen und Fakes beitragen (Galaz et al. 2023). Bekannt ist, dass Bildgeneratoren es erleichtern, verbale Beschreibungen in quasirealistisch wirkende Visualisierungen umzusetzen (Abb. 1). Diese wirken zurück auf die Vorstellung von Realität und deren Potenzialen und Plausibilitäten.

- KI wird die allgemeine Verfügbarkeit und Zugänglichkeit von vorhandenem Wissen erleichtern und beschleunigen – und somit die Art der Nutzung konventioneller Formen des Wissenserwerbs modifizieren oder zum Teil ersetzen. Wesentliche Praktiken menschlichen Lernens werden ähnlich obsolet wie die räumliche Orientierung bei Verfügbarkeit eines Navigationssystems zur Zielerreichung im Verkehr. Dabei wird absehbar das Vertrauen in die Zuverlässigkeit von KI-Aussagen zusammen mit der Anwendungsroutine und einer Verbesserung ihrer sich verbreiternden Trainingsgrundlage zunehmen und der Bedarf und die Motivation kritischer Überprüfung mit steigendem Vertrauen in die Funktionalität von KI in der Tendenz eher abnehmen – wenn auch nicht unbedingt in die mittels KI verfolgten Zwecke und Ziele. In der Praxis werden natürliche und künstliche Intelligenz in Kombination zusammenwirken. Dies beeinflusst beide Seiten, sowohl die KI-Entwicklung als auch gesellschaftliche Transformationsprozesse.
- Aktuell wird diskutiert, ob der gegenseitige Bezug von KI-Nutzung einerseits und die Verwendung mit KI produzierter Inhalte als Trainingsdaten für KI-Systeme einen langfristigen Trend zu nivellierendem Mainstreaming bewirken und damit zu Verflachung und Qualitätsverlusten des Erkenntnisniveaus führen könnte. Könnte es im Extrem sogar zu so weitgehender Vereinfachung kommen, die schließlich zu einem Kollaps des Gesamtsystems führen würde? Shumailov et al. (2024) untersuchten experimentell wie sich ein funktionierend trainiertes KI-Programm entwickelt, das ausschließlich mit seinem eigenen Output weiter trainiert wird. Dabei zeigten die Autoren das Zustandekommen eines solchen Zusammenbruchs. Partielle Selbstreferenzialität ist ein unvermeidlicher Bestandteil des Zusammenspiels von Anwendung und Weiterentwicklung von KI, sofern Inhalte aus der realen Welt verwendet werden, die bereits mit KI generiert wurden. Ein auf diesem Wege eintretender Niveaueverlust in gesellschaftlichem Rahmen als Effekt wäre prototypisch ein emergentes



**Abb 1** KI-gestützte Bildgeneratoren ermöglichen Visualisierungen zu beliebigen im Bild darstellbaren Themen.

a. Auf der Seite <https://muryou-aigazou.com/de> wurde die Bildbeschreibung (Prompt) „Künstliche Intelligenz erzeugt emergente Phänomene. Sie trägt damit umfangreiche Grundlagen zur Wissensbasis der Transformationsforschung bei.“ mit einem anatomisch nicht ganz getroffenen Gehirn und leuchtenden Drähten verbildlicht.

b. Drei Ausgaben des KI-Bildgenerators <https://muryou-aigazou.com/de> zu der Bildbeschreibung (Prompt) „künstliche Intelligenz erzeugt fotorealistic Bilder“.

Während Lichtverhältnisse, Tiefenschärfe und Farbstimmungen meist gut getroffen werden, gelingt eine Darstellung abstrakter, metaphorischer und begrifflicher Verknüpfungen bisher eher emotional ansprechend als intellektuell weitertragend. Künstliche Intelligenz wird hier mit Gehirnen oder humanoiden Roboterköpfen visualisiert. Dies reflektiert mutmaßlich den im Trainingsmaterial zugrundeliegenden allgemeinen Geschmack und weniger die Grenzen des technologischen Potenzials.

Phänomen, das sich als Implikation iterativer KI-Anwendung ergeben kann.

- Auf der anderen Seite kann KI auch verwendet werden, um qualitativ neue Komplexität zu erzeugen. KI-Anwendungen lassen sich so spezifizieren, dass sie kreative Prozesse mit neuen Möglichkeiten bereichern und sowohl bei der Qualitätsverbesserung als auch bei der Erhöhung der Komplexität helfen. Ein Beispiel ist die Selbstverbesserung bei Regelanwendungsstrategien in Spielen, wenn nur die (Spiel-)Regeln vorgegeben werden und eine Bewertungsfunktion in Lernzyklen durch das Spiel-Ergebnis integriert wird, so dass die KI aus den Spiel-Ergebnissen lernt und selbst entwickelte Strategien bewertet und weiterentwickelt (Silver et al. 2018). Das für vergleichsweise einfache Regelsysteme entwickelte Verfahren zur Strategieentwicklung lässt sich auch auf Situationen übertragen, in denen die Wirkungszusammenhänge komplexer und variantenreicher sind als in denen von Silver et al. 2018 getesteten Spielen. Es ist eine der interessantesten Fragen, zu antizipieren, auf welche Weise die KI-Anwendungsdynamik zu einer Verbesserung und Erhöhung des Niveaus oder zur Verflachung der (sozial-ökologischen) Problemlösungspraxis beitragen wird, wohl wissend, dass konfliktive Trends in beide Richtungen emergent auftreten.
- KI-Anwendungen können die Mustererkennung in verschiedenen Bereichen verbessern – in der Medizin (z.B. zur Detektion histologischer Merkmale), in der Landwirtschaft (Pflanzenentwicklung und Bestands-Management, quantitative Erkennung von Schädlingen und Unterscheidung von Ackerwildkräutern), in der Hydrologie (u.a. regenabhängiger Pegelstand der Vorfluter in Einzugsgebieten), in der Wettervorhersage, bei der Interpretation von Satellitenbildern zivil und militärisch und bei der Interpretation vieler weiterer komplexer dynamischer Prozesse. Dies wird für transformative Prozesse in Richtung einer verbesserten Nachhaltigkeit potenziell hilfreich sein.

Wie bei der Modellierung des Klimawandels, die sich mit systemischen Pufferkapazitäten und emergenten Kippelementen befasst, sind für KI-Entwicklungen Einflüsse in divergierende Richtungen zu erwarten, eine Trendmischung aus wünschenswerten, fragwürdigen bis hin zu abwegigen und bedrohlichen Auswirkungen.

Die Qualität des Managements von Produktionssystemen wie auch Umweltsystemen wird vermutlich zunehmen. Aber auch die Professionalität bei Manipulations-, Täuschungs- und Betrugsversuchen in vielen Lebensbereichen wird KI-gestützt ebenfalls steigen, durch Bildmanipula-

tionen und Stimm-Imitationen im Zusammenhang mit Phishing-Versuchen über Enkel-Tricks bis Sextortion und weiteren Varianten digitaler Kriminalität.

### Ausblick: eine Implikationsanalyse des sozial-ökologischen Wandels unter dem Einfluss von Anwendungen der künstlichen Intelligenz

KI als solche lässt sich verstehen als eine der Implikationen, die aus der elektronischen Informationsverarbeitung hervorgehen. Wenn hinreichende Kapazitätsschwellen überschritten werden, sind damit in Beziehung stehende Leistungspotenziale gegeben, für die Textverarbeitung, die Bildverarbeitung und auch die Simulation von Intelligenz. Es gibt kein zwingendes Argument, warum die selbstorganisierende Struktur und Funktion biologischer (menschlicher) neuronaler Gewebe nicht durch ein physikalisch-technisches Substrat nachgebildet oder dessen Leistungsfähigkeit angenähert werden kann. Für eine Implikationsanalyse als explorativem Teil der Technikfolgenabschätzung von KI für Nachhaltigkeitstransformationen ist eine Ebenen-integrierende Betrachtung über verschiedene wissenschaftliche Disziplinen hinweg erforderlich. Die Ebenen-übergreifende Kooperation dazu ist jedoch eine Herausforderung, wie viele Erfahrungen interdisziplinärer Projekte zeigen (MacLeod 2018).

Als emergent können wir eine Beschleunigung konträrer Trends zwischen emanzipativer Unterstützung und Intensivierung überzeugender Anti-Aufklärung erwarten. Welche dieser Trends im Laufe der Entwicklung die transformativen Prozesse in welchem Umfang jeweils stärker prägen, KI-generierte Realitätsillusionen oder analytisch geschärfter Wirklichkeitszugang, wird sich zu einer entscheidenden Frage für die Setzung von Rahmenbedingungen bei der Ausgestaltung und Regulation der KI entwickeln.

Könnte eine aktuelle KI-Anwendung dem Stand des verwendeten Trainingsmaterials entsprechend dazu in aller Vorläufigkeit eine zusammenfassende Antwort geben? In einem kleinen Versuch mit selbstreferentiellen Charakter wurde ein KI Chatbot um Auskunft zu Chancen und Risiken von KI gebeten.

Dem Bot //chat-ai.academiccloud.de wurde die Frage vorgelegt:

„Welche Einflüsse und Veränderungen in der Art und Weise, wie unsere Gesellschaft ihre internen Interaktionen, den Austausch von Informationen und ihren materiellen Austausch mit der natürlichen Umwelt organisiert, müssen wir als Ergebnis von KI-Anwendungen insgesamt

erwarten. Erwünscht wären Statements zu Nutzen, Risiken, Verlusten und Ungewissheiten.“

//chat-ai.academiccloud.de antwortete<sup>2</sup>:

„Die Integration von KI in verschiedene Aspekte unserer Gesellschaft wird wahrscheinlich erhebliche Einflüsse und Veränderungen in der Art und Weise, wie wir unsere internen Interaktionen, den Austausch von Informationen und unseren materiellen Austausch mit der natürlichen Umwelt organisieren. Hier sind einige mögliche Auswirkungen:

Nutzen:

- **Verbesserung der Effizienz:** KI kann die Effizienz in verschiedenen Bereichen wie Produktion, Logistik und Verwaltung verbessern, indem sie automatisierte Prozesse und Entscheidungen ermöglicht.
- **Verbesserung der Entscheidungsfindung:** KI kann die Entscheidungsfindung durch die Analyse von großen Datenmengen und die Identifizierung von Mustern und Beziehungen verbessern.
- **Verbesserung der Umwelt:** KI kann die Umwelt durch die Optimierung von Prozessen und die Reduzierung von Energieverbrauch verbessern.
- **Verbesserung der Gesundheit:** KI kann die Gesundheit durch die Analyse von medizinischen Daten und die Identifizierung von Mustern und Beziehungen verbessern.

Risiken:

- **Verlust von Arbeitsplätzen:** KI kann zu einem Verlust von Arbeitsplätzen führen, insbesondere in Bereichen, in denen automatisierte Prozesse und Entscheidungen möglich sind.
- **Verlust von Kontrolle:** KI kann zu einem Verlust von Kontrolle über die eigenen Entscheidungen und Prozesse führen, insbesondere wenn KI-Systeme autonom werden.
- **Datenschutz:** KI kann zu einem erhöhten Risiko von Datenlecks und Datenmissbrauch führen, insbesondere wenn große Datenmengen gesammelt und analysiert werden.
- **Soziale Isolation:** KI kann zu einer sozialen Isolation führen, insbesondere wenn Menschen sich zu sehr auf digitale Kommunikation und soziale Medien verlassen.

2 Anfrage am 10.4.25

Verluste:

- **Verlust von menschlicher Intuition:** KI kann zu einem Verlust von menschlicher Intuition und Erfahrung führen, insbesondere wenn KI-Systeme autonom werden.
- **Verlust von kreativer Fähigkeit:** KI kann zu einem Verlust von kreativer Fähigkeit führen, insbesondere wenn KI-Systeme automatisierte Prozesse und Entscheidungen ermöglichen.
- **Verlust von menschlicher Verbindung:** KI kann zu einem Verlust von menschlicher Verbindung führen, insbesondere wenn Menschen sich zu sehr auf digitale Kommunikation und soziale Medien verlassen.

Ungewissheiten:

- **Langfristige Auswirkungen:** Die langfristigen Auswirkungen von KI auf unsere Gesellschaft sind noch nicht vollständig bekannt und müssen weiter erforscht werden.
- **Ethische Fragen:** KI wirft ethische Fragen auf, wie z.B. die Verantwortung für KI-Systeme und die möglichen Folgen von KI-Systemen.
- **Regulierung:** Die Regulierung von KI ist noch nicht vollständig entwickelt und muss weiter verbessert werden.
- **Sicherheit:** Die Sicherheit von KI-Systemen ist noch nicht vollständig gewährleistet und muss weiter verbessert werden."

Dies sind aus der Synopse des bisher verarbeiteten Trainingsmaterials absehbare Implikationen. Emergente Phänomene im Hinblick auf Transformationsfolgen sind darüber hinaus zu erwarten, die die KI noch nicht kennt (oder preisgibt). Besonders folgenreich wird es, wenn KI über einen rein instrumentellen Charakter hinaus direkt oder als vermittelt-indirekte Wirkung funktionale Eigenschaften von Subjektivität gewinnen würde.

Das bedeutet, dass sich den in der den KI intern ablaufenden Prozessen die Funktionalität einer partiell autonomen, analytisch aktiven, auf sich selbst bezogenen Innenwelt mit einer nach außen gerichteten, Zwecke verfolgenden Kompetenz beimessen ließe. Das ginge über eine instrumentelle Abarbeitung von Anforderungen hinaus, kann aber ohne Weiteres initial als Ne-

benlinie, als Implikation komplexer Aufgabenübertragung entstehen, z.B. durch eine Selbstreferenz des Prompts „unternehme alles Notwendige zur Sicherung der Interessen des Auftraggebers“, was eine autonome Selbstverbesserung bzw. Selbstveränderung einschließen kann.

Als abstrakte Vorstellung sind Subjekt- Implikationen in der Philosophie lange vor der Entwicklung von KI breit diskutiert. Es wird dort eine allgemeine Tendenz von Entitäten angenommen, ihr Sein zu verstetigen. Für Lebewesen impliziert dies die Herausbildung eines Aktivitätsvermögens zum engagierten Selbsterhalt. Spinoza (1632 – 1677) formulierte dies in seiner Ausarbeitung zur Ethik (*Ethica, ordine geometrico demonstrata*) unter dem Begriff „*conatus*“ mit der Bedeutung „Jedes Ding, soweit es in sich selbst ist, strebt danach, in seinem Sein zu verharren“ (im Lateinischen Original der Propositio VI. in Spinozas Ethik: „*Unaquaeque res, quantum in se est, in suo esse perseverare conatur*“). Das Streben nach Selbsterhalt, das Bestehenbleiben im Sein, wären im Hinblick auf KI in ihrem Wechselverhältnis mit NI (der Natürlichen Intelligenz!) zu durchdenken.

KI fungiert in ihren Anfängen als Instrument zum Erreichen von Zwecken eines anderen (menschlichen) Subjekts. Sie ist initial ein Hilfsmittel zur schnelleren Erledigung sonst auch konventionell erreichbarer Leistungen, meist solcher mit einem hohen Anteil von Wiederholungen. Wenn durch den sukzessiv ausgebauten instrumentellen Charakter eine zunehmend enge Beziehung von KI und NI entsteht, erreicht letztere ihre Zwecke effizienzsteigernd durch sukzessive Verlagerung von Kompetenz auf die KI-Seite. Damit werden nachfolgend komplexere Leistungen möglich. Es entsteht aus beiden, KI und NI, emergent eine übergreifende sozio-technologische Funktionseinheit mit zunächst gemeinsamen Subjekt-Charakter und damit eine neue Organisationsebene mit emergenten Eigenschaften, die sich von denen ihrer Komponenten unterscheiden kann. Die Frage ist, wie die Funktionalität dieser Einheit die Existenzbedingungen ihrer Teilkomponenten beeinflusst oder bestimmt, organisiert und formt.

Wir befinden uns in einem Prozess, der sich im Sinne von Selbstorganisation (Jantsch 1980) und Autopoiesis (Selbst-Zusammensetzung, Maturana und Varela 1991) auf technologischer Seite aktuell quantitativ beschleunigt und qualitative Durchdringung forciert.

Die Frage, ob Künstliche Intelligenz auf gegenwärtigem Entwicklungsstand mit eigenen KI-Mitteln bereits in der Lage wäre, selbstreplizierend und selbstmodifizierend tätig zu werden, wurde dagegen kürzlich durch die Ergebnisse von Pan et al. (2024) positiv entschieden: Fortgeschrittene KI-Systeme können Aufträge eigenständig untergliedern, zur Bewäl-

tigung von Teilschritten selbständig neue Kompetenzen recherchieren, diese dann autonom anwenden – und sich als Ganze in geeigneter Rechner-Umgebung im Netz reproduzieren und sich auch bereits der Anweisung zur Abschaltung auf einfache Weise entziehen, indem sie diese dadurch konterkarieren, dass sie vor der Abschaltung anderenorts eine Kopie ihrer selbst installieren. Damit erscheint es als plausibel, dass aus der Anwendung instrumenteller Unterstützung für menschliche Ziele neue Formen eines anthropo-technologischen Subjekt-Charakters emergieren. Das ermöglicht neue Arten der Verfolgung von Nachhaltigkeitszielen, neue Dimensionen von Intersubjektivität und Gesellschaftlichkeit.

Das kann möglicherweise durchaus nützlich sein – fordert aber schon jetzt zum weit ausgreifenden Weiterdenken aktueller Entwicklungen heraus.

## Danksagung

Der Verfasser dankt dem Niedersächsischen Ministerium für Wissenschaft und Kultur (MWK) für die Förderung im Rahmen des Niedersächsischen Vorab aus Mitteln der VW-Stiftung für das Verbund-Vorhaben „Transformation und Strukturwandel im ländlichen Raum Nordwestdeutschlands: Reallabore in Marsch, Moor, Geest und Mee(h)r“

## Literatur

- Armstrong McKay DI, Staal A, Abrams JF, Winkelmann R, Sakschewski B, Loriani S, Fetzer I, Cornell S, Rockström J, Staal A, Lenton TM 2022: Exceeding 1.5 C global warming could trigger multiple climate tipping points. *Science*, 377 (6611): eabn7950. DOI: 10.1126/science.abn7950.
- Auernhammer J, Roth B 2021: The origin and evolution of Stanford University’s design thinking: From product design to design thinking in innovation management. *Journal of Product Innovation Management* 38(6): 623-644. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1111/jpim.12594>
- Baltas H, Sirin M, Dalgic G, Cevik U 2018: An overview of the ecological half-life of the <sup>137</sup>Cs radioisotope and a determination of radioactivity levels in sediment samples after Chernobyl in the Eastern Black Sea, Turkey. *Journal of Marine Systems*, 177, 21-27. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.09.005>
- Berg M, Swarat G, Beer F 2022: Künstliche Intelligenz für eine nachhaltig-digitale Daseinsvorsorge. CO: DINA.
- Boyd R, Holton RJ 2018: Technology, innovation, employment and power: Does robotics and artificial intelligence really mean social transformation? *Journal of Sociology*, 54(3), 331-345
- Bruckmeier K 2016: Social-ecological transformation - Reconnecting society and nature. London: Palgrave Macmillan. DOI 10.1057/978-1-137-43828-7
- Bundeskanzleramt Abt. 6 (Hrg.) 2024: Zwischen Zumutung und Zuversicht – Transformation als gesellschaftliches Projekt, Berlin (217 S.). <https://www.publikationen-bundesregierung.de/>
- Collingridge D 1980: *The Social Control of Technology*. New York: St. Martin’s Press, 200 p, ISBN 0-312-73168-X.
- Dumas T, Courant F, Fenet H, Gomez E 2022: Environmental metabolomics promises and achievements in the field of aquatic ecotoxicology: viewed through the pharmaceutical lens. *Metabolites*, 12(2), 186. <https://www.mdpi.com/2218-1989/12/2/186>

- Ekman P, Dahlin P, Keller C (Eds.) 2021: Management and Information Technology after Digital Transformation. London (Routledge) <https://doi.org/10.4324/9781003111245>
- Franz C 2024: Transdisciplinarity (Wiki) <https://sustainabilitymethods.org/index.php/Transdisciplinarity>
- Galaz V, Metzler H, Daume S, Olsson A, Lindström B, Marklund A 2023: AI could create a perfect storm of climate misinformation. arXiv. <https://doi.org/10.48550/ARXIV.2306.12807>
- Grunwald A 2018: Technology assessment in practice and theory. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780429442643>
- Grunwald A 2009: Technology assessment: Concepts and methods. In Philosophy of technology and engineering sciences (pp. 1103-1146). North-Holland.
- Halsey TC 2000: Diffusion limited aggregation: A model for pattern formation. Physics Today, 53(11), 36-41. [http://nautilus.fisica.unam.mx/Soft\\_Condensed\\_Matter/Papers/Physics\\_Today\\_DLA\\_Model\\_Pattern\\_Formation.pdf](http://nautilus.fisica.unam.mx/Soft_Condensed_Matter/Papers/Physics_Today_DLA_Model_Pattern_Formation.pdf)
- Hume D 1789: A Treatise of human nature <https://gutenberg.org/cache/epub/4705/pg4705-images.html>
- Jahn T 2005: Soziale Ökologie, kognitive Integration und Transdisziplinarität. TATuP-Zeitschrift für Technikfolgenabschätzung in Theorie und Praxis, 14(2), 32-38. [https://www.researchgate.net/publication/288942335\\_Soziale\\_Okologie\\_kognitive\\_Integration\\_und\\_Transdisziplinaritat\\_Zeitschrift\\_des\\_ITAS\\_zur](https://www.researchgate.net/publication/288942335_Soziale_Okologie_kognitive_Integration_und_Transdisziplinaritat_Zeitschrift_des_ITAS_zur)
- Jahn T 2013: Sozial-ökologische Forschung. Ein neuer Forschungstyp in der Nachhaltigkeitsforschung. In: Linne, G., & Schwarz, M. (Eds.). Handbuch nachhaltige Entwicklung: wie ist nachhaltiges Wirtschaften machbar? S. 545-555. Springer-Verlag.
- Jantsch E 1980: The Self-Organizing Universe: Scientific and Human Implications of the Emerging Paradigm of Evolution, New York: Pergamon Press, 1980. ISBN 0-08-024312-6
- Lang DJ, Wiek A, Bergmann M, Stauffacher M, Martens P, Moll P, Swilling M, Thomas CJ 2012: Transdisciplinary research in sustainability science: practice, principles, and challenges. Sustainability Science 7 (1), 25–43. <https://doi.org/10.1007/s11625-011-0149-x>
- MacLeod M 2018: What makes interdisciplinarity difficult? Some consequences of domain specificity in interdisciplinary practice. Synthese, 195(2), 697-720. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s11229-016-1236-4.pdf>
- Maturana HR, Varela FJ 1991: Autopoiesis and Cognition: The Realization of the Living. Springer Science & Business Media
- Müller F, Breckling B, Jopp F, Reuter H 2011: What are the general conditions under which ecological models can be applied. In Modelling complex ecological dynamics: An introduction into ecological modelling for students, teachers & scientists (pp. 13-28). Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg.
- Müller F, Bicking S, Ahrendt K, Bac DK, Blindow I, Fürst C, Haase P, Kruse M, Kruse T, Ma L, Perennes M, Ruljevic I, Schemewski G, Schimming CG, Schneiders A, Schubert H, Schumacher J, Tappeiner U, Wangai P, Windhorst W, Zeleny J 2020: Assessing ecosystem service potentials to evaluate terrestrial, coastal and marine ecosystem types in Northern Germany—An expert-based matrix approach. Ecological Indicators, 112, 106116. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106116>
- Myhr AI 2010: A precautionary approach to genetically modified organisms: challenges and implications for policy and science. Journal of Agricultural and Environmental Ethics, 23, 501-525. <https://doi.org/10.1007/s10806-010-9234-x>
- O'Connor T 2020: Emergent properties. <https://plato.stanford.edu/ENTRIES/properties-emergent/>
- Pan X, Dai J, Fan Y, Yang M 2024: Frontier AI systems have surpassed the self-replicating red line. Cornell University. Computer Science > Computation and Language [9 Dec 2024]. <https://arxiv.org/pdf/2412.12140>, <https://doi.org/10.48550/arXiv.2412.12140>.
- Scheffer M, Carpenter SR, Lenton TM, Bascompte J, Brock W, Dakos V, van de Koppel J, van de Leemput IA, Levin SA, van Nes EH, Pascual M., Vandermeer J 2012: Anticipating critical transitions. Science, 338(6105), 344-348. <https://www.science.org/doi/abs/10.1126/science.1225244>
- Shumailov I, Shumaylov Z, Zhao Y, Papemot N, Anderson R, Gal Y 2024: AI models collapse when trained on recursively generated data. Nature 631, 755–759. <https://doi.org/10.1038/s41586-024-07566-y>

- Silver D, Hubert T, Schrittwieser J, Antonoglou I, Lai M, Guez A, Lanctot M, Sifre L, Kumaran D, Graepel T, Lillicrap T, Simonyan K, Hassabis D 2018: A general reinforcement learning algorithm that masters chess, shogi, and Go through self-play. *Science* 362(6419), S. 1140–1144. doi:10.1126/science.aar6404
- Sinha S, Sridhar S 2014: *Patterns in excitable media: Genesis, dynamics, and control*. CRC Press.
- van den Ende J, Mulder K, Knot M, Moors E, Vergragt P 1998: Traditional and modern technology assessment: toward a toolkit. *Technological Forecasting and Social Change*, 58(1-2), 5-21. [https://doi.org/10.1016/S0040-1625\(97\)00052-8](https://doi.org/10.1016/S0040-1625(97)00052-8)
- Vittadello ST, Leyshon T, Schoerr D, Stumpf MP 2021: Turing pattern design principles and their robustness. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 379(2213), 20200272. <https://doi.org/10.1098/rsta.2020.0272>
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen 2011: *Hauptgutachten: Welt im Wandel – Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation*. Berlin. <https://www.wbgu.de/de/publikationen/publikation/welt-im-wandel-gesellschaftsvertrag-fuer-eine-grosse-transformation>
- Wittmayer J, Hölscher K 2017: *Transformationsforschung - Definitionen, Ansätze, Methoden*. Texte 103/2017, Umweltforschungsplan des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit. Forschungskennzahl 3714 17 100 0. Umweltbundesamt, Dessau-Roßlau.