



STEP 19

Thomas Heichele (Hg.)

Mensch – Natur – Technik

Philosophie für das Anthropozän

 **Aschendorff**  
Verlag

Thomas Heichele (Hrsg.)

Mensch – Natur – Technik

Studien zur systematischen Theologie, Ethik und Philosophie

Herausgegeben von  
Thomas Marschler und Thomas Schärtl

Band 19

Editorial Board

Klaus Arntz, Peter Hofmann, Thomas Marschler, Uwe Meixner,  
Thomas Schärtl, Christian Schröer, Uwe Voigt

Thomas Heichele (Hrsg.)

MENSCH – NATUR – TECHNIK

Philosophie für das Anthropozän

 **Aschendorff**  
Verlag

Münster  
2020

*Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek*

The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the Internet at <http://dnb.d-nb.de>

ISBN 978-3-402-11834-4

ISBN 978-3-402-11835-1 (E-Book PDF)

DOI <https://doi.org/10.17438/978-3-402-11847-4>



This work is licensed under the Creative Commons Attribution-NonCommercial-No-Derivatives 4.0 (CC BY-NC-ND) which means that the text may be used for non-commercial purposes, provided credit is given to the author. For details go to <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/> To create an adaptation, translation, or derivative of the original work and for commercial use, further permission is required.

Creative Commons license terms for re-use do not apply to any content (such as graphs, figures, photos, excerpts, etc.) not original to the Open Access publication and further permission may be required from the rights holder.

© 2020 Thomas Heichele (ed.) / the contributors.

A publication by Aschendorff Verlag GmbH & Co. KG, Münster

This book is part of the Aschendorff Verlag Open Access program.

[www.aschendorff-buchverlag.de](http://www.aschendorff-buchverlag.de)

# Inhalt

Einleitung .....	7
<i>Thomas Heichele</i>	
Philosophie im 21. Jahrhundert .....	9
<i>Reinhold Leinfelder</i>	
Das Anthropozän. Von der geowissenschaftlichen Analyse zur Zukunftsverantwortung .....	25
<i>Thomas Heichele</i>	
Das Spannungsfeld von Mensch, Technik und Natur aus Sicht der Philosophie. Von Ackerbau und Viehzucht zum Anthropozän .....	47
<i>Uwe Meixner</i>	
Natur und Vernunft im Anthropozän .....	67
<i>Uwe Voigt</i>	
Das Anthropozän als geistige Umweltkrise .....	85
<i>Uwe Voigt</i>	
Was tun im Anthropozän? Vom Umgang mit einer geistigen Umweltkrise ..	103
<i>Jens Soentgen</i>	
Der ökologische Naturbegriff .....	115
<i>Klaus Arntz</i>	
Technik, die unter die Haut geht – ethische Erwägungen .....	131
<i>Klaus Mainzer</i>	
Vom Anthropozän zur Künstlichen Intelligenz. Herausforderungen von Mensch und Natur durch Technik im 21. Jahrhundert .....	155
Autorenverzeichnis .....	169
Personenregister .....	171
Sachregister .....	176



# Vom Anthropozän zur Künstlichen Intelligenz

Herausforderungen von Mensch und Natur durch Technik  
im 21. Jahrhundert

KLAUS MAINZER

## Einführung

Anthropozän bezeichnet ein Zeitalter, in dem der Mensch mit seiner natürlichen Intelligenz zu einem der wichtigsten Einflussfaktoren auf die biologischen, geologischen und atmosphärischen Prozesse auf der Erde geworden ist. Aber leben wir nicht längst in einer beginnenden neuen Epoche, in der künstliche Intelligenz (KI) zunehmend autonom das Schicksal dieses Planeten bestimmt? So erleben wir bereits tagtäglich eine vernetzte Welt intelligenter Systeme: Energie-, Gesundheits- und Verkehrssysteme sind einige Beispiele intelligenter Systeme, die im Hintergrund längst durch KI unterstützt und gesteuert werden. Unsere Kommunikation findet weitgehend über digitale soziale Medien statt. Die zunehmende Komplexität menschlicher Zivilisation scheint nur noch durch IT und KI zu bewältigen sein.

Neben der Technik sind auch biologische Organismen Beispiele von intelligenten Systemen, die in der Evolution entstanden und selbstständig Probleme lösen können. Gelegentlich ist die Natur Vorbild für technische Entwicklungen von KI. Häufig finden Informatik und Ingenieurwissenschaften jedoch Lösungen, die anders und neuartig sind. Künstliche Intelligenz wird zu einer gesellschaftlichen Herausforderung, wenn sie unsere Lebens- und Arbeitswelt (z. B. Medizin, Märkte, Industrie 4.0) automatisiert. Aber auch die Bewahrung und den Schutz unseres Heimatplaneten Erde wird ohne die Unterstützung intelligenter Beobachtungs- und Frühwarnsysteme nicht mehr auskommen. Dieser Beitrag ist ein Plädoyer für Technikgestaltung: KI muss sich als Dienstleistung in Natur und Gesellschaft bewähren. Das wird insbesondere am Beispiel einer nachhaltigen Kreislaufwirtschaft deutlich.



## Komplexe Dynamik des Erdsystems

Das Erdsystem ist Beispiel eines komplexen dynamischen Systems. Komplexe Systeme bestehen aus vielen Elementen, deren Wechselwirkungen kollektive Ordnungen und Muster, aber auch Chaos und Turbulenz erzeugen. Die Gesetze dieser dynamischen Prozesse untersucht die Komplexitätsforschung – von komplexen atomaren, molekularen und zellulären Systemen in der Natur bis zu komplexen sozialen und wirtschaftlichen Systemen in der Gesellschaft (MAINZER 2007). Komplexitätsforschung beschäftigt sich fachübergreifend mit der Frage, wie durch die Wechselwirkung vieler Elemente eines komplexen Systems (z. B. Moleküle in Materialien, Zellen in Organismen oder Menschen in Märkten und Organisationen) Ordnungen und Strukturen entstehen können, aber auch Chaos und Zusammenbrüche.

Man spricht dann von „emergenten“ Eigenschaften komplexer Systeme, die nicht auf Verhalten der einzelnen Systemelemente zurückgeführt werden können. Komplexitätsforschung hat das Ziel, solche emergenten Eigenschaften in komplexen Systemen zu erkennen. So ist „feucht“ eine emergente Eigenschaft einer Flüssigkeit, die sich aus der kollektiven Wechselwirkung der vielen Flüssigkeitsmoleküle ergibt. Ein einzelnes Molekül ist nicht „feucht“. Von besonderem Interesse ist es in sozialen Systemen, Chaos, Spannungen und Konflikte zu erkennen und ihre Ursachen zu verstehen, um daraus Einsichten für neue Gestaltungspotentiale der Systeme zu gewinnen.

Dazu werden neue Grundbegriffe, Messmethoden, Modelle und Algorithmen eingeführt. So lassen sich kollektive Ordnungen durch Ordnungsparameter charakterisieren. Ordnungen entstehen ebenso wie Chaos und Zerfall in kritischen Zuständen, die von Kontrollparametern eines Systems empfindlich abhängen oder sich selber organisieren. Diese ausgezeichneten Zustände werden häufig auch Attraktoren genannt, da die dynamischen Entwicklungen eines Systems quasi wie in den Wasserstrudel eines Abgusses hineingezogen werden. Komplexe Muster von Zeitreihen und anderen Kriterien dienen dazu, im Vorfeld kritische Situationen aus Prozessdaten zu erkennen und rechtzeitig Vorkehrungen zu treffen. Dabei spielen Computermodelle eine entscheidende Rolle. Die dynamischen Prozesse komplexer Systeme in Natur und Gesellschaft lassen sich erst seit wenigen Jahren in Simulationsmodellen analysieren, die durch die gesteigerten Rechenkapazitäten von Computern möglich wurden.

Komplexität bestimmt die Wissenschaft des 21. Jahrhunderts. Die sich abzeichnenden Schlüsselthemen dieses Jahrhunderts haben mit diesen komplexen Prozessen zu tun. Globale Klimaveränderungen, Erdbeben und Tsunamis werden in Computermodellen komplexer dynamischer Systeme untersucht. Die Nanotechnologie entwickelt neue Materialien aus komplexen molekularen Strukturen. Wie konnte aus diesen „toten“ Bausteinen Leben entstehen? Im Laufe der chemischen

Evolution entstanden auf der Erde geeignete Makromoleküle, deren Wechselwirkung unter mehr oder weniger zufälligen Bedingungen kollektive Zelleinheiten mit Lebensfunktionen bildeten. Leben ist also eine emergente Eigenschaft biochemischer Systeme, die nicht durch ihre molekularen Bausteine alleine erklärt werden kann, sondern nur durch ihre Wechselwirkung. Die komplexen Netzwerke der molekularen Zellbausteine (z. B. Proteine) untersucht die Systembiologie in komplexen Computersimulationen. Sie arbeitet daher gewissermaßen an der Schnittstelle von der „unbelebten“ zur „belebten“ Natur. Die Gentechnologie analysiert DNA-Programme, die Zellen sich selber reproduzieren lassen. Dabei spielen wieder Zufallsfluktuationen eine Rolle, die als Mutationen zur Entstehung veränderter Organismen führen (MAINZER 2010).

Komplexe Prozesse bestimmen auch die moderne Medizin. Krankheiten wie z. B. Krebs, Herz-Kreislauf- und Gefäßerkrankungen hängen von hochkomplexen zellulären Wechselwirkungen ab. Viren mutieren und schaukeln sich zu globalen Infektionen auf, die sich wellenartig über den Erdball ausbreiten. Das Herz ist ein komplexes Organ aus Herzzellen, die elektrisch wechselwirken. Beim gesunden Menschen erzeugen die elektrischen Impulse ein kollektives Verhaltensmuster, das sich in den rhythmischen Zeitreihen der EKG-Daten niederschlägt. Diese Oszillation entspricht den Pumpbewegungen des Herzmuskels. Im Fall von Herzkammerflimmern bricht der kollektive Rhythmus zusammen, die elektrischen Impulse sind nicht mehr koordiniert und das Herz gerät in einen Chaosattraktor, aus dem es sich selber nicht mehr befreien kann. Defibrillatoren versuchen durch einen äußeren elektrischen Schock, das Herz wieder in sein altes Verhaltensmuster zu versetzen.

Komplexitätsforschung kann helfen, Gräben zwischen Natur-, Geistes- und Sozialwissenschaften zu überwinden. Vom Standpunkt der Komplexitätsforschung ist das Gehirn ein komplexes dynamisches System aus Milliarden von Nervenzellen. Seine komplexen Prozesse zeigen uns, wie aus den vielfältigen Wechselwirkungen seiner Elemente Ordnung und Struktur entstehen kann – der menschliche Geist mit seinen vielfältigen Fähigkeiten und Begabungen, aber auch mit seiner Gefährdung von Chaos, Desorientierung und Krankheit.

Auf der Mikroebene des Gehirns sind die Wechselwirkungsregeln der Neuronen einfach. Wie die Bitzustände in einem Computer kann jedes Neuron nach dem digitalen „Alles-oder-Nichts“-Prinzip nur „feuern“ oder „nicht feuern“, d. h. neurochemisch über Botenstoffe (Neurotransmitter) eine Oberflächenspannung der Zellmembran entladen oder ruhen und dabei durch Impulse benachbarter Neuronen eine Spannung aufbauen, die sich bei einer bestimmten Reizschwelle wieder entlädt. Feuern benachbarte Zellen immer wieder gleichzeitig, bauen sie ein kollektives Verschaltungsmuster auf, das in Computerbildern beobachtet werden kann. Die Neuropsychologie zeigt uns, dass unterschiedliche kollektive Muster solcher Neuronencluster mit mentalen Zuständen wie Wahrnehmung,

Denken, Bewusstsein und Emotionen verbunden sind. Hier sind wir also gewissermaßen an der Schnittstelle von Geistes- und Naturwissenschaften: Mentale Zustände sind emergente Eigenschaften des Gehirns. Das einzelne Neuron kann weder denken noch fühlen.

Organe wie Herz und Gehirn sind komplexe Systeme aus Zellen. Populationen sind komplexe Systeme von Organismen. Ökologische Systeme bestehen aus Populationen und vielen anderen Klima- und Umweltbedingungen. Während der Evolution hat sich ein komplexes System von Gleichgewichten zwischen Umwelt, Tier- und Pflanzenpopulationen entwickelt. Lokale Störungen (z. B. Aussterben von Tier- und Pflanzenarten) können sich im Sinn des Schmetterlingseffekts zu globalen Veränderungen (z. B. Störung der Nahrungskette) aufschaukeln.

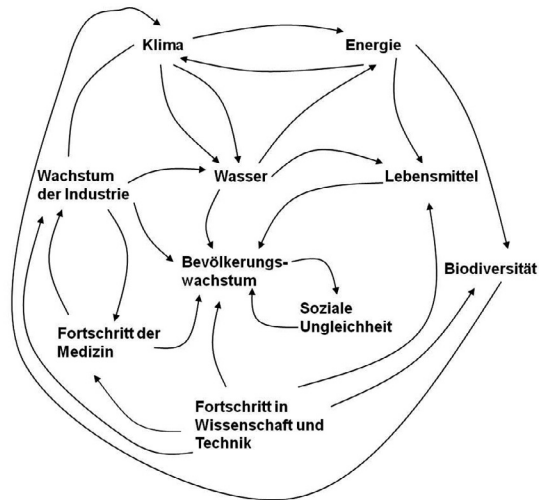


Abb. 1: Komplexe Rückkopplungen des Erdsystems

Ökologische Systeme sind selber Teil des gesamten Erdsystems, in dem Klima und natürliche Ressourcen mit der menschlichen Zivilisation verbunden sind (Abb. 1). Wachsende Erdbevölkerung, Anpassung der Lebensstile auch in Schwellen- und Entwicklungsländern führen zu einer immer stärker werdenden Übernutzung der Ressourcen und Verschmutzung von Wasser, Boden und Atmosphäre. In diesem komplexen System von Rückkopplungsschleifen lösen extreme lokale Störungen (z. B. Erdbeben, Tsunami, Nuklearkatastrophen) eine kaskadenhafte Ausbreitung von Effekten aus, die das gesamte System erschüttern (Abb. 2). Wir benötigen daher Frühwarnsysteme für Krisen und Katastrophen im komplexen Erdsystem. Natur, Umwelt und Leben lassen sich zwar aufgrund ihrer Komplexität nicht total berechnen und kontrollieren (EMBRECHT et al. 2003).

Wir können aber ihre Systemgesetze analysieren und verstehen, um die Selbstorganisation nachhaltiger Entwicklungen zu ermöglichen.

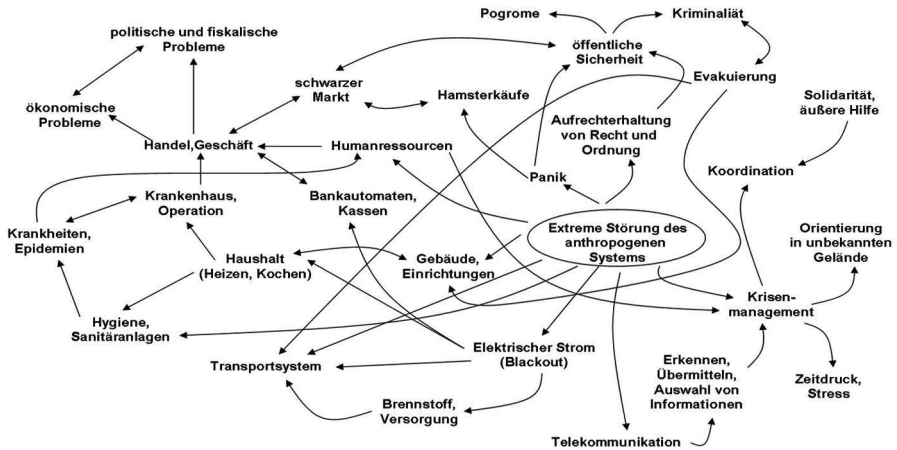


Abb. 2: Extreme lokale Störungen lösen in komplexen Systemen globale Krisen aus (Quelle: nach Albeverio u. a. 2006, Fig. 15.6).

## Chaos und Komplexität in Wirtschaft und Gesellschaft

Menschen agieren heute in komplexen Organisationen und Gesellschaften. Was wissen wir über deren Dynamik? Wie ist Handeln und Entscheiden in solchen komplexen Systemen möglich? Menschen verhalten sich in Gruppen und erzeugen dabei typische Verhaltensmuster, bauen soziale Ordnungen auf oder lassen das ganze System instabil werden und stürzen ins Chaos ab.

Bei sozialem Verhalten von Menschen stellen sich zwar bemerkenswerte Analogien mit Modellen der Natur (z. B. Schwarmintelligenz) heraus, die aber in anderer Hinsicht völlig verschieden sind. So sind bereits Börsendaten Messungen von subjektiven Glaubensannahmen, Meinungen und Hoffnungen, die Wirtschaftsdynamik beeinflussen, d. h. etwas verändert sich messbar, weil wir es wünschen, glauben, hoffen oder befürchten. Dabei kommt es zu charakteristischen Rückkopplungen zwischen Handelnden, ihren Absichten und Modellen sozialer Wirklichkeit. So können die Voraussagen des Vorstandsvorsitzenden eines DAX-Unternehmens über die Zukunft seiner Firma zu deutlichen Verhaltensveränderungen von Investoren und Mitarbeitern führen. Solche Rückkopplungen sind in der Naturwissenschaft nicht bekannt. Molekülen und Zellen ist es buchstäblich egal, wie wir sie modellieren und was wir über sie voraussagen. Wenn wir uns

solcher Rückkopplungen unserer Modelle bewusst sind, können sie durchaus zu wichtigen Einsichten für geeignete Entscheidungen beitragen.

Märkte und Unternehmen sind Beispiele für komplexe ökonomische Systeme, in denen Menschen in vielen ökonomischen Funktionen interagieren. In der Tradition des klassischen Liberalismus und analog zur klassischen Physik des 18. und 19. Jahrhunderts wurde häufig eine lineare Gleichgewichtsdynamik angenommen, nach der die freie Selbstorganisation ökonomischer Kräfte automatisch zum „Wohlstand der Nationen“ führt. Im Zeitalter der Globalisierung liegt den Finanz- und Wirtschaftsmärkten tatsächlich eine Nicht-Gleichgewichtsdynamik zugrunde, deren Phasenübergänge mit Turbulenzen und Chaos, aber auch neuen Innovationsschüben verbunden sind. Attraktoren komplexer Dynamik entsprechen wieder Ordnungsparametern und Potenzgesetzen zwischen Zufall und starrer Regularität. Damit kann Komplexitätsforschung Signale erkennen, um sich rechtzeitig auf wirtschaftliche Umbrüche und Chancen vorzubereiten.

## Von komplexen Systemen zur Künstlichen Intelligenz

Wie lassen sich komplexe Systeme berechnen? (MAINZER 2014) Dazu müssen wir uns über die Grundlagen des Berechenbarkeitsbegriffs klar werden. Mit der Turing-Maschine wurde 1936 ein theoretischer Prototyp für Berechenbarkeit und Entscheidbarkeit von Problemen definiert (TURING 1937). Turing veranschaulichte seine Definition durch ein Rechenband, das in Arbeitsfelder eingeteilt ist, die mit Symbolen eines endlichen Alphabets (z. B. 0 und 1 als Bits) bedruckt werden können. Das Rechenband soll nach beiden Seiten nach Bedarf verlängerbar sein, was der Annahme eines im Prinzip unbegrenzten Speichers entspricht. Das Band kann von einem Lese- und Schreibkopf ein Feld nach links und nach rechts verschoben werden. Zudem gibt es einen Stoppbefehl, wenn das Programm beendet ist.

Das Erstaunliche ist, dass bis heute jeder Laptop, jeder Supercomputer und jedes Smartphone durch Turing-Maschinen simuliert werden kann. Nach einer These von Alonzo Church ist daher jeder Algorithmus bzw. jedes Computerprogramm durch eine Turing-Maschine simulierbar. Diese sogenannte Churchsche These ist das einzige Axiom, das die Informatik zusätzlich zu den übrigen Axiomen der Mathematik benötigt. Darauf baut theoretisch die gesamte Digitalisierung auf.

Ein Problem heißt Turing-entscheidbar, wenn seine Lösung durch eine Turing-Maschine (bzw. nach der Churchsche These durch einen äquivalenten technischen Computer) berechnet werden kann. Um aber Prozesse dynamischer Systeme zu erfassen, müssen Komplexitätsgrade der Turing-Berechenbarkeit untersucht werden. Komplexitätsgrade berücksichtigen z. B. die zeitliche Länge,

den benötigten Speicherplatz und in der Technik auch den Energieaufwand. Es ist offensichtlich, dass die Komplexitätstheorie eine erhebliche technisch-ökonomische Bedeutung hat. Auf den Grundlagen von Algorithmen und komplexen dynamischen Systemen bauen nicht nur Modellierungen der Natur, sondern die Innovationen unserer Technik auf.

Künstliche Intelligenz (KI) beherrscht längst unser Leben, ohne dass es vielen bewusst ist. Smartphones, die mit uns sprechen, Armbanduhren, die unsere Gesundheitsdaten aufzeichnen, Arbeitsabläufe, die sich automatisch organisieren, Autos, Flugzeuge und Drohnen, die sich selbst steuern, Verkehrs- und Energiesysteme mit autonomer Logistik oder Roboter, die ferne Planeten erkunden, sind technische Beispiele einer vernetzten Welt intelligenter Systeme. Sie zeigen uns, wie unser Alltag von KI-Funktionen bestimmt ist.

Turing definierte 1950 in dem nach ihm benannten Test ein System dann als intelligent, wenn es in seinen Antworten und Reaktionen nicht von einem Menschen zu unterscheiden ist (TURING 1950). Der Nachteil dieser Definition ist, dass der Mensch zum Maßstab gemacht wird.

Auch biologische Organismen sind nämlich Beispiele von intelligenten Systemen, die wie der Mensch in der Evolution mehr oder weniger zufällig entstanden und mehr oder weniger selbstständig Probleme effizient lösen können. Dass unser Organismus mit seinen Muskeln, Sensoren und Gehirn, aber auch mit unserem Denken und Fühlen so ist, wie er ist, ergibt sich keineswegs notwendig. Aus Computerexperimenten wissen wir, dass nur bei leichten Veränderungen der Anfangs- und Nebenbedingungen auf dieser Erde die Evolution nicht noch einmal so ablaufen würde, wie wir sie heute kennen. Es gibt also gesetzmäßig mögliche Entwicklungsbäume, von denen die biologische Evolution auf unserer Erde nur einige ausprobiert hat.

Gelegentlich ist die Natur zwar Vorbild für technische Entwicklungen (z. B. in der Bionik). Häufig finden Informatik und Ingenieurwissenschaften jedoch Lösungen, die anders und sogar besser und effizienter sind als in der Natur. Es gibt also nicht „die“ Intelligenz, sondern Grade effizienter und automatisierter Problemlösungen, die von technischen oder natürlichen Systemen realisiert werden können.

Daher nenne ich (in einer vorläufigen Arbeitsdefinition) ein System dann intelligent, wenn es selbstständig und effizient Probleme lösen kann (MAINZER 2019). Der Grad der Intelligenz hängt vom Grad der Selbstständigkeit des problemlösenden Systems, dem Grad der Komplexität des Problems und dem Grad der Effizienz des Problemlösungsverfahrens ab. Bewusstsein und Gefühle wie bei Tieren (und Menschen) gehören danach nicht notwendig zu Intelligenz. Sollten diese Kriterien nicht ausreichen, kann ihre Liste gerne erweitert werden. Daher spreche ich von einer Arbeitsdefinition.

Hinter dieser Definition steht die Welt lernfähiger Algorithmen, die mit exponentiell wachsender technischer Rechenkapazität (nach dem Mooreschen Gesetz) immer leistungsfähiger werden. Sie steuern die Prozesse einer vernetzten Welt im Internet der Dinge. Ohne sie wäre die Datenflut nicht zu bewältigen, die durch Milliarden von Sensoren und vernetzten Geräten erzeugt werden. Auch Forschung und Medizin benutzen zunehmend intelligente Algorithmen, um in einer wachsenden Flut von Messdaten neue Gesetze und Erkenntnisse zu entdecken.

Vor einigen Jahren schlug der Superrechner DEEP BLUE von IBM menschliche Champions in Schach, kurz darauf WATSON in einem sprachlichen Frage- und Antwortwettbewerb. In beiden Fällen war der Supercomputer im Sinn der Churchsches These eine Art Turing-Maschine. Im Fall von WATSON zerlegen parallel arbeitende linguistische Algorithmen eine Frage in ihre Teilphrasen, um die Wahrscheinlichkeit möglicher Antwortmuster zu berechnen. Dabei wird allerdings ein gigantischer Speicher („Gedächtnis“) benutzt, den das menschliche Gehirn nicht realisieren kann – wie etwa das gesamte Internet.

2016 wartete GOOGLE mit der Software AlphaGo und einem Supercomputer auf, der menschliche Champions im Brettspiel Go schlug. Daran ist nicht nur bemerkenswert, dass Go wesentlich komplexer als Schach ist. Hier kamen zum ersten Mal Lernalgorithmen (machine learning) nach dem Vorbild des menschlichen Gehirns zum Einsatz, die den Durchbruch ermöglichten. Genauer gesagt handelt es sich um verstärkendes Lernen (reinforcement learning), das aus der Robotik und den Ingenieurwissenschaften wohlbekannt ist (BISHOP 2006): Das System erhält beim Problemlösen in festen Zeitintervallen Rückmeldungen (rewards), wie gut oder wie schlecht es dabei ist, ein Problem zu lösen. Das System versucht dann seine Strategie zu optimieren. Im Fall von Go wurden nur die einfachen Grundregeln programmiert. Nach ersten verlorenen Spielen, trainierte das System quasi über Nacht mit Tausenden von Spielen, die es blitzschnell gegen sich selber spielte. Damit hatte es schließlich eine Spielerfahrung angesammelt, von der selbst die GOOGLE-Programmierer von AlphaGo überrascht waren.

Noch einen Schritt weiter geht 2017 ein Superrechner der Carnegie-Mellon University mit der Software Poker-Libratus. Poker wurde immer als uneinnehmbare Festung menschlicher Raffinesse angesehen, da hier doch – so das Argument – „Intuition“ und „Emotion“, eben das „Pokerface“, zum Einsatz kommen. Zudem ist Poker im Unterschied zu Schach und Go ein Spiel mit unvollständiger Information.

Libratus wendet wieder das verstärkende Lernen an, diesmal aber unter Ausnutzung hochentwickelter mathematischer Spiel- und Wahrscheinlichkeitstheorie (SANDHOLM 2010). So werden in den Spielbäumen der Entscheidungen solche Entwicklungsäste zeitweilig „ausgeschnitten“ (pruning) bzw. ausgeschlossen, die Aktionen mit schlechter Performance beinhalten. Das kann sich natürlich in



späteren Spielverläufen für die jeweiligen Spieläste ändern. Jedenfalls führt „Pruning“ zu einer erheblichen Zeitersparnis und Beschleunigung der Algorithmen, wenn das Programm nicht mehr alle möglichen Spielzüge blind durchforsten muss. Nur Aktionen, die Teil einer besten Antwort auf ein Nash-Gleichgewicht sind, werden akzeptiert (NASH 1950).

Libratus ist dem Menschen nicht nur in der blitzschnellen statistischen Auswertung ungeheuer vieler Daten überlegen. Nachdem das System zunächst wie ein Anfänger das Spiel verloren hatte, spielte es quasi über Nacht Millionen von „Hands“ gegen sich selber, es lernte und übte und hatte schließlich einen Erfahrungsstand, der in einem Menschenleben nicht erreicht werden kann. Hinter der von einigen Psychologen so vielgerühmten menschlichen Intuition verbergen sich ebenfalls frühere Lernerfahrungen – nur im Umfang deutlich ärmlicher als in dieser höchst effizienten Software mit Datenmassen von Spielen und menschlichem Verhalten, die im Gehirn eines menschlichen Spielers nicht verarbeitet werden können.

Man mag einwenden, dass es „nur“ raffinierte Mathematik plus gigantische Computertechnologie ist, die den Menschen schlagen. Wenn aber solche Software in absehbarer Zeit auch z. B. in allen möglichen Entscheidungssituationen der Technik, Wirtschaft und Politik mit unvollständiger Information zum Einsatz kommt, dann werden wir mit unserer menschlichen Intuition alt aussehen: Die Entscheidungen werden – wie heute bereits im Flashtrade an der Börse – in Intervallen von Millisekunden getroffen werden können, ohne dass unser Gehirn in der Lage wäre, sie mit zu vollziehen. Daher sollten wir uns die Grundlagen diese Algorithmen genau ansehen, um ihre Möglichkeiten und Grenzen zu bestimmen. Zudem ist menschliche Intuition von typisch menschlichen Erfahrungen und Empfindungen abhängig, die wir für wertvoll halten und bewahrt wissen wollen. Das führt zu einer ethischen Perspektive von Technik, die über die erkenntnistheoretischen Fragen und den technischen Einsatz von KI hinausführt.

Der derzeitige Hype der Künstlichen Intelligenz wird durch die gestiegene Rechenkapazität von Computern möglich, die Machine Learning realisieren kann. Im Machine learning spielen neuronale Netze nach dem Vorbild des menschlichen Gehirns eine dominante Rolle. Der Durchbruch der KI-Forschung in der Praxis hängt wesentlich mit der Fähigkeit neuronaler Netze zusammen, große Datenmengen (Big Data) z. B. bei der Mustererkennung, beim autonomen Fahren, in der Robotik und in Industrie 4.0 mit effektiven Lernalgorithmen anzuwenden. Obwohl die technische Zivilisation zunehmend von diesen KI-Algorithmen abhängt, sind sie mit erheblichen Sicherheitsrisiken verbunden.

Praktische Anwendungen erfordern Tausende von Neuronen und Synapsen in mehrschichtigen neuronalen Netzen (deep learning), die statistisch nur mit endlich vielen Datensätzen von Inputs und Outputs trainiert werden: Man setzt auf die statistischen Erwartungswahrscheinlichkeiten von gewünschten Outputs



(z. B. Bewegungsverhalten von Robotern, Automobilen und Flugzeugen), die durch geeignete Trainingsdaten erreicht werden sollen. Niemand durchschaut aber bzw. kann im Einzelnen kontrollieren, was in den nichtlinearen Wechselwirkungen der Neuronen und Synapsen zwischen Inputs und Outputs abläuft. Daher sind diese neuronalen Netze für Anwender und Entwickler „Schwarzen Kästen“ (Black Boxes), die grundlegende Fragen der Sicherheit, des Vertrauens in Technik und der Verantwortung aufwerfen. Daher sind Verifikationsverfahren erforderlich, mit denen Sicherheitsstandards von neuronalen Netzen berechnet und garantiert werden können (MAINZER 2020). Sie sind eine notwendige Bedingung für Fragen der Sicherheit, Ethik und Verantwortung.

Künstliche neuronale Netze sind zwar äußerst effektiv, um komplexe Probleme (real world problems) zu bearbeiten (MAINZER 2019). Was aber fehlt, sind Spezifikationen und Standards für die Sicherheit ihrer Outputs. Dazu muss die Black Box neuronaler Netze besser verstanden, kontrolliert und verifiziert werden. Die Verifikation neuronaler Netze ist allerdings ein hartes Erkenntnisproblem: Es gibt keine allgemeinen Sicherheitsverfahren, die im Rahmen der Komplexitätstheorie der Informatik NP-vollständig, also praktisch nicht realisierbar sind. Gründe dafür sind die Größe der praktisch angewendeten Netze (Skalierung) und die nichtlinearen Aktivierungsfunktionen ihrer Neuronen, die von Menschen in diesem Umfang und mit dieser Geschwindigkeit nicht nachvollzogen werden können. Da neuronale Netze zudem der Dynamik komplexer Systeme unterliegen, sind sie häufig empfindlich gegen kleine Störungen und Veränderungen ihrer Inputs, die sich zu unkontrollierbaren Effekten aufschaukeln können. Robustheit und Stabilität der Netze hängt also mit ihrer Sicherheit eng zusammen.

Allerdings kann wenigstens für Teilklassen von neuronalen Netzen Sicherheit entschieden und bewiesen werden. Grundlage der Verifikationsverfahren sind unterschiedliche logisch-mathematische Theorien wie z. B. Aussagen- und Prädikatenlogik, lineare Arithmetik und Algebra, Optimierungstheorie. Welcher dieser Verfahren der Vorzug gegeben werden soll, hängt davon ab, a) bis zu welchem Grad sie die hohe Skalierung und Nichtlinearität praktischer Anwendungen bewältigen können und b) mit welcher zeitlichen und wirtschaftlichen Effizienz die entsprechenden Algorithmen der Verifikationsverfahren arbeiten. Methodisch erstrebenswert ist eine vereinigte Metatheorie, in der die verschiedenen Ansätze der Verifikationen durch gemeinsame Metatheoreme charakterisiert werden könnten (MAINZER 2018). Jedenfalls kann erst auf dieser methodischen Grundlage eine verantwortungsvolle Zertifizierung von KI-Programmen vorgenommen werden. KI-Geräte, die unseren Alltag durchdringen, müssen am Ende mit ähnlichen Sicherheitsstandards belegt werden können, wie wir sie bereits seit vielen Jahren für andere technische Geräte kennen (z. B. nationale DIN-Norm und international ISO-Norm).

Unabhängig davon sind die Fragen der Verifikation, Standardisierung und Zertifizierung der KI mit grundlegenden Fragen der Erkenntnistheorie verbunden. Es zeigt sich, dass für klar definierte Grundlagen, Rand- und Nebenbedingungen von mathematisierten Theorien ihre Reichweite und ihre Grenzen bestimmbar sind. Wenn sich in dieser Weise die logisch-mathematischen Grundlagen von Machine learning und künstlicher Intelligenz bestimmen lassen, dann ist die darauf beruhende Technik auch besser kontrollierbar und bleibt nicht länger eine „Black Box“. Das Plädoyer für mehr und bessere Grundlagenforschung ist also zugleich eine notwendige Bedingung für verantwortungsvolle Künstliche Intelligenz.

### Chaos und Komplexität in Kommunikations- und Versorgungssystemen

In der biologischen Evolution bildeten sich Kommunikationssysteme von Tierpopulationen heraus, um die Interaktion untereinander zu ermöglichen. Kommunikation in der Evolution reicht von neurochemischen Signalen in Insektenpopulationen bis zum artikulierten Gesang von Vögeln. Primaten, die mit Ästen Alarm schlugen, benutzten erstmals Werkzeuge zur Nachrichtenübertragung. Nach Trommeln, Rauchzeichen, Morsen und Telefonnetzen kommunizieren wir heute in Computernetzen wie dem Internet. Es ist mittlerweile das komplexe Nervensystem einer globalisierten Welt, in der wir Nachrichten in Echtzeit (d. h. mit Lichtgeschwindigkeit) austauschen.

Das Internet zerfällt aber nicht nur in die Summe einzelner vernetzter Computer. Mit plattformunabhängigen Computersprachen wie z. B. Java ist das Netz selber ein gigantischer Computer, in dem die Menschheit wie in einem Superhirn ihre Dokumente speichert und multimedial animiert. Ende der 1980er Jahre prophezeite Mark Weiser von der Firma Xerox den Trend zu einer komplex vernetzten Gesellschaft, in der eine Vielzahl von einfachen Endgeräten den Alltag der Menschen unterstützen. Diese virtuelle Welt des „Ubiquitous Computing“ ist längst Wirklichkeit. In einem nächsten Schritt verbinden sich intelligente Informationssysteme mit der komplexen Infrastruktur unserer globalen Welt (MAINZER 2016). Die Rede ist von „Cyberphysical Systems“ (CPS), die sich nicht nur durch eine starke Kopplung von physischem Anwendungsmodell und dem Computer-Steuerungsmodell auszeichnen, sondern auch in die Arbeits- und Alltagsumgebung eingebettet sind (z. B. integrierte intelligente Energieversorgungssysteme von Ländern und Erdteilen).

CPS bestehen aus vielen vernetzten Komponenten, die sich selbständig untereinander für eine gemeinsame Aufgabe koordinieren. Sie sind damit auch mehr als die Summe der vielen unterschiedlichen smarten Kleingeräte im Ubiquitous

Computing, da sie Gesamtsysteme aus vielen intelligenten Teilsystemen mit integrierenden Funktionen für bestimmte Ziele und Aufgaben (z. B. effiziente Energieversorgung) realisieren.

Ein erstes Beispiel sind intelligente Stromnetze (smart grids), die neben dem herkömmlichen Stromtransport auch Datenkommunikation erlauben, um den Anforderungen für einen hochkomplexen Netzbetrieb zu genügen (Abb. 3). Der Trend geht zu globalen und länderübergreifenden Netzstrukturen, in dem Blockheizkraftwerke zur Erzeugung von Strom aus fossiler Primärenergie ebenso vertreten sind wie erneuerbare Quellen mit Photovoltaikanlagen, Windkraftanlagen, Biogasanlagen. Verbraucher wie z. B. Wohnhäuser oder Büroanlagen können mit Voltaikanlagen zugleich lokale Stromerzeuger sein, die sich selbst oder ihre Umgebung mit Energie versorgen. Die Diversität dieser Netze ist eine Herausforderung für die Komplexitätsforschung.

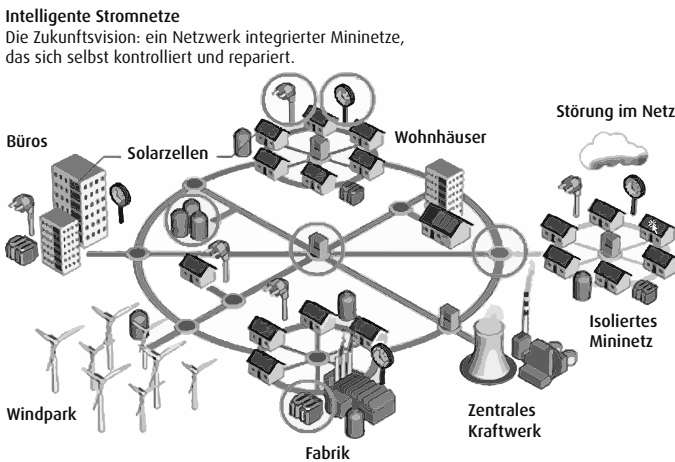


Abb. 3: Komplexes Netzwerk eines Smart Grid (Quelle: Greenpeace)

Eine zentrale Forderung für nachhaltiges Wirtschaften ist die Umwandlung in eine Kreislaufwirtschaft, in der alle Produktions- und Verbrauchsgüter energie- und umweltschonend wieder in den Güterkreislauf zurückgeführt werden. Dabei wird eine nachhaltige Lösung des Energieproblems zur Voraussetzung von Digitalisierung und Künstlicher Intelligenz, die enormen Energieverbrauch voraussetzen. Insofern muss eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft den Energieverbrauch der Digitalisierung zunächst sichern. Umgekehrt lässt sich aber eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft wegen der Komplexität ihrer Wechselwirkungen nur durch IT und KI effektiv realisieren. Zusammengefasst gilt also: Digitalisierung durch nachhaltige Kreislaufwirtschaft und nachhaltige Kreislaufwirtschaft durch Digitalisierung!

## Was lernen wir aus der Dynamik komplexer Systeme?

Zusammenfassend stellen wir fest: Die Theorie komplexer dynamischer Systeme untersucht nichtlinearer Prozesse in Natur und Gesellschaft. Als Beispiele seien die Herausforderungen der Globalisierung, von Umwelt und Klima, Life Sciences und Informationsflut genannt. Veränderungen, Krisen, Chaos, Innovations- und Wachstumsschübe werden durch Phasenübergänge in kritischen Zuständen modelliert. Ziel sind Erklärungen und Prognosen dieser Prozesse, aber auch Frühwarnsysteme für extreme Störungen. Selbstorganisation ist zwar notwendig, um die zunehmende Komplexität dieser Entwicklung zu bewältigen. Sie kann aber auch zu unkontrollierbarer Eigendynamik und Chaos führen. In komplexen dynamischen Systemen bedarf es daher Monitoring und Controlling. Die Natur hat uns das in der Evolution der Organismen gezeigt. Das gilt auch für technische, soziale und ökonomische Systeme. Ziel sind nachhaltige Infrastrukturen als Dienstleistung für uns Menschen, die helfen, eine immer komplexer werdende Welt zu bewältigen und lebenswerter zu gestalten. Dazu werden wir eine verantwortungsvolle KI benötigen.

### Literatur

- ALBEVERIO, Sergio / JENTSCH, Volker / KANTZ, Holger (Hrsg.): *Extreme Events in Nature and Society*. Berlin 2006.
- BISHOP, Christopher M.: *Pattern Recognition and Machine Learning*. Singapore 2006.
- EMBRECHTS, Paul / KLÜPPELBERG, Claudia / MIKOSCH, Thomas (Hrsg.): *Modeling Extreme Events*. 4. Auflage. Berlin 2003.
- MAINZER, Klaus: *Thinking in Complexity. The Computational Dynamics of Matter, Mind, and Mankind*. 5. Auflage. New York 2007.
- MAINZER, Klaus: *Leben als Maschine? Von der Systembiologie zur Robotik und künstlichen Intelligenz*. Paderborn 2010.
- MAINZER, Klaus: *Die Berechnung der Welt. Von der Weltformel zu Big Data*. München 2014.
- MAINZER, Klaus: *Information. Algorithmus – Wahrscheinlichkeit – Komplexität – Quantenwelt – Leben – Gehirn – Gesellschaft*. Berlin 2016.
- MAINZER, Klaus: *Wie berechenbar ist unsere Welt. Herausforderungen für Mathematik, Informatik und Philosophie im Zeitalter der Digitalisierung*, Wiesbaden 2018.
- MAINZER, Klaus: *Künstliche Intelligenz – Wann übernehmen die Maschinen?* 2. Auflage. Berlin 2019.

- MAINZER, Klaus: *Verifikation und Sicherheit für Neuronale Netze und Machine Learning*. In: MAINZER, Klaus (Hrsg.): *Philosophisches Handbuch der Künstlichen Intelligenz*. Berlin 2020 (im Druck).
- NASH, John: *Equilibrium points in  $n$ -person games*. In: *Proceedings of the National Academy of Sciences* 36 1950, S. 48–49.
- SANDHOLM, Tuomas: *The state of solving large incomplete-information games, and application to poker*. In: *AI Magazine* 31 (4) 2010, S. 13–32.
- TURING, Alan M.: *On computable numbers, with an application to the Entscheidungsproblem*. In: *Proc. London Math. Soc.* 2 42 1937, S. 230–265, Korrektur dazu 43 1937, S. 544–546.
- TURING, Alan M.: *Computing Machinery and Intelligence*. In: *Mind*. LIX, Nr. 236 (1950), S. 433–460.

## AUTORENVERZEICHNIS

- PROF. DR. KLAUS ARNTZ ist Inhaber der Professur für Angewandte Ethik am Institut für Philosophie der Universität Augsburg sowie Mitglied der Ethik-Kommission der Universität Augsburg.
- DR. THOMAS HEICHELE ist wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Philosophie mit Schwerpunkt analytische Philosophie und Wissenschaftstheorie an der Universität Augsburg.
- PROF. DR. REINHOLD LEINFELDER ist Professor für Paläontologie und Geobiologie und Leiter der AG Geobiologie und Anthropozän-Forschung an der Freien Universität Berlin sowie Mitglied der Anthropocene Working Group der International Commission on Stratigraphy.
- PROF. DR. KLAUS MAINZER ist Emeritus of Excellence und Gründungsdirektor des Munich Center for Technology in Society (MCTS) an der Technischen Universität München (TUM) sowie Seniorprofessor am Carl Friedrich von Weizsäcker Center für Grundlagenforschung der Eberhard Karls Universität Tübingen.
- PROF. DR. UWE MEIXNER ist ständiger wissenschaftlicher Mitarbeiter im Professorenrang am Lehrstuhl Philosophie mit Schwerpunkt analytische Philosophie und Wissenschaftstheorie an der Universität Augsburg sowie Lehrbeauftragter an der Hochschule für Philosophie in München.
- PD DR. JENS SOENTGEN ist wissenschaftlicher Leiter des Wissenschaftszentrums Umwelt der Universität Augsburg sowie Adjunct Professor of Philosophy an der Memorial University in St. John's, Kanada.
- PROF. DR. UWE VOIGT ist Inhaber des Lehrstuhls Philosophie mit Schwerpunkt analytische Philosophie und Wissenschaftstheorie an der Universität Augsburg, Adjunct Professor of Philosophy an der Memorial University in St. John's, Kanada, sowie Affiliated Professor am Department of Education der Universität Warschau.



## PERSONENREGISTER

- Ach, Johann S. 148, 150  
Ackeren, Marcel van 24  
Adams, John 25  
Adorno, Theodor W. 140  
Albert, Hans 13, 23  
Albeverio, Sergio 159, 167  
Allen, Mark R. 32, 38  
Almond, Rosamunde 28  
Alsberg, Paul 60, 62  
Anaximander 80  
Anaximenes 80  
Aristoteles 49, 53–55, 58, 62 f.  
Arntz, Klaus 8, 97, 150
- Bacon, Francis 55 f., 58, 63, 87, 108  
Baier, Tina 128  
Balík, Vojtěch 108, 111  
Barnosky, Anthony D. 28, 30, 38  
Bar-on, Yinon M. 28, 38  
Bartels, Andreas 15, 23 f.  
Bayertz, Kurt 136 f., 150  
Bellone, Enrico 56, 63  
Benjamin, Walter 62 f.  
Bennett, Maxwell R. 14 f.  
Bentham, Jeremy 143, 150  
Biller-Andorno, Nikola 146 f., 151  
Birnbacher, Dieter 62 f.  
Bischoff, Alena 93, 100  
Bishop, Christopher M. 162, 167  
Bloch, Ernst 87, 100  
Böckle, Franz 143, 150  
Böhme, Gernot 87, 95, 100, 105, 112, 133, 139–141, 143, 149 f.  
Böhme, Hartmut 136 f., 150
- Bohr, Niels 23  
Boldt, Joachim 146, 150  
Bostrom, Nick 61, 63  
Boussingault, Jean-Baptiste 119, 128  
Boyle, Robert 115  
Brown, Antony Gavin 30, 39  
Brown, Joel S. 128  
Brundtland, Gro Harlem 33  
Brüntrup, Godehard 20, 85, 91–93, 95, 100  
Burton, Reginald George 128
- Cardwell, Donald 56, 63  
Cassirer, Ernst 49–51, 55, 59, 61–63  
Ceballos, Gerardo 28, 39  
Chalmers, David J. 94, 100  
Chaniotis, Angelos 133, 150  
Clarival, Caroline 146 f., 151  
Clauberg, Johannes 125, 128  
Clinchy, Michael 128  
Coenen, Christopher 147, 150  
Comenius, Johann Amos 107–112  
Crombie, Alistair C. 55  
Crutzen, Paul 26 f., 39
- Darwin, Charles 76  
Davis, Heather 105, 112  
Deléage, Jean-Paul 128  
Descartes, René 87, 108  
Detel, Wolfgang 125 f., 128  
Dilthey, Wilhelm 125  
Dixon, Dougal 25  
Drake, Stillman 56, 63  
Dumas, Jean-Baptiste 119, 128



*Personenregister*

- Eckart, Wolfgang U. 142, 151  
Eckoldt, Matthias 126, 128  
Ehlers, Eckart 86, 100  
Ehrlich, Anne H. 128  
Ehrlich, Paul Ralph 128  
Einstein, Albert 23, 124  
Elliot, Robert 103, 112  
Ellis, Earle C. 28, 30, 39  
Embrecht, Paul 158  
Emondts, Stefan 142, 151  
Engel, Gisela 49, 52, 64  
Esfeld, Michael 16, 20, 23
- Fant, Kenne 120, 128  
Fehrenbach, Frank 55, 64  
Fischer, Nele 35, 39  
Fletcher, Joseph 138, 151  
Floridi, Luciano 57, 64  
Frege, Gottlob 70  
Friederichs, Karl 121, 128  
Friederici, Georg 128  
Fuhr, Lili 29, 39  
Fukuyama, Francis 106, 112, 137, 151  
Funke, Peter 133, 151
- Galilei, Galileo 55 f.  
Gallee, Martin Arnold 49–51, 61, 64  
Ganguli Mitra, Agomoni 146 f., 151  
Gatzemeier, Matthias 48, 64  
Gebaattel, Viktor E. von 142  
Gehlen, Arnold 51, 58, 60, 62, 64  
Gettier, Edmund 13, 23  
Geyer, Roland A. 28 f., 39  
Ghosh, Amitav 99 f.  
Göbel, Richard 57  
Goff, Philip 85, 91–93, 95, 100  
Gottl-Ottlilienfeld, Friedrich von  
    48 f., 52, 64  
Grawe, Christian 148, 151  
Griggs, David 33, 39  
Grzimek, Bernhard 124
- Grooten, Monique 28, 39  
Grundmann, Thomas 13, 23  
Grunwald, Armin 131 f., 151  
Grupe, Gisela 52, 64  
Gurung, Mahesch 128
- Hacker, Peter M. S. 14 f.  
Haeckel, Ernst 116 f., 128  
Hamann, Alexandra 31, 39  
Hart, Donna 128  
Hartlaub, Gustav F. 117, 128  
Haum, Rüdiger 29  
Hawking, Stephen 13, 23  
Hediger, Heini 124 f., 128  
Heichele, Thomas 7, 18, 22 f., 47–49,  
    51, 53, 55 f., 58 f., 61, 64, 98  
Heidegger, Martin 61 f., 64, 104, 112  
Heine, Heinrich 83  
Heisenberg, Werner 23  
Helbig, Björn 35, 40  
Henke, Winfried 52, 64  
Henrich, Dieter 141, 145, 151  
Herder, Johann Gottfried 60, 64  
Höffe, Otfried 53 f., 65  
Horkheimer, Max 140  
Hösle, Vittorio 88, 100  
Höver, Gerhard 143, 151  
Hoyningen-Huene, Paul 16, 20, 24  
Hubig, Christoph 47–50, 62, 65  
Huggert, Richard John 129  
Hugo von Sankt Viktor 58, 60, 65  
Huis, Arnold van 36, 40  
Hume, David 18, 75, 77 f., 84  
Hunecke, Marcel 34, 40  
Huntington, Samuel 106, 112  
Hüttemann, Andreas 16, 24
- Ilitschewski, Alexander 143, 151  
Illies, Christian 9, 12, 18 f., 24, 53, 65  
Ivar do Sul, Juliana A. 29

*Personenregister*

- James, William 94  
Janich, Peter 48, 65  
Jentsch, Volker 167  
Johnstone, Japhet 105, 113  
Jonas, Hans 117 f., 129, 135, 151  
Jaskolla, Ludwig 93, 100  
Jaspers, Karl 142  
Jungert, Michael 21, 24
- Kant, Immanuel 15 f., 20, 24, 78, 117,  
135, 139, 141, 151  
Kantz, Holger 167  
Kapp, Ernst 47, 58–60, 65  
Kappeller, Peter 126, 129  
Karafyllis, Nicole C. 49, 52, 62, 65,  
148, 152  
Kelly, Kevin 133  
Kemp, Martin 55, 65  
Kettner, Matthias 147, 152  
Kläden, Tobias 144, 152  
Klein, Stefan 55, 65  
Klemme, Heiner 24  
Knodt, Reinhard 99 f., 105, 112  
Kobusch, Theodor 24  
Kocka, Jürgen 21  
Kolany-Raiser, Barbara 57, 65  
Koyré, Alexandre 56, 65  
Krauss, Lawrence M. 13, 24  
Krausse, Joachim 36, 40  
Kröger, Bernward 8  
Krohn, Wolfgang 48, 56, 65  
Krüger, Lorenz 21, 24  
Kuhlemann, Anne-Kathrin 36, 40  
Kurzweil, Ray 138, 152
- Latour, Bruno 86, 91, 97 f., 100, 110,  
112  
Laundré, John 128  
Lebacqz, Karen 146, 152  
Leinfelder, Reinhold 7, 25–30, 33–38,  
40–42, 57, 86
- Lenzen, Manuela 57, 65  
Leonardo da Vinci 55 f., 58 f., 61, 65  
Leroy, Karl Georg 123, 129  
Levine, Robert J. 146, 152  
Lewandowsky, Stephen 26, 42  
Liebender, Anna-Sophie 37, 42  
Liebig, Justus von 119, 129  
Lischewski, Andreas 110, 112  
Lobe, Adrian 133, 135, 152  
Loh, Janina 61, 65  
Lorenz, Konrad 123 f., 129  
Lovelock, James 97 f., 101, 104, 112
- Mainzer, Klaus 8, 57 f., 65, 156 f.,  
160 f., 164 f., 167 f.  
Malebranche, Nicolas 77  
Margullis, Lynn 97, 101  
Markl, Hubert 27  
Martin-Jung, Helmut 152  
Mau, Steffen 133 f., 152  
McGrath, Sean 98, 101  
McNeill, John R. 129  
Meadows, Dennis 137, 152  
Meier, Christian 133, 152  
Meixner, Uwe 7, 17, 24, 79, 83 f., 90  
Menzel, Randolf 126, 128  
Mieth, Dietmar 143, 152  
Mittelstrass, Jürgen 50, 55, 65  
Mlodinow, Leonard 13, 23  
Möllers, Nina 31, 42  
Morton, Timothy 97, 101, 115, 129  
Müller, Jörn 24, 101  
Müller, Klaus 141, 152  
Müller, Michael 87
- Nachtigall, Werner 59, 66  
Nagel, Thomas 92, 94, 101  
Nash, John 163, 168  
Nicolaus Cusanus 58, 61  
Nobel, Alfred 120  
Nordmann, Alfred 47 f., 62, 66

*Personenregister*

- Nussbaum, Martha 88, 101, 106 f.,  
111 f., 146, 152
- Ortega y Gasset, Jose 60 f., 66
- Ott, Maximilian 57, 66
- Paracelsus 121
- Patočka, Jan 109, 112
- Pico della Mirandola, Giovanni 136,  
153
- Pietsch, Wolfgang 57, 66
- Planck, Max 23
- Platon 13, 49, 66
- Plessner, Helmuth 136
- Plumwood, Val 120, 129
- Popitz, Heinrich 98, 101
- Potthast, Thomas 122, 129
- Quine, Willard van Orman 79
- Ramankutty, Navin 28
- Renn, Jürgen 31, 42, 86, 101
- Revkin, Andrew 27
- Reydon, Thomas A. C. 20, 24
- Rickert, Heinrich 115, 129
- Rink, Dieter 122, 129
- Rockström, Johan 33, 37, 42
- Rombach, Heinrich 118, 129
- Ropohl, Günter 47 f., 52, 66
- Rosa, Hartmut 116, 127, 129
- Rosenberg, Jay F. 9 f., 24
- Rothe, Hartmut 52
- Russell, Bertrand 79
- Sachsse, Hans 49 f., 66
- Sandholm, Tuomas 162, 168
- Schadel, Erwin 109, 112
- Schäfer, Lothar 117, 129
- Schaller, Klaus 109, 112
- Schärrtl-Trendel, Thomas 8
- Scheibe, Erhard 24
- Scherer, Bernd 31, 42, 86, 101
- Schiemann, Gregor 116, 129
- Schifferová, Věra 108, 111
- Schillings, Carl 129
- Schmitz, Hermann 95 f., 101
- Schrödinger, Erwin 23
- Schroeder, Ariane 140, 153
- Schurz, Gerhard 16, 19, 24, 52, 66
- Schwab, Klaus 56, 66
- Schwinger, Elke 25
- Schwägerl, Christian 26, 43
- Scotese, Christopher 25
- Seyfried, Hartmund 117, 130
- Sheriff, Michael J. 128
- Siep, Ludwig 148 f., 153
- Singer, Peter 143, 153
- Sloterdijk, Peter 110, 112, 135, 153
- Smil, Vaclav 130
- Snow, Charles Percy 123
- Soentgen, Jens 8, 87, 95 f., 99, 101,  
104, 112, 115 f., 127, 130
- Sohma, Shinchi 109, 112
- Solnick, Sam 105, 112
- Spaemann, Robert 115, 127, 130
- Spinoza, Benedictus de 74 f., 84
- Sprengel, Christian 121
- Steffen, Will 29 f., 37, 43
- Steiner, Martin 111
- Stöckler, Manfred 23 f.
- Stoermer, Eugene 27
- Stoppani, Antonio 27
- Strawson, Galen 93, 101
- Strawson, Peter Frederick 144
- Sturm, Johann Christoph 115
- Suess, Eduard 119, 130
- Sukhdev, Pavan 33, 42
- Sussman, Robert W. 128
- Taylor, Charles 127
- Teilhard de Chardin, Pierre 27
- Ten Have, Henk A. M. J. 146 f., 153

*Personenregister*

- Tetens, Holm 10 f., 24  
Thales von Milet 80  
Timm, Uwe 149, 153  
Toepfer, Georg 53, 66  
Tomasello, Michael 52, 66  
Trischler, Helmuth 27, 43  
Turing, Alan 160 f., 168  
Turpin, Etienne 105, 112
- Uexküll, Jakob von 120, 130  
Uexküll, Thure von 142
- Vernadsky, Vladimir Iwanowitsch 27  
Vince, Gaia 87, 101  
Vogt, Hans-Heinrich 123, 130  
Voigt, Uwe 7 f., 94, 97 f., 101 f., 103,  
107–109, 113, 122, 130
- Wächter, Monika 122, 129  
Wardetzki, Bärbel 88, 102  
Waters, Colin N. 28, 30 f., 43 f.  
Watzlawick, Paul 103
- Wehling, Peter 62, 66  
Weizsäcker, Viktor von 142, 153  
Welsch, Wolfgang 52, 66  
Wernecke, Jörg 57, 66  
Whitehead, Alfred North 95  
Wilke, Sabine 105, 113  
Williams, Mark 29 f., 44  
Wils, Jean-Pierre 134, 143–145, 153  
Wilson, Edward O. 13, 24  
Wittgenstein, Ludwig 79, 83 f.  
Woldring, Henk E. S. 108, 113  
Wolf, Gerry 133  
Wolff, Dietmar 57, 66  
Wolff, Francis 53, 66
- Zalasiewicz, Jan 28 f., 31, 44 f.  
Zanette, Liana Y. 128  
Zhao, Tingyang 106 f., 113  
Ziegler, Dieter 56  
Zoglauer, Thomas 47 f., 58  
Zorn, Daniel-Pascal 89, 102

## SACHREGISTER

*Vorbemerkung: Auf das Stichwort „Anthropozän“ wurde verzichtet, da dieses Thema im vorliegenden Band durchgängig angesprochen wird.*

- Anti-Universalismus 85, 88–90
- Environmental Humanities 105
- Erdsystem 27–32, 38, 156;  
*siehe auch: Gaia-Hypothese*
- Ethik des Pathischen 142–145
- Gaia-Hypothese 97 f.
- Hyperobjekte 97
- Hypersubjekt 97–100
- Interdisziplinarität 20–23, 32 f.
- Komplexität 156–160
- Körper und Leib 140–142, 145
- Kultur 26, 105–111;  
*siehe auch: Technikgeschichte*
- Künstliche Intelligenz 155, 160–167
- Mensch-Natur-Technik, Modelle  
ihres Verhältnisses 134–138
- Nachhaltigkeit, systemische 33
- Narrative des Anthropozäns 34 f., 137
- Narzissmus, logischer 85, 88–90, 99
- Natur 17, 26, 34–36, 52–61, 71–84,  
115–127; *siehe auch: Ökologie*
- Neue Phänomenologie 95 f., 104
- Ökologie 116–122, 158 f.  
— und Subjektivität 122–127
- Panpsychismus 93–95
- Philosophie  
— als Expertise für Vernunft 73  
— als Universalwissenschaft,  
Reflexionswissenschaft und  
Metawissenschaft 9–23  
— und die Einzelwissenschaften  
12–20
- Subjekt 140 f., 145
- Technik 48–52, 131–149;  
*siehe auch: Künstliche Intelligenz*
- Technikgeschichte 52–58
- Technikphilosophie 58–62
- Technosphäre 98 f.
- Transhumanismus 61, 135, 137 f., 147
- Vernunft 67–74
- Vulnerabilität 143–145
- Zukunftsszenarien im Anthropozän  
36 f.