TEXTE 56/2019

Ressortforschungsplan des Bundesministerium für
Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit

Forschungskennzahl 3715 11 108 0
FB000115/ZW

Künstliche Intelligenz im Umweltbereich

Anwendungsbeispiele und Zukunftsperspektiven im
Sinne der Nachhaltigkeit
Kurzstudie

von

Tobias Jetzke, Stephan Richter,
Jan-Peter Ferdinand und Samer Schaat
Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE-IT,
Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Impressum

Herausgeber
Umweltbundesamt
Wörlitzer Platz 1
06844 Dessau-Roßlau
Tel: +49 340-2103-0
Fax: +49 340-2103-2285
buergerservice@uba.de
Internet: www.umweltbundesamt.de

/umweltbundesamt.de
/umweltbundesamt

Durchführung der Studie:
Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE-IT
Steinplatz 1
10623 Berlin

Abschlussdatum:
Mai 2019

Redaktion:
Fachgebiet I 1.1 Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und –szenarien, Ressourcenschonung
Sylvia Veenhoff

Publikationen als pdf:
http://www.umweltbundesamt.de/publikationen

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, Juni 2019

Die Verantwortung für den Inhalt dieser Veröffentlichung liegt bei den Autorinnen und Autoren.

Kurzbeschreibung: Künstliche Intelligenz im Umweltbereich - Anwendungsbeispiele und Zukunftsperspektiven im Sinne der Nachhaltigkeit

Die Entwicklungen im Bereich Künstlicher Intelligenz (KI) verlaufen sich zunehmend dynamisch und in vielfältigen Innovationssträngen. Hier konkrete Entwicklungsrichtungen zu erkennen ist ebenso schwierig, wie ihre Potenziale und Risiken für Gesellschaft, Wirtschaft und Politik oder die Umwelt zu bewerten. Insbesondere für den Umweltbereich existieren bislang nur wenige Studien. Dennoch stellen Betrachtungen von wirtschaftlichen, wissenschaftlichen und politischen Entwicklungen zu KI zumindest an verschiedenen Stellen Bezüge zwischen Umwelt- und Nachhaltigkeitsthemen und KI-Anwendungen her.

Das Ziel verschiedener nationaler KI-Strategien ist selten, mit KI umwelt(-politische) Herausforderungen zu lösen. Es finden sich dennoch vielfältige Bezugspunkte, die Potenziale von KI für den Bereich Umwelt und Nachhaltigkeit betonen. Wirtschaftliche Akteure sind Haupttreiber bei der Entwicklung von KI-Anwendungen. Sowohl internationale Großunternehmen als auch junge Start-ups bringen KI-basierte Lösungen auf den Markt, die dazu beitragen sollen, Umweltbelastungen zu reduzieren, Systeme und Prozesse ressourceneffizienter zu gestalten und das Systemverständnis von Umwelt und Klima zu verbessern. Auch wissenschaftliche Forschung erkennt die Möglichkeiten von KI für den Umweltbereich, jedoch ist die Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten bei der Erforschung von KI-Anwendungen bislang nur sehr punktuell erfolgt.

In sechs Entwicklungskorridoren zeigt die Kurzstudie erste Ansatzpunkte für umweltpolitische Gestaltungsmöglichkeiten. Sowohl durch die Schaffung von Anreizen für Forschung und Innovation als auch durch die Bedienung regulatorischer Stellschrauben können eine nachhaltige Technikentwicklung und ein Einsatz von KI im Sinne einer nachhaltigen Umweltpolitik gelingen.

Abstract: Artificial Intelligence in the Environmental Sector - Application Examples and Future Perspectives in Terms of Sustainability

The development of artificial intelligence (AI) is becoming increasingly dynamic and taking place in many different strands of innovation. Forecasting definitive future developments as well as asses-sing potentials and risks is proving to be very difficult. Changes in society, the economy and politics brought about by digitisation are generally suspected but hard to predict. It is all the more difficult to break down implications of AI for the environmental sector. As such there are only a few studies available concerning these issues. Nevertheless, initial observations of economic, scientific and political developments in AI show that there are already many links between environmental and sustainability issues and applications of AI.

It is evident that the aim of specific national AI strategies is seldom only to solve environmental challenges with the use of AI. Nevertheless, there are many points of reference that emphasise the potential of AI for the environment and sustainability. Economic actors are main drivers in the development of AI applications. Both large international companies and young start-ups are bringing AI-based solutions intended to help reduce environmental pollution, make systems and processes more resource-efficient and improve the understanding of the environment and climate to the market. Scientific research recognizes the possibilities of AI for the environmental sector, but the consideration of sustainability aspects in the research of AI applications has so far only been very selective.

In six exploratory pathways for AI, this short study identifies starting points for environmental policy options. Both the creation of incentives for research and innovation and the adaptation of regulatory frameworks can lead to sustainable technology development and the use of AI to support a sustainable environmental policy.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis 7

Tabellenverzeichnis 7

1 Digitalisierung und Nachhaltigkeit 8

2 Künstliche Intelligenz: Definition und Abgrenzungen 11

3 Akteure und Rahmenbedingungen für zukünftige Entwicklungen 13

3.1 Bezüge zu Umwelt und Nachhaltigkeit finden sich bereits vereinzelt in politischen KI-Strategien 13

3.2 Dynamische Forschungsaktivitäten in verschiedenen Forschungs- und Anwendungsfeldern von KI 17

3.3 Großunternehmen und Start-ups entwickeln KI-Anwendungen im Kontext von Nachhaltigkeit 20

4 Entwicklungskorridore von KI für Nachhaltigkeit 24

4.1 KI für eine ressourceneffizientere Industrie 24

4.2 KI und (IT-)Infrastruktur für KI 25

4.3 KI für einzelne Sektoren 26

4.4 KI als Sicherheits- und Warnsystem für den Umweltschutz 27

4.5 KI als Impulsgeber für die Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung 28

4.6 KI als Betriebssystem für das „Raumschiff Erde 28

5 Umweltpolitische Gestaltungs- und Regulationsansätze 30

6 Anhang 32

7 Quellenverzeichnis 40

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Struktur und Kernaussagen der Kurzstudie 10
Abbildung 2: Anzahl jährlicher KI-Publikationen auf internationaler Ebene zwischen 1998 und 2017 17
Abbildung 3: Anzahl der KI-Publikationen für die Regionen China, Europa und USA in den Zeiträumen 1998 bis 2002, 2003 bis 2007, 2008 bis 2012 und 2013 bis 2017 (links); Anzahl jährlicher KI-Publikationen einzelner Länder zwischen 2013 und 2017 (rechts) 18
Abbildung 4: Anzahl jährlicher Cluster-Publikationen auf internationaler Ebene zwischen 1998 und 2017 19
Abbildung 5: Internationale KI-Publikationsintensitäten – abgebildet als Relative Activity Index (RAI) – in den FORD-Anwendungsfeldern für das Jahr 2017 20

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Handlungsfelder der deutschen KI-Strategie.....13
Tabelle 2: Geförderte Projekte des „AI for earth“-Programms.....21
Tabelle 3: Suchkategorien und-begriffe der Crunchbase Analyse 22
Tabelle 4: FORD-Anwendungsfelder (OECD, 2015, S. 59) 32
Tabelle 5: Ergebnisse der Crunchbase-Analyse.....33

1 Digitalisierung und Nachhaltigkeit

Der Digitale Wandel und der Klimawandel scheinen derzeit zu den prägendsten Veränderungsprozessen des 21. Jahrhunderts zu zählen, die in verschiedenen gesellschaftlichen Bereichen tiefgreifende Effekte auslösen. Die Folgen dieser Veränderungsprozesse sind derzeit noch weitestgehend unbekannt, wenngleich zumindest für den Klimawandel bereits eine breite Faktenbasis existiert, auf deren Grundlage politische Maßnahmen umgesetzt werden können. Anders stellt sich dies im Fall des Digitalen Wandels dar. Zu dem als Digitalisierung bezeichneten Veränderungsprozess existiert keine vergleichbare Faktenbasis in den Ressorts, auf die sich politische Entscheidungen beziehen können. Außerdem verläuft die Digitalisierung hochdynamisch und in vielfältigen Innovationssträngen. Daraus ergeben sich besondere Anforderungen an die Akteure, die die Digitalisierung aktiv mitgestalten wollen.

Eine Verknüpfung beider Veränderungsprozesse, die bspw. die technologischen Potenziale der Digitalisierung auf ihren Beitrag für Umwelt-, Natur- und Klimaschutz bezieht, findet aktuell eher punktuell als systematisch statt. Dementsprechend beschreibt die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie (Aktualisierung 2018) sowohl die Nutzbarmachung der Potenziale der Digitalisierung für Nachhaltigkeit als auch die nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung als zentrale Aspekte (Bundesregierung [BReg.], 2018b, S. 18). Das Umweltressort hat dies aufgegriffen und Anfang Mai 2019 auf der re:publica[1] das Eckpunktepapier „Umwelt den Algorithmen“ vorgestellt[2] (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit [BMU], 2019). Dieser Ausgangspunkt soll im weiteren Jahresverlauf in eine umweltpolitische Digitalagenda münden. Neben der re:publica stand auch die Konferenz „Bits und Bäume“ im Zeichen einer Verzahnung von Digitalisierung und Nachhaltigkeit[3]. Schließlich hat auch der WGBU in einem Hauptgutachten[4] zehn Schlüsselthemen zum Verhältnis von Digitalisierung und Nachhaltigkeit vorgestellt (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen [WBGU], 2019). Insgesamt wird deutlich, dass in einer zukunftsfähigen Gesellschaft die Pfade technologischer Entwicklung, insbesondere die der Digitalisierung, zur Gestaltung nachhaltiger Lebensweisen deutlich stärker als bisher genutzt werden müssen.

Künstliche Intelligenz ist eine Schlüsseltechnologie der Digitalisierung, die aktuell an der Schwelle zur Diffusion in vielfältige Anwendungsbereiche steht. Die vorliegende Kurzstudie will punktuell Bezüge zu Umwelt- und Nachhaltigkeitsthemen benennen und konkrete Anknüpfungspunkte für die Umweltpolitik ableiten, um die Nachhaltigkeitspotenziale der Technologie zu antizipieren. Neben einer Aufarbeitung ausgewählter Quellen integriert sie dabei außerdem Anregungen, Einschätzungen und Meinungen, die aus Interviews mit folgenden Experten resultieren:

- Prof. Tilman Santarius (TU Berlin, Fachgebiet Sozial-ökologische Transformation)
- Prof. Ina Schieferdecker (Fraunhofer-Institut für Offene Kommunikationssysteme FOKUS, Berlin)
- Ulrich Petschow (Institut für ökologische Wirtschaftsforschung, Berlin)

1 https://re-publica.com/de

2 verfügbar unter: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nachhaltige_Entwicklung/eckpunktepapier_digitalisierung_bf.pdf

3 https://bits-und-baeume.org/de

4 verfügbar unter: https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2019/pdf/WBGU_HGD2019_Z.pdf

- Guido Zinke (Institut für Innovation und Technik, Berlin)

Die Kurzstudie verfolgt das Ziel, exemplarisch sechs Entwicklungskorridore zu benennen, in denen KI-Technologien und Anwendungen einen entscheidenden Beitrag zu einer nachhaltigen Transformation der Gesellschaft liefern können. Die Entwicklungskorridore sind dabei keineswegs trennscharf voneinander abzugrenzen. Vielmehr bieten sie eine erste Orientierung für das Umweltressort, wodurch unterschiedliche Dimensionen, auf denen KI Wirkung entfalten kann, differenziert werden können.

Die Kurzstudie liefert damit einen inhaltlichen Input für die thematische Positionierung des BMU im Rahmen der ressortübergreifenden „Strategie Künstliche Intelligenz“. Diese Kurzstudie ersetzt nicht eine vertiefte Betrachtung von Chancen und Risiken, die sich durch die Anwendung von KI für die Umwelt ergeben können, da sämtliche KI-Entwicklungen hinsichtlich potenziell negativer und positiver Effekte geprüft und indirekte Effekte mitbetrachtet werden müssten. Ferner erheben die nachfolgenden Ausführungen keinen Anspruch auf Vollständigkeit, denn im Zuge einer äußerst dynamischen politischen, wissenschaftlichen und wirtschaftlichen Entwicklung von KI können die hier zusammengetragenen Erkenntnisse allenfalls als Momentaufnahme dienen.

Abbildung 1: Struktur und Kernaussagen der Kurzstudie

Quelle: eigene Darstellung Institut für Innovation und Technik (iit) in der VDI/VDE-IT

2 Künstliche Intelligenz: Definition und Abgrenzungen

Der Begriff der künstlichen Intelligenz (KI) geht auf die 1956 abgehaltene Dartmouth Konferenz (Dartmouth Summer Research Project on Artificial Intelligence) zurück (Eberl, 2018, S. 9). Von den an der Konferenz teilnehmenden Wissenschaftlern wurde ein Forschungsprogramm zur Entwicklung künstlicher Systeme, die Eigenschaften menschlicher Intelligenz aufweisen sollen, vorgeschlagen. Auch wenn der Begriff der „Intelligenz" unscharf definiert ist, kann er im Kontext von KI als das Ausmaß von Problemlösungsfähigkeit künstlicher Systeme angesehen werden. Wenn dabei der Anspruch besteht, die gesamte menschliche Intelligenz mittels informationstechnischer Mittel abzubilden, wird oft von starker KI gesprochen. Dieser Anspruch wird oft mit Rahmenarchitekturen (Frameworks) adressiert (z. B. CogPrime. Vgl. Goertzel, Pennachin & Geisweiller, 2014) die abstrakte Probleme der menschlichen Kognition lösen möchte. Bislang ist das Bestreben eine starke KI zu entwickeln unerfüllt geblieben. Im Gegensatz zu diesem ambitionierten Ziel möchten Ansätze schwacher KI-Systeme konkrete Anwendungsprobleme lösen, somit müssen sie nicht alle Eigenschaften menschlicher Intelligenz abbilden.

Verfahren maschinellen Lernens sind der aktuell dominante Ansatz schwacher KI. Sie erweitern damit klassische Ansätze in der Informatik um den neuen Aspekt des Lernens (Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. [BITKOM] & Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH [DFKI], 2017, S. 29). Diese Verfahren sind gut geeignet, um aus Daten eines Anwendungsbereichs statistische Zusammenhänge zu erkennen und diese daraufhin bspw. für das Aufzeigen von Abhängigkeiten, für Vorhersagen oder für Klassifikationen zu verwenden. Konkrete Anwendungen finden sich in Sprach-, Bild- und Texterkennungssystemen (z. B. das Erlernen eines statistischen Zusammenhangs zwischen einem gesprochenem und geschriebenen Wort in Apples Siri, Amazons Alexa u. ä.), Übersetzungsprogrammen und in verschiedenen Branchen, wie der Finanzbranche, der Medizin etc. (Eberl, 2018, 9ff.). Da Verfahren maschinellen Lernens Muster anhand von Beispieldaten (z. B. Pixelmuster in Bildern) zur Einordnung neuer Daten lernen, ist ihre Güte im hohen Ausmaß abhängig von der Qualität und der Menge der verwendeten Beispieldaten. Die Verfügbarkeit großer Datenmengen, Verbesserungen bei der Prozessor- und Speicherleistungsfähigkeit und die zunehmende Vernetzung von Sensoren zur Datenerfassung sind deswegen zentrale Treiber der technischen Weiterentwicklung von Verfahren maschinellen Lernens bzw. ihrer Anwendung. Dort, wo Verfahren maschinellen Lernens an ihre Grenzen stoßen, z. B. weil nicht genügend Beispieldaten vorhanden sind, werden sie mit wissensbasierten Systemen verknüpft, die Wissen explizit repräsentieren (z. B. dass der Buchstabe „I" mit durchgehenden vertikal angeordneten Pixel dargestellt wird), anstatt dieses Wissen implizit aus Beispieldaten zu extrahieren.

Aktuell wird neben einem erkennbar technologisch geprägten Diskurs (über Machbarkeiten und Möglichkeiten) auch eine ethische Auseinandersetzung mit dem Thema geführt. Die allgemeinen Kontroversen sind bereits aufgeworfen und artikuliert (vgl. z. B. Rohde, 2018 und Initiativen wie AlgorithmenWatch[5]). Entsprechende Regeln für die Gestaltung algorithmischer Systeme, wie z. B. die Algo.Rules[6] der Bertelsmann-Stiftung, spiegeln den Diskurs wider. Dieser ist nicht deckungsgleich mit den für das Umweltressort zentralen Fragestellungen, aber er kann als Referenz hinzugezogen werden, da dort Kontroversen aufgeworfen werden, die auch aus Umweltsicht relevant erscheinen. Daher sind an dieser Stelle einige Schwerpunkte genannt: Ein zentraler Aspekt des ethischen Diskurses ist insbesondere der Autonomie-Begriff von KI-Systemen, der die Selbstbestimmung des Menschen infrage stellt und derzeit bspw. am Anwendungsfall von autonom (automatisiert) fahrenden Fahrzeuge diskutiert wird. Die Problematik der Auto-

5 https://algorithmwatch.org/

6 https://algorules.org/

nomie in der Entscheidungsfindung wiegt umso mehr, da die Nachvollziehbarkeit der Entscheidung durch aktuell dominante Verfahren maschinellen Lernens, wie z. B. das „Deep Learning", erschwert wird. Diese Intransparenz ist in den Prinzipien der Algorithmen maschinellen Lernens verankert. Vor allem die Verwendung statistischer Zusammenhänge erschwert die Nachvollziehbarkeit dieser Algorithmen. Warum bei einem bestimmten Eingangswert ein bestimmter Ausgangswert resultiert, kann nicht direkt aus dem Algorithmus abgeleitet werden. Die Antwort lautet pauschal: „Weil der Algorithmus es aus den Beispieldaten so gelernt hat". Dies kann auch aus Umweltsicht potenziell ein Problem darstellen, wenn Handlungen und Entscheidungen von KI-Systemen Umweltschäden verursachen, wenn bspw. umweltpolitische Entscheidungen auf Grundlage von Empfehlungen von KI-Systemen getroffen werden.

Neben der Frage des Grades der Autonomie und Transparenz Künstlicher Intelligenz wirft KI weitere ethische Fragen auf: Mögliche Antworten auf Sicherheitsfragen, der Minimierung von Risiken, der Regulierung sowie der (Weiter-)Entwicklung und des Monitorings von Aktivitäten im Bereich KI werden aktuell erarbeitet (Dratwa, 2018). Eine Wiedergabe des ethischen Diskurses in all seinen Ausprägungen ist in dieser Kurzstudie nicht leistbar, dennoch werden einzelne, aus Umweltsicht zentrale Aspekte an geeigneter Stelle aufgegriffen.

3 Akteure und Rahmenbedingungen für zukünftige Entwicklungen

3.1 Bezüge zu Umwelt und Nachhaltigkeit finden sich bereits vereinzelt in politischen KI-Strategien

Die zunehmende Dynamik im Thema KI hat dazu geführt, dass verschiedene Staaten dezidierte Strategien zum Umgang mit bzw. zur Entwicklung von KI-Anwendungen und -Technologien formuliert haben. Seit 2016 haben 24 einzelne Staaten[7] sowie ein Zusammenschluss der baltischen Staaten KI-Strategien formuliert oder, im Falle der EU-Kommission, auch zusätzliche Hinweise auf die bevorstehende Strategieentwicklung veröffentlicht (Dutton, 2018). Nachfolgend werden exemplarisch Kernaussagen mit Umweltbezug aus den bislang bekannten Dokumenten zusammengefasst.

Die deutsche KI-Strategie wurde im Dezember 2018 veröffentlicht. Sie ist Ergebnis eines zuvor ressortübergreifend entwickelten und in einem öffentlichen Konsultationsprozess verfeinerten Eckpunktepapiers (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie [BMWi], 2018)[8]. Zu den wesentlichen Zielen gehören (BReg., 2018a, S. 8):

- Deutschland zu einem weltweit führenden KI-Standort zu entwickeln (KI made in Germany),
- KI verantwortungsvoll und gemeinwohlorientiert zu nutzen und
- KI mittels eines breiten gesellschaftlichen Dialogs und einer aktiven politischen Gestaltung ethisch, rechtlich, kulturell und institutionell in die Gesellschaft einzubetten.

Um die Ziele zu erreichen, plant die Bundesregierung, bis 2025 Mittel in Höhe von insgesamt 3 Mrd. Euro aufzuwenden. Zunächst werden im Jahr 2019 500 Mio. Euro zur Umsetzung einzelner Maßnahmen und Vorhaben zur Verfügung gestellt. Die deutsche KI-Strategie formuliert zwölf Handlungsfelder (BReg., 2018a, S. 12):

Tabelle 1: Handlungsfelder der deutschen KI-Strategie

#	Handlungsfeld
1	Forschung in Deutschland und Europa stärken, um Innovationstreiber zu sein
2	Innovationswettbewerbe und europäische Innovationscluster
3	Transfer in die Wirtschaft, Mittelstand stärken
4	Gründungsdynamik wecken und zum Erfolg führen
5	Arbeitswelt und Arbeitsmarkt: Strukturwandel gestalten
6	Ausbildung stärken und Fachkräfte/Expertinnen und Experten gewinnen
7	KI für hoheitliche Aufgaben nutzen und Kompetenzen der Verwaltung anpassen

7 Dazu zählen: Kanada, Singapur, Finnland, Taiwan, Großbritannien, USA, Schweden, Mexiko, Japan, Australien, Frankreich, Deutschland, China, Südkorea, Dänemark, Indien, Vereinige Arabische Emirate, Kenia, Neuseeland, Tunesien, Malaysia, Polen, Russland und Italien.

8 Verfügbar unter: https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunktepapier-ki.pdf?__blob=publicationFile&v=10 (zuletzt geprüft am 31.01.2019).

#	Handlungsfeld
8	Daten verfügbar machen und Nutzung erleichtern
9	Ordnungsrahmen anpassen
10	Standards setzen
11	Nationale und internationale Vernetzung
12	Dialoge in der Gesellschaft führen und den politischen Handlungsrahmen weiterentwickeln

Bezüge zu Aspekten der Umwelt und Nachhaltigkeit finden sich vor allem in den Handlungsfeldern 1, 8 und 11:

- In **Handlungsfeld 1** werden die Bereiche Mobilität und Landwirtschaft in Bezug zu KI gesetzt. Als Schlüsseltechnologie wird das Autonome Fahren durch KI möglich und kann unter anderem dazu beitragen, dass Mobilität umweltfreundlicher wird. Notwendig dazu ist die Weiterentwicklung der Netzinfrastruktur, um die Echtzeitverarbeitung großer Datenmengen zu gewährleisten (BReg., 2018a, S. 17). Weiterhin kann KI zum Verständnis komplexer Systeme beitragen und damit zum Erreichen der Ziele für nachhaltige Entwicklung der Vereinten Nationen (SDG) führen (BReg., 2018a, S. 17). Auch die Analyse großer Datenmengen, wie sie im Rahmen der Erdbeobachtung durch Satelliten generiert werden, soll durch KI unterstützt werden, sodass auch eine Zusammenführung mit Daten aus anderen Quellen möglich wird (unter anderem Citizen-Science und Social-Media-Daten). Somit sollen Aussagen zur Nutzung natürlicher Ressourcen verbessert und umweltschonende Entwicklungen in anderen Bereichen unterstützt werden (BReg., 2018a, S. 19). Als Maßnahme wird der Aufbau einer Umweltdatencloud vorgestellt mit dem Ziel, Wissenschaft, Wirtschaft und Gesellschaft Zugang zu Daten und die Entwicklung umweltfreundlicher KI-Anwendungen zu ermöglichen (BReg., 2018a, S. 20).
- In **Handlungsfeld 8** rückt der Mobilitätssektor noch einmal in den Fokus hinsichtlich der Gestaltung sicherer, umweltfreundlicher, effizienter und preiswerter Verkehrssysteme unter Nutzung von KI. Erneut werden die Notwendigkeit einer digitalen Infrastruktur, eine Ertüchtigung der Verkehrsinfrastruktur und der Zugang zu Mobilitätsdaten angesprochen (BReg., 2018a, S. 36).
- **Handlungsfeld 11** schließlich stellt Bezüge zu anderen Strategien und Maßnahmen der Bundesregierung her. Genannt werden unter anderem die Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie, die Geoinformationsstrategie sowie Maßnahmen zum Klimaschutz (BReg., 2018a, S. 42). Auch werden erneut Bezüge zu den SDGs der Vereinten Nationen hergestellt und positive Beiträge, z. B. durch Effizienzsteuerung von Energieanlagen, beispielhaft aufgeführt (BReg., 2018a, S. 42).

Im Vergleich dazu unterscheiden sich die diversen bisher veröffentlichten internationalen Strategien zum Teil erheblich: Sowohl hinsichtlich der geplanten finanziellen Rahmenbedingungen als auch der Ziel- und Handlungsfeldformulierung variieren die einzelnen einsehbaren Strategien und Positionspapiere bezüglich Breite und Tiefe.

- Als besonders wegweisend wurde die **chinesische Ankündigung** aufgefasst, insgesamt rund 130 Mrd. Euro bereitzustellen. In ähnlichem Maße wie **Deutschland** planen Länder wie **Frankreich** (1,5 Mrd. Euro in fünf Jahren), in die Entwicklung von KI-Anwendungen bzw. die KI-Forschung zu investieren. Deutlich weniger planen Staaten wie **Singapur** (ca. 100 Mio. Euro), **Kanada** (ca. 82 Mio. Euro über fünf Jahre) und **Dänemark** (ca. 37 Mio. Euro bis 2025) zu investieren. Andere Länder, wie bspw. **Italien**, haben in ihrem Weißbuch zu KI auf die Nennung konkreter Summen verzichtet.

- Während Deutschland zwar – neben der Forschungsförderung – die Förderung wirtschaftlicher Aktivitäten verfolgt, fokussiert die **kanadische KI-Strategie** deutlich die Stärkung von Forschung und Nachwuchs- bzw. Kompetenzentwicklung. Es kann davon ausgegangen werden, dass eine Verzahnung zu thematisch verwandten forschungs- bzw. industriepolitischen Strategien entweder bereits erfolgt ist, oder aber der Fokus auf KI die Strategieentwicklung in anderen Politikbereichen beeinflussen wird. So weist bspw. die Anfang 2019 veröffentlichte Nationale Industriestrategie 2030 direkte Bezüge zur Künstlichen Intelligenz auf, die als Basis-Innovation gesehen wird. Deutschland ist hier im Bereich der Forschung gut aufgestellt, hinkt bei der praktischen Anwendung anderen Ländern aber hinterher (BMWi, 2019, S. 7).

- Darüber hinaus gibt es nationale Strategien, die weit über die reine Forschungsförderung hinausgehen und die Entwicklung von konkreten KI-Anwendungen und datenbasierter Geschäftsmodelle unterstützen. Letztgenanntes steht insbesondere im Fokus der **dänischen Strategie. Italien** geht diesbezüglich einen ganz anderen Weg und sieht KI vor allem als Mittel zur Optimierung der öffentlichen Verwaltung. **Indien** rückt den Aspekt der Teilhabe bzw. Inklusion in den Vordergrund und möchte nicht nur mittels KI-Anwendungen Wirtschaftswachstum, sondern auch soziale Wirkungen erzeugen, die zur Nutzung von KI notwendigen Kompetenzen vermitteln und KI-Anwendungen auch für weitere Schwellenländer und Länder des globalen Südens entwickeln.

In einigen der bisher veröffentlichen KI-Strategien finden sich mehr oder weniger direkte Anknüpfungspunkte zu Umwelt und Nachhaltigkeit:

- In der **deutschen KI-Strategie** werden Bezüge zu den Aspekten Umwelt und Nachhaltigkeit sowohl auf abstrakter wie auch auf konkreter Ebene hergestellt. Eher abstrakt bleiben Ausführungen, die Potenziale von KI für das Erreichen der nationalen, aber auch der internationalen Nachhaltigkeitsziele skizzieren. Hier wird vom „Verständnis von komplexen Systemen [wie] der Natur“ geschrieben, dass durch KI verbessert werden kann (BReg., 2018a, S. 17). Ein solches Systemverständnis lässt sich durch genaue Systemkenntnis erzeugen, also der zugehörigen Variablen und ihrer Beziehungen zueinander. Voraussetzung dafür sind große Datenmengen, die z. B. durch Erdbeobachtungsdaten erzeugt werden können. Diesbezüglich wird die Rolle von KI ebenfalls betont und darauf hingewiesen, dass zur Auswertung der erzeugten Daten und Verschränkung mit Daten aus anderen Quellen (bspw. Geoinformationen, Social-Media- und Citizen-Science-Daten, vgl. BReg., 2018a, S. 19) neue Verfahren entwickelt werden müssen. Konkreter wird die deutsche KI-Strategie hinsichtlich der Erschließung von Potenzialen für Umwelt, Ressourcen und Klima und benennt Ziele sowie

Maßnahmen: Forschungsanstrengungen zu KI-Anwendungen für einen sozial-ökologischen Wandel sollen verstärkt werden, Bewertungskriterien für die Umweltwirkung von KI entwickelt und eine Umweltdatencloud aufgebaut werden. Dies soll mittels 50 Leuchtturmanwendungen erreicht werden (BReg., 2018a, S. 7). Ferner benennt die KI-Strategie auch einzelne Branchen bzw. Sektoren, wie bspw. Mobilität oder Landwirtschaft, in denen KI-Anwendungen bzw. KI-Technologien zu Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und Umweltfreundlichkeit beitragen können (BReg., 2018a, S. 36).

- Im internationalen Vergleich fällt auf, dass ebenfalls Sektoren wie Landwirtschaft, Mobilität aber auch Energie als sich wandelnde Sektoren verstanden werden, in denen KI-Anwendungen bei einer Gestaltung nachhaltiger Transformationsprozesse unterstützen können. **Finnland** benennt bspw. den Energie- und den Mobilitätssektor konkret als Bereiche, in denen KI zur Gestaltung dezentraler Energienetze bzw. zur Schaffung vernetzter Mobilitätssysteme beitragen kann. Ähnliche Bezüge werden in den KI-Strategien von **Japan** und **Indien** hergestellt. Konkret am Beispiel der Landwirtschaft sowie der Umweltbeobachtung benennt **die neuseeländische KI-Strategie** Anwendungsfälle, bei denen KI zu Effizienzvorteilen führt: Dazu gehören Verfahren, um den Stickstoffgehalt in Böden mittels Infrarotspektroskopie zu bestimmen, aber auch Anwendungen, die den Schutz der heimischen Vogelwelt mittels Auswertung von Daten aus akustischen Sensoren unterstützen sollen. Im **italienischen Weißbuch zu KI** sollen KI-Anwendungen die Simulation von Naturkatastrophen und ihren Folgen unterstützen, um die Frühwarnung sowie die Maßnahmen zum Katastrophenschutz zu verbessern. **Die chinesische KI-Strategie** sieht vor – neben Maßnahmen zur Realisierung von KI-Anwendungen in der Landwirtschaft –, umfangreiche Sammlungen von Umweltdaten vorzunehmen und KI-basierte Umweltschutzmaßnahmen zu entwickeln. Diese schließen den Schutz bzw. das Management von Umweltkatastrophen mit ein.

Auf **europäischer Ebene** finden sich in dem im April 2018 vorgestellten Plan (Communication Artificial Intelligence for Europe) zur Unterstützung von KI nur sehr wenig direkte Bezüge zwischen KI und Umwelt bzw. Nachhaltigkeit. Zwar wird KI als eine mögliche Lösung zur Bekämpfung des Klimawandels gesehen (Europäische Kommission, 2018, S. 2), eine Konkretisierung, wie diese Lösung aussehen könnte, fehlt jedoch. Allerdings erkennt auch die EU an, dass KI zu denjenigen Technologien gehört, die durch ihre Weiterentwicklung zum Erreichen der SDGs beitragen können (Europäische Kommission, 2018, S. 19). Wie dies geschehen soll, hat die Kommission bislang nicht weiter ausgeführt, steht doch die Veröffentlichung von Politikempfehlungen und Investmentempfehlungen noch aus (Europäische Kommission, 2019).

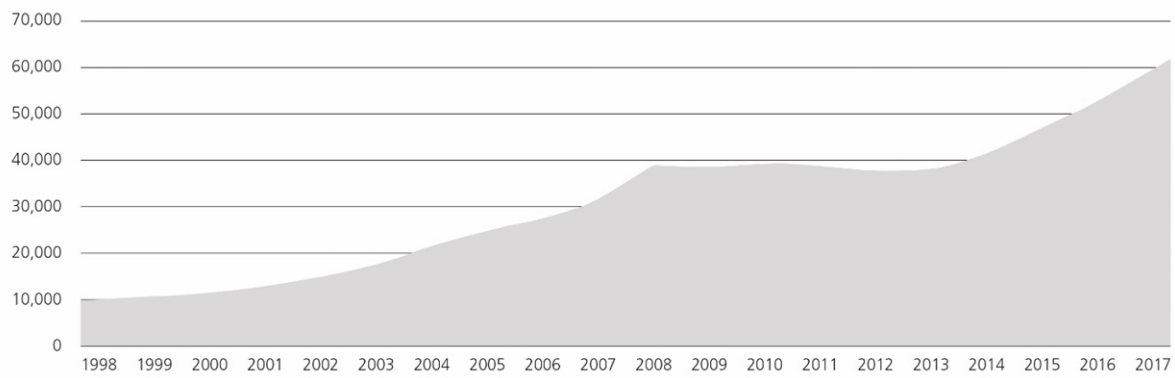
Insgesamt betrachtet fällt daher auf, dass bis auf wenige Ausnahmen konkrete Beispiele für KI-Anwendungen und -Technologien für die Umwelt bzw. Nachhaltigkeit in den jeweiligen veröffentlichten Strategien fehlen. Auch werden selten konkrete Maßnahmen (wie bspw. spezifische Förderprogramme) genannt, sodass sich Interpretations- und Gestaltungsräume für die Formulierung konkreter umweltpolitischer Maßnahmen ergeben. Gleichwohl fehlen bislang konkrete Anhaltspunkte aus anderen nationalen Strategien, die als Input für Roadmapping- bzw. Maßnahmenformulierung dienen können.

3.2 Dynamische Forschungsaktivitäten in verschiedenen Forschungs- und Anwendungsfeldern von KI

Eine Betrachtung der globalen wissenschaftlichen Landschaft, die sich mit KI auseinandersetzt, liefert einen Eindruck von Aktivitäten und Schwerpunkten in einem sich dynamisch entwickelnden Forschungsfeld. Die dargestellten Ergebnisse wurden überwiegend aus der bisher umfangreichsten bibliometrischen Analyse entnommen, die das Elsevier AI Resource Center 2018 in einem KI-Report publiziert hat (Elsevier, 2018). In dessen Rahmen wurden mehr als 600.000 KI-Artikel – hierzu zählen Fachartikel, Konferenzbeiträge, Review-Artikel und Umfragen – der Datenbank Scopus ausgewertet, die zwischen 1998 und 2017 veröffentlicht wurden.

Die Anzahl von Peer-Review-Publikationen ist ein gängiger Indikator, um die wissenschaftlichen Tätigkeiten an Hochschulen und Forschungseinrichtungen abzubilden. Die Anzahl der jährlich publizierten Fachartikel hat sich auf internationaler Ebene zwischen 1998 und 2017 mehr als versechsfacht (Abbildung 2). Zwischen 2013 und 2017 ist die Anzahl der KI-Fachartikel jährlich um 12,9 Prozent gewachsen, auf ca. 60.000 Publikationen im Jahr 2017. Obwohl die Publikationsraten in allen wissenschaftlichen Disziplinen aufgrund einer steigenden Anzahl von Fachjournalen in den letzten Jahren zugenommen haben, deutet diese Vervielfachung der wissenschaftlichen Artikel auf eine sehr dynamische Entwicklung im Bereich der Künstlichen Intelligenz hin.

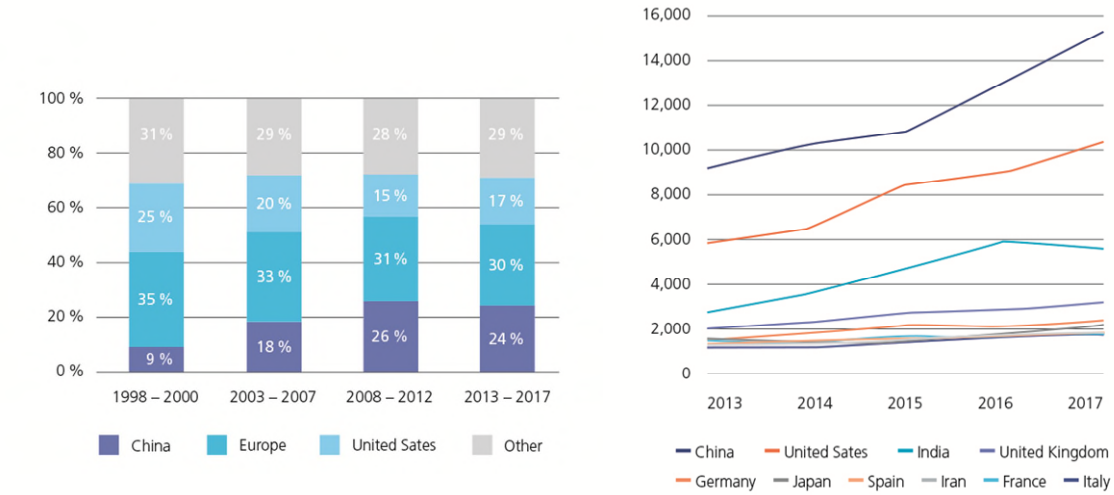
Abbildung 2: Anzahl jährlicher KI-Publikationen auf internationaler Ebene zwischen 1998 und 2017



Quelle: Elsevier, 2018, S. 33

Die regionale Publikationsstärke, mit Fokus auf Europa, den USA und China, ist in Abbildung 3 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass in Europa bislang immer noch die meisten KI-Fachartikel publiziert werden, jedoch mit fallender Tendenz. Die Entwicklung der Publikationsstärke in China lässt darauf schließen, dass China in den kommenden Jahren Europe als Spitzenreiter ablösen wird. Die USA wurden bereits 2004 von China überholt. In Deutschland ansässige Wissenschaftler und Wissenschaftlerinnen gehörten von 2013 bis 2017 zu den Publikationsstärksten – nach China, den USA, Indien und Großbritannien (Abbildung 3).

Abbildung 3: Anzahl der KI-Publikationen für die Regionen China, Europa und USA in den Zeiträumen 1998 bis 2002, 2003 bis 2007, 2008 bis 2012 und 2013 bis 2017 (links); Anzahl jährlicher KI-Publikationen einzelner Länder zwischen 2013 und 2017 (rechts)



Quelle: Elsevier, 2018, S. 38

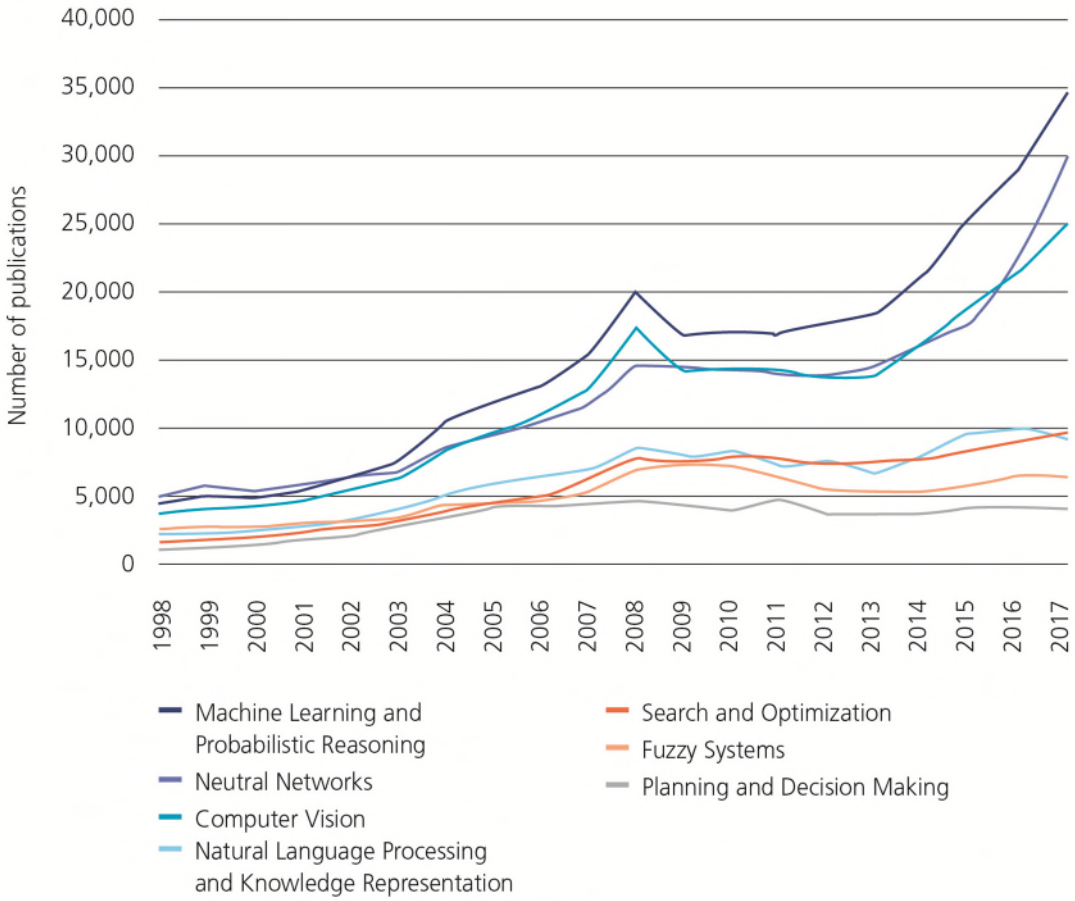
Zur inhaltlichen Strukturierung der über 60.000 KI-Publikationen hat das Elsevier AI Resource Center die Louvain-Methode genutzt. Diese ermöglicht es, Keywords inhaltlichen Clustern zuzuordnen und deren Kookkurrenz, das heißt deren auffällig häufiges gemeinsames Auftreten in den Dokumenten, zu visualisieren. Die Keywords der international publizierten Fachartikel zwischen 1998 und 2017 konnten sieben Clustern zugeordnet werden:

- Suche und Optimierung (Search and Optimization)
- Fuzzy-Systeme (Fuzzy Systems)
- Natürliche Sprachverarbeitung und Wissensrepräsentation (Natural Language Processing and Knowledge Representation)
- Computer Vision
- Maschinelles Lernen und probabilistisches Schlussfolgern (Machine Learning and Probabilistic Reasoning)
- Planung und Entscheidungsfindung (Planing and Decision Making)
- Neuronale Netze (Neural Networks)

Gesellschaftliche Anwendungsbereiche, wie bspw. selbstfahrende Autos oder Robotik, sind im Cluster „Planung und Entscheidungsfindung“ eingebettet, weil diese Anwendungsbereiche aktuell zu wenige Publikationen umfassen, um ein eigenes Cluster bilden zu können. In Abbildung 4 ist der Verlauf der jährlich international publizierten Fachartikel in den oben genannten Kookkurrenz-Clustern dargestellt. Die Cluster, zu denen mit Abstand am meisten publiziert wird, sind „Maschinelles Lernen und probabilistisches Schlussfolgern“, „Neuronale Netze“ und „Computer Vision“. Seit 2013 steigt deren jährliche Publikationsrate stark an, während die Publikationsin-

tensität in den weiteren Clustern zwar im Durchschnitt ansteigt, jedoch das Wachstum weniger stark ausgeprägt ist.

Abbildung 4: Anzahl jährlicher Cluster-Publikationen auf internationaler Ebene zwischen 1998 und 2017



Quelle: Elsevier, 2018, S. 35

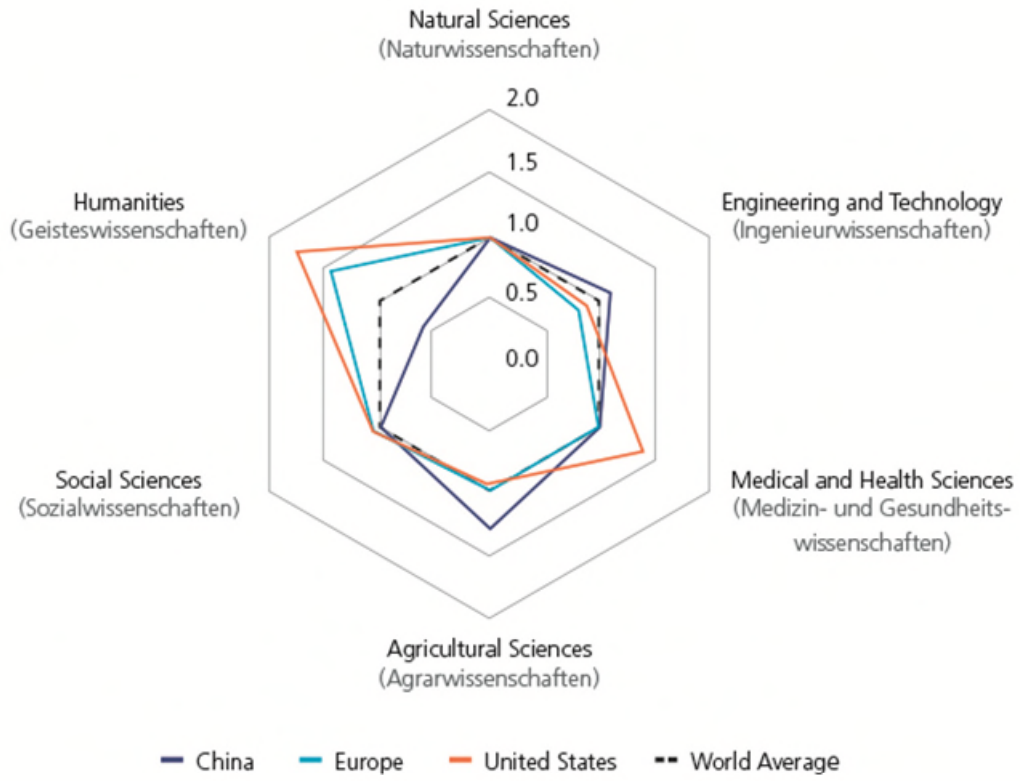
Eine weitere Möglichkeit, um sich aktueller KI-Forschung inhaltlich zu nähern, bietet die Betrachtung der Publikationsintensität (RAI)[9] in verschiedenen wissenschaftlichen Anwendungsfeldern (FORD)[10], welche für das Jahr 2017 in Abbildung 5 dargestellt sind. Abgesehen von dem Anwendungsfeld Geisteswissenschaften (Humanities), in dem Europa überdurchschnittlich aufgestellt ist, liegt die Publikationsintensität in den weiteren Anwendungsfeldern in etwa im globalen Durchschnitt. Die USA sind im Vergleich zu Europa in den Anwendungsfeldern Ingenieur-

9 Die Intensität wird hier in Form des „Relative Activity Index" (RAI) diskutiert. Der RAI gibt im Kontext der FORD-Anwendungsfelder den Anteil der KI-Publikationen einer Region im Verhältnis zum globalen Anteil der KI-Publikationen wieder. Für die Vergleichbarkeit wird der globale Anteil auf 1 gesetzt. Ist der RAI einer Region in einem FORD-Anwendungsfeld größer als 1, dann ist die Publikationsintensität des Landes größer als im globalen Durchschnitt. Bei einem RAI kleiner als 1 ist die Publikationsintensität der Region dementsprechend geringer als im globalen Durchschnitt. Vgl. Elsevier (2018).

10 Die OECD hat sechs Anwendungsfelder (1. Natural Science, 2. Engineering and Technology, 3. Medical and Health Sciences, 4. Agricultural Sciences, 5. Social Sciences und 6. Humanities) definiert, die sogenannten Fields of Research and Development (FORD), um Forschungsergebnisse statistisch und international vergleichbar zu machen. Die Klassifikation der Anwendungsfelder kann dem Anhang 1 entnommen werden. Vgl. OECD (2015).

wissenschaften (Engineering and Technology), Medizin- und Gesundheitswissenschaften (Medical and Health Sciences) und Sozialwissenschaften (Social Sciences) besser aufgestellt. Chinas Publikationsintensität ist in den Anwendungsfeldern Ingenieurwissenschaften (Engineering and Technology) sowie Agrarwissenschaften (Agricultural Sciences) größer.

Abbildung 5: Internationale KI-Publikationsintensitäten – abgebildet als Relative Activity Index (RAI) – in den FORD-Anwendungsfeldern für das Jahr 2017



Quelle: Elsevier, 2018, S. 39

Bisher gibt es keine Publikation, die eine umfängliche Interpretation der Forschungsaktivitäten im Kontext Umwelt und Nachhaltigkeit zuließe – weder auf europäischer noch auf internationaler Ebene (Stand März 2019). Bei dieser ausstehenden Analyse der KI-Forschungslandschaft im Kontext Umwelt und Nachhaltigkeit sollten Publikationen (z. B. aus Publikationsdatenbanken wie Scopus oder dem Web of Science) bzw. Forschungsprojekte (z. B. aus Forschungsdatenbanken wie dem Förderkatalog, Cordis oder der National Science Foundation) mit direktem Umweltbezug (bspw. KI für die Klimamodellierung), aber auch solche mit indirektem Umweltbezug (bspw. KI für autonomes Fahren), berücksichtigt werden.

3.3 Großunternehmen und Start-ups entwickeln KI-Anwendungen im Kontext von Nachhaltigkeit

Unter den führenden Technologieunternehmen sticht aktuell Microsoft mit einem „AI for earth"-Programm heraus, in dessen Rahmen die Firma seit 2017 innerhalb von fünf Jahren 50 Mio. US-Dollar in Forschung und Entwicklung von KI-Lösungen zur Förderung von Umwelt- und Natur-

schutz investieren will. In einem aktuellen „Nature"-Artikel[11] beschreibt Microsofts erster „Chief Environment Scientist" seine diesbezügliche Vision als Portfolio KI-basierter Anwendungen für verschiedenste Domänen (z. B. Land- und Forstwirtschaft, Fischerei etc.), die analog zu allgemeinen Programmierschnittstellen zur Entwicklung spezifischer Applikationen von großen Technologieunternehmen angeboten werden können[12] (Joppa, 2017). Bis dato werden im Rahmen des Programms acht Projekte[13] gefördert (vgl. Tabelle 2).

Tabelle 2: Geförderte Projekte des „AI for earth"-Programms

#	Name	Kurzbeschreibung
1	Project Premonition	Using insects to understand and protect biodiversity
2	FarmBeats	Data-driven farming to sustainably feed the world
3	Land Cover Mapping	Advanced mapping for precision conservation
4	iNaturalist	Enabling everyone to play a role in protecting biodiversity
5	Wild Me	Fighting extinction with citizen science and AI
6	Conservation Metrics	Improving wildlife survey results with deep learning
7	SilviaTerra	Mapping the future of our forests with machine learning
8	Vulcan EarthRanger	Creating safer spaces for endangered animals

Microsoft präsentiert sich als technologie- und entwicklungsstarkes Unternehmen, das neben kommerziellen Zielen auch seiner gesellschaftlichen Verantwortung nachkommt. Die Projekte des „AI for earth"-Programms sind offen für verschiedene Projekte, sodass wissenschaftliche und wirtschaftliche Vorhaben um Unterstützung werben können.

Der Blick auf technologieintensive Start-ups im Kontext von KI und Nachhaltigkeit zeigt verschiedene Ansätze, mit denen junge Unternehmen versuchen, wirtschafts- und nachhaltigkeitsbezogene Ambitionen möglichst gut in Einklang zu bringen. Für die Analyse von Start-ups bildet die Höhe der eingeworbenen Investitionen einen zentralen Erfolgsindikator: Je besser junge Unternehmen Investoren und Fördermittelgeber von der Tragfähigkeit und dem Potenzial ihres technologischen Ansatzes und wirtschaftlichen Geschäftsmodells überzeugen können, desto höher sind die Investitionen. Wenn neben unmittelbar kommerziellen Ambitionen auch Aspekte wie Umwelt und Nachhaltigkeit das Unternehmen prägen, ist die Überzeugungsarbeit bei interessierten Investoren umso schwieriger. Dennoch zeichnen sich vor allem Start-ups durch Entwicklungsaktivitäten im Bereich KI und Nachhaltigkeit aus.

Crunchbase[14] bildet die weltweit führende und umfassendste Datenbank, um Informationen zu Start-ups, ihren Technologien und Geschäftsmodellen sowie dem eingeworbenen Kapital zu recherchieren. Im Rahmen der vorliegenden Analyse wurde deshalb Crunchbase nach Start-ups durchsucht, die künstliche Intelligenz-Technologien im Kontext von Nachhaltigkeit anwenden.

11 verfügbar unter: https://www.nature.com/articles/d41586-017-08675-7

12 Aus dem englischen Original übersetzt mit www.DeepL.com/Translator: „What I'm envisioning is a portfolio of AI-infused 'Earth applications' available to people in diverse domains, from forestry to fisheries. These would be analogous to the application programming interfaces (APIs), such as those for searching or mapping, that have enabled people to build software services using components already made by engineers at technology companies" (Joppa, 2017)

13 siehe https://www.microsoft.com/en-us/ai-for-earth/projects für weitere Informationen.

14 https://www.crunchbase.com/

Tabelle 3: Suchkategorien und-begriffe der Crunchbase Analyse

Crunchbase-Analysekategorien	
Group: Sustainability	**Group: Artificial Intelligence**
Sustainability Green Tech Green Buildings Recycling Environmental Engineering Natural Resources Clean Tech Water Purification Wind Energy Organic Solar Renewable Energy Biofuel Energy Efficiency	Artificial Intelligence Intelligent Systems Machine Learning Natural Language Processing Predictive Analytics

Die Recherche brachte insgesamt 155 Unternehmen hervor, die in ihrer Kategorisierung mindestens einen Begriff aus den in Tabelle 3 benannten Suchgruppen aufführen. Von diesen 155 Unternehmen haben 64 bereits nachweislich externe Investments akquiriert (davon 38 Beträge über 1.000.000 Dollar). Eine inhaltliche Analyse dieser 64 Start-ups zeigt, dass Schwerpunktbereiche des Gründungsgeschehens im Kontext von KI und Nachhaltigkeit bspw. (vgl. auch Tabelle 5 im Anhang) in den folgenden Bereichen zu finden sind:

Im Bereich Recycling und Abfallwirtschaft werden Potenziale von KI unter anderem darin gesehen, die Erkennung und Sortierung von Abfällen zu verbessern, um die Effizienz des Recyclings zu erhöhen:

- Rubicon (gegründet 2008 in Atlanta, https://www.rubiconglobal.com/) bietet günstige Abfallmanagement und Recycling-Lösungen an.
- ZenRobotic (gegründet 2007 in Helsinki, https://zenrobotics.com/de/) ist ein Hersteller von Abfall-Sortier-Technologie mittels Robotern.
- Smarter Sorting (gegründet 2015 in Austin, https://smartersorting.com/) entwickelt Lösungen, die auf maschinellem Lernen basieren und bei der Vermeidung von Produktverschwendung unterstützen sollen.

Erdbeobachtung im Kontext von Ressourcennutzung oder Naturkatastrophen stellt ein weiteres Anwendungsfeld von Start-ups dar. Der Fokus liegt hier vor allem auf Verfahren der Mustererkennung sowie der Verknüpfung großer Datenmengen, um präzisere Aussagen über Auswirkungen klimatischer Veränderungen treffen zu können:

- One Concern (gegründet 2015 in San Francisco, https://www.oneconcern.com/) bietet KI-fähige Lösungen an, um die Auswirkungen von sowie mögliche Reaktionen auf Naturkatastrophen vorherzusagen, potenzielle Gefahren und Kaskadeneffekte für kritische Infrastrukturen zu verstehen, auf Basis realistischer Szenarien zu trainieren, um für eventuelle Katastrophenfälle vorbereitet zu sein.

- PlanetWatchers (gegründet 2016 in San Francisco, http://www.planetwatchers.com/) ist ein Unternehmen, das Dienstleistungen im Bereich Raumaufklärung und Monitoring natürlicher Ressourcen anbietet.

Für den Bereich Agrar- und Lebensmitteltechnologien bilden Verfahren des Maschinellen Lernens eine Grundlage zur Verbesserung von Produktionsverfahren (z. B. durch effizienteren Rohstoffeinsatz), sie dienen aber auch der Analyse von Daten aus der sensorbasierten Überwachung von landwirtschaftlichen Nutzflächen:

- Plenty (gegründet 2014 in San Francisco, https://www.plenty.ag/) ist ein Unternehmen, das pflanzenwissenschaftlich basierte Lösungen für eine pestizid- und gentechnikfreie Landwirtschaft entwickelt.
- GreenSight (gegründet 2015 in Boston, http://www.greensightag.com/) baut eine Platt-form für Unternehmen im Bereich der Luftaufklärung auf.

Für die Erhöhung von Energie- und Gebäudeeffizienz werden durch KI Wege zur Verbesserung der Systemsteuerung von miteinander vernetzten Produktionsmaschinen und auch zur Regelung von Heiz-, Kühl- und Lüftungssystemen innerhalb von Gebäuden gesucht.

- Bractlet (gegründet 2011 in Austin, http://www.bractlet.com/) hat eine Datenanalyse-Plattform aufgebaut, mit deren Hilfe die Energieversorgung von Bürogebäuden wirtschaftlich gemanagt werden kann.
- Elmodis (gegründet 2015 in Krakau, https://elmodis.com/) bietet Internet of Things (IoT)-Lösungen an, mit denen die Leistung und Effizienz von Industriemaschinen gesteigert werden sollen.
- DABBEL (gegründet 2018 in Ilmenau, https://www.dabbel.eu/): bietet Lösungen zur autonomen Gebäudesteuerung und Energieeinsparung an.

Im Vergleich zu den insgesamt knapp 12.000 Start-ups, die in der Crunchbase-Datenbank Bezüge zu KI angeben, sind die 155 Start-ups mit Nachhaltigkeitsbezug eher eine Nische. Dennoch wird deutlich, dass die identifizierten Start-ups künstliche Intelligenz bereits in konkrete Anwendungen bringen und sie als existierende Technologie für ihr Geschäftsmodell nutzen. Nicht Gegenstand der Analyse sind solche Start-ups gewesen, die außerhalb dieser Nische zwar KI einsetzen, dadurch unter Umständen jedoch negative Effekte auf die Umwelt ausüben.

4 Entwicklungskorridore von KI für Nachhaltigkeit

In Europa und seinen Mitgliedsstaaten findet aktuell eine breite Debatte über den adäquaten Umgang mit KI statt. Einerseits geht es darum, deutliche förder- und innovationspolitische Impulse zu setzen, um der momentanen Wissens- und Technologieführerschaft von Staaten wie China und den USA selbstbewusst zu begegnen und die Wettbewerbsfähigkeit der hiesigen Wirtschaft zu sichern. Anderseits geht es um die Gestaltung eines emanzipierten, europäischen Ansatzes, der neben Technologieentwicklung auch ethische Aspekte Künstlicher Intelligenz integriert und neben ökonomischen auch gesellschaftliche Mehrwerte ins Zentrum rückt.

Aus Sicht des Umweltressorts entsteht insbesondere im letztgenannten Zusammenhang ein vielversprechender Möglichkeitsraum, um die globalen Megatrends von Digitalisierung und Nachhaltigkeit miteinander zu verknüpfen und die radikalen Innovationsdynamiken im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien noch stärker als bisher auf (sozial-)ökologisch relevante Zukunftsfelder zu beziehen.

Im KI-Eckpunktepapier der Bundesregierung (Stand Juli 2018) waren umwelt- und nachhaltigkeitsbezogene Themen noch deutlich unterrepräsentiert. Tauchten entsprechende Aspekte in den formulierten Zielen noch vereinzelt auf (vgl. Ziel h und i, S.2), fehlen in sämtlichen benannten Handlungsfeldern die Bezüge zu Umwelt, Natur und Nachhaltigkeit vollständig. Wie unter 3.1 dargestellt, wurden im Rahmen der KI-Strategie der Bundesregierung konkretere Bezüge hergestellt und einzelne Maßnahmen formuliert. Gleichwohl wurde dies lediglich auf untergeordneter Ebene exemplarisch realisiert, denn weder die Handlungsfelder noch die oberhalb davon formulierten Ziele greifen explizit Aspekte der Umwelt, Natur und Nachhaltigkeit auf.

Dementsprechend sind die hier formulierten Entwicklungskorridore Ergebnis der Diskussionen mit ausgewählten Expertinnen und Experten (vgl. Kapitel 1) für das Thema KI und greifen an geeigneten Stellen auch Erkenntnisse der Auseinandersetzung mit Akteuren und Rahmenbedingungen (vgl. Kapitel 3) auf.

4.1 KI für eine ressourceneffizientere Industrie

Das Leitbild der Industrie 4.0 beschreibt den allgegenwärtigen Einfluss der Digitalisierung auf das verarbeitende Gewerbe. Eine umfassende Vernetzung von Maschinen ermöglicht eine zunehmend flexible und adaptive Produktionsplanung und Fertigung. Das technologische Fundament der Industrie 4.0 wird durch cyber-physische Systeme gelegt, in denen sich mechanische und elektronische Geräte (Produktionsmaschinen, Industrieroboter etc.) mit Informations- und Kommunikationstechnologien (Planungs- und Steuerungssoftware) vernetzen. Dabei fallen beachtliche Datenmengen an, die für die Prozesse im Unternehmen, die Verbesserung bestehender oder die Entwicklung neuer Produkte und/oder neuer Geschäftsmodelle einen hohen Mehrwert liefern können. Aufgrund der Masse und Komplexität der daraus resultierenden Daten ist eine Auswertung mit herkömmlichen Analyse- und Optimierungsverfahren kaum zu bewerkstelligen.

KI-Algorithmen setzen hier an und stellen eine Schlüsseltechnologie dar, um die Potenziale der Industrie 4.0 möglichst umfassend auszunutzen. Das größte Anwendungspotenzial bieten dabei die KI-Anwendungen Predictive Analytics, Intelligente Assistenzsysteme, Robotik, Intelligente Automatisierung sowie Intelligente Sensorik. Querschnittstechnologien wie Computer Vision, Machine Learning sowie Aktionsplanung und Optimierung sind zukünftig ebenfalls von hoher Bedeutung, um die Vision einer digital vernetzten, flexiblen und leistungsoptimierten Produktion zu realisieren (Seifert et al., 2018).

Obwohl die Potenziale von Industrie 4.0 in der aktuellen Auseinandersetzung insbesondere betriebswirtschaftlich und funktional gedeutet werden, impliziert die Nutzung von KI im Kontext

des verarbeitenden Gewerbes prinzipiell auch Chancen für Umwelt und Nachhaltigkeit. Auch wenn Digitalisierung hier sicherlich die größere Klammer darstellt, entsteht vor dem Hintergrund der aktuell regen Debatte um künstliche Intelligenz die Chance, die Leitbilder von Industrie 4.0 und Nachhaltigkeit stärker als bisher miteinander zu verknüpfen. Hierfür sind nachfolgend zwei Anknüpfungspunkte skizziert:

1. In der Binnenperspektive von Unternehmen stellen durch Industrie 4.0 und KI realisierbare Effizienzsteigerungen einen Schnittbereich ökonomischer und ökologischer Potenziale dar. So ermöglichen selbstlernende Systeme sowohl high-level-Ansätze, wie Digitale Zwillinge von Produkten und Prozessen, als auch low-level-Ansätze wie die intelligente, bedarfsorientierte Maschinen- und Gebäudesteuerung, neben der Reduktion von Entwicklungs- und Produktionskosten, auch die Vermeidung unnötiger Ressourcenaufwände. Gleiches gilt für die Verringerung von Ausschussraten im Produktionsprozess. Durch KI-Algorithmen angereicherte Steuerungssysteme können in diesem Zusammenhang dazu beitragen, Produktionsprozesse am Optimum eines möglichst hohen ökonomischen und ökologischen Nutzens auszurichten.
2. Eine im Vergleich dazu progressivere Anwendung von KI-Algorithmen ergibt sich in der Perspektive unternehmensübergreifender Wertschöpfungssysteme. Enden etablierte Ansätze der Industrie 4.0 typischerweise an den Unternehmensgrenzen bzw. den direkten Zulieferer- und Kundenschnittstellen, ermöglicht die Verknüpfung von produkt- und produktionsbezogener Daten innerhalb des gesamten Wertschöpfungssystems einer Branche (oder sogar darüber hinaus) das Tracking und Monitoring des gesamten Lebenszyklus von Bauteilen und verarbeiteten Materialien. Dies wäre wiederum eine Kernvoraussetzung, um die Vision einer Kreislaufwirtschaft zu verwirklichen (vgl. z. B. Wilts & Berg, 2017), in der Ressourcenströme zuverlässig kontrolliert werden.

Auch wenn durch KI ermöglichte Effizienzsteigerungen im Kontext der Industrie prinzipiell positive Umwelteffekte auslösen können, müssen auch hier die potenziellen Rebound-Effekte berücksichtigt werden. Entscheidend ist dabei, wie Unternehmen die eingesparten Ressourcen nutzen. Werden diese reinvestiert, um die Wertschöpfung weiter zu steigern, wäre dies nicht im Sinn der Nachhaltigkeit. Investieren sie jedoch weiter in Umwelttechnologien und -prozesse, sind die ökologischen Effekte positiv. Für die Umweltpolitik ergibt sich daraus die Dringlichkeit, Anreize und Regulierung so zu gestalten, dass sich Unternehmen verstärkt für Effizienz statt Expansion entscheiden.

4.2 KI und (IT-)Infrastruktur für KI

Die Querbezüge zwischen KI und technischen Infrastrukturen lassen sich sowohl hinsichtlich der Gestaltung der bestehenden IT-Infrastruktur (1) als auch der Weiterentwicklung bestehender Infrastrukturen mittels KI (2) zusammenfassen. In beiden Aspekten ergeben sich Nachhaltigkeitsbezüge, die durch das Umweltressort weiter ausbuchstabiert werden sollten:

1. Grundsätzlich lassen sich die Potenziale Künstlicher Intelligenz nicht losgelöst von ihren technischen und IT-infrastrukturellen Voraussetzungen betrachten. Die Verfügbarkeit von Daten, die Nutzung leistungsstarker Rechenkapazitäten sowie das Vorhandensein sicherer, digitaler Speicherarchitekturen bilden die zentralen Voraussetzungen, um leistungsfähige KI-Algorithmen entwickeln und nutzen zu können. Die Europäische Kommission macht diesen Zusammenhang bereits sehr deutlich und definiert Aspekte wie „access to data“, „data commons platforms“ oder „infrastructure investments“ als unmittelbare Handlungsfelder und Support-Maßnahmen einer europäischen KI-Strategie (European Political Strategy Centre, 2018). Der Beitrag des BMU sollte die Nachhaltigkeit entsprechender IT-Infrastrukturen betonen. Neben originär umweltbezogenen Argumenten (klimaneutrale

Energieversorgung, ressourcenschonende Ausgestaltung etc.) sind dabei auch sozial-ökologische Anforderungen an gesellschaftliche Partizipation, hohe Transparenz sowie die Ermöglichung nicht-proprietärer bzw. nicht-kommerzieller Nutzungs- und Verwertungsperspektiven zu berücksichtigen.

2. Eine Reihe weiterer Anknüpfungspunkte und Nachhaltigkeitspotenziale durch KI ergeben sich für bestehende technische Infrastrukturen, z.B. smarte Wasserversorgung und smarte Energieversorgung. Weitere Potenziale werden in Forschungs- und Entwicklungsvorhaben zu Smart Cities, Smart Regions, intelligente Netzen, etc. bereits umfassend adressiert. Hier treten auf öffentlicher Seite primär das BMBF und das BMWi als Akteure in Erscheinung. Mithilfe von KI sollen in den genannten Fällen die grundlegenden technischen Infrastrukturen (Wasser, Energie, IT-Infrastruktur, Verkehrswege etc.) verbessert werden, um entweder bestehende Strukturen optimal zu nutzen oder die Gestaltung zukünftig notwendiger Strukturen zu modellieren.

Die Entwicklung zukunftsfähiger technologischer Infrastrukturen ist jedoch auch für die Erfolgsaussichten einer nachhaltigen gesellschaftlichen Transformation von zentraler Bedeutung (vgl. WBGU, 2016, S. 14). Aus Sicht des BMU sollten die durch KI induzierten Weiterentwicklungen bzw. Umbauten technischer und digitaler Infrastrukturen immer auch hinsichtlich ihrer ökologischen Effekte bewertet und die daraus resultierenden Chancen für nachhaltige Entwicklung aktiv gefördert bzw. erkannte Risiken minimiert werden.

4.3 KI für einzelne Sektoren

Viele Sektoren stehen unter Veränderungs- bzw. Anpassungsdruck. Dieser Druck kann bspw. aus dem voranschreitenden Klimawandel resultieren, aber auch durch andere Megatrends wie Urbanisierung hervorgerufen werden. Um den Wandel in einzelnen Sektoren nachhaltig gestalten zu können, kommen eine Vielzahl soziotechnischer Innovationen infrage. Auch KI bietet Potenziale, in einzelnen Sektoren zu einer nachhaltigen Gestaltung beitragen zu können:

- Mobilität: Die umweltfreundliche Gestaltung des Verkehrssystems ist ein vielerorts erwähntes Anwendungsfeld für KI. Vor allem in autonomen Fahrzeugen (Pkw, Lkw und ÖPNV) werden diesbezüglich Potenziale gesehen, denn gemeinhin gilt autonom fließender Verkehr als effizienter hinsichtlich des Energiebedarfs (Herweijer, Combes, Ramchandani & Sidhu, 2018, S. 12). Voraussetzung dafür ist jedoch die Vernetzung der Verkehrsteilnehmer untereinander sowie eine Vielzahl von Sensoren, die Informationen über die Fahrzeugumgebung auswerten und Aktivitäten auslösen. Eine solche Vernetzung benötigt wiederum eine entsprechende Netzinfrastruktur, also leistungsfähige Funknetze sowie dezentrale Rechenzentren zur Datenverarbeitung. Das BMVI hat die Bedeutung von KI für das Verkehrssystem erkannt und fördert entsprechende Forschungs- und Entwicklungsvorhaben (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur [BMVI].

- Energie: Auch der Energiesektor steht unter Anpassungsdruck. Die Gewährleistung einer stabilen Stromversorgung bei gleichzeitigem Ausbau erneuerbarer Energien und einer Reduzierung der klimaschädlichen Emissionen bedeutet nicht nur einen Ausbau der Stromnetze, sondern auch eine zunehmend dezentrale, bedarfsgerechte Steuerung. Für KI könnte eine Anwendung darin bestehen, diese Dezentralisierung von Netzen und Steuerungsmechanismen zu unterstützen, indem die notwendigen Informationen über Stromangebot und -bedarf in Echtzeit analysiert und von autonomen Entscheidungssystemen verarbeitet werden kön-

nen (Herweijer et al., 2018, S. 12; Terzidis, Jahn & Waldmann, 2018). Auch Einsparpotenziale im Energiesektor können realisiert werden, wenn KI auf Basis einer Verknüpfung von Energiepreis- und Wetterdaten moderne Gebäude effizient im Hinblick auf Heizung und Kühlung steuert.

- Landwirtschaft: Ebenfalls benannt ist der Bereich der Landwirtschaft als Anwendungsfeld für KI (Herweijer et al., 2018, S. 13). Hier entstehen zunehmend große Datenmengen über den Zustand landwirtschaftlicher Nutzflächen aus satellitenbasierten Erdbeobachtungssystemen, aber auch aus lokalen Sensoren und Messungen. Die Aufbereitung, Zusammenführung und Analyse dieser Datenmengen kann zur Entwicklung besserer Entscheidungs- und Prognosemodelle beitragen, mit denen die Beratung und Ertragssteuerung auch kleinskaliger Anbaumethoden KI-basiert unterstützt werden kann.

Ferner bestehen zwischen den aufgeführten und weiteren Sektoren bzw. Bereichen vielfältige und komplexe Wechselwirkungen. KI-Anwendungen können dazu beitragen, diese Wechselwirkungen zu berücksichtigen, indem Informationen über Zustände in einem Sektor in die Steuerungsmechanismen in einem anderen Sektor integriert werden. So können z. B. präzise Wetter- und Klimamodelle für einen in erster Linie auf erneuerbaren Energiequellen basierenden Energiesektor relevant sein. Je nach Verfügbarkeit können Leistungsschwankungen gesteuert und ausgeglichen werden. Schnittstellen ergeben sich auch zwischen dem Energie- und dem Mobilitätssektor, denn eine bedarfsgerechte Steuerung der Stromnetze kann Konsequenzen für Energiespeicher haben, die für Elektromobilität notwendig sind.

4.4 KI als Sicherheits- und Warnsystem für den Umweltschutz

Da intelligente Systeme in der Lage sind, auch komplexe Zusammenhänge zu deuten, Muster zu erkennen und Folgen zu modellieren, stellen flexible und adaptive Sicherheits- und Warnsysteme für den Umweltschutz ein vielversprechendes Anwendungsfeld künstlicher Intelligenz dar. Diesbezügliche Potenziale lassen sich auf verschiedenen Ebenen verorten:

1. Insbesondere Industrieunternehmen stehen vor der Herausforderung, ihre Prozesse im Einklang mit gesetzlichen Richtlinien zur Minderung der Umweltbelastungen im Allgemeinen und der Verringerung der Emissionen von Treibhausgasen bzw. luftverunreinigenden Stoffen etc. zu gestalten. Im Kontext der umfassenden Erhebung unternehmerischer Daten zu Maschinenauslastungen, Ressourcenflüssen, Energieverbräuchen etc. können KI-basierte Detektions-, Warn- und Prognosesysteme sowohl dazu beitragen, drohende Grenzwertüberschreitungen frühzeitig zu erkennen bzw. zu vermeiden als auch Nachhaltigkeits- und Performance-Kriterien in Produktionsprozessen flexibel zu harmonisieren.
2. Eine ökologisch nachhaltige Entwicklung neuer Materialien und Produkte erfordert neben Funktions- und Praxistests auch die vorausschauende Abschätzung der Umwelteffekte, die bei einer Markteinführung freigesetzt/ausgelöst werden. Die dafür notwendigen Studien werden aktuell noch nicht umfassend erstellt. Als Erweiterung etablierter Methoden statistischer Versuchsplanung („design of experiments“) können KI-basierte Softwarelösungen dazu beitragen, experimentelle Settings zu modellieren, vergleichende Querbezüge zu vergleichbaren Produkten/Materialien einzubeziehen, konkrete Nutzungsszenarien zu berücksichtigen und mögliche Umweltfolgen zu ermitteln.
3. Mit Blick auf technologische Infrastrukturen (vgl. Entwicklungskorridor 2) ist es aufgrund der hohen Komplexität des Energie-, Verkehrs-, Telekommunikationssystems etc. aktuell schwierig, deren kritische Parameter in Echtzeit zu überprüfen. KI kann hier ansetzen und

dazu beitragen, die Krisensicherheit und Resilienz großtechnischer Systeme zu steigern und möglichen Ausfällen oder Gefahren für Mensch und Umwelt vorzubeugen.

4. Durch die Verknüpfung und Verarbeitung auch komplexer Daten in Echtzeit kann künstliche Intelligenz auch Individuen dabei unterstützen, das Bewusstsein für die ökologischen Auswirkungen (CO2-Fußabdruck, Rebound-Effekte etc.) ihres alltäglichen Handelns zu schärfen sowie ihnen dabei helfen niedrigschwellige Anreize und Ansätze für nachhaltigere Verhaltensweisen zu entwickeln. Dies kann prinzipiell sowohl über direkte Rückmeldungen als über implizite Verhaltenslenkung („Nudges“) erfolgen (Bernauer et al., 2017). Hierbei ist jedoch das Verhältnis zwischen dem Aufwand der notwendigen Datensammlung und den realisierbaren Nachhaltigkeitseffekten zu berücksichtigen sowie die tendenziell kritischen Erkenntnisse, die nachhaltige Konsumforschung bezüglich der Stimulation individueller Verhaltensänderung erarbeitet hat (z. B. Moser & Kleinhückelkotten, 2017).

4.5 KI als Impulsgeber für die Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung

Obwohl Teilbereiche der Nachhaltigkeitsforschung (insbesondere Klimamodelle) bereits stark durch Informations- und Kommunikationstechnologien geprägt sind, ist der Stand der Digitalisierung nicht in allen Bereichen der Umwelt- und Nachhaltigkeitsforschung so weit fortgeschritten. Zwar bildet Interdisziplinarität ein wichtiges (Qualitäts-)Merkmal der Arbeitsweise vieler relevanter Institute, jedoch sind Schnittstellen zu Computer und Data Science bisher noch nicht voll erschlossen. Die Aneignung von KI-Methoden kann allerdings zentrale Impulse für die Weiterentwicklung nachhaltigkeitsbezogener Forschungsansätze schaffen.

So erfordert z. B. die Statusentwicklung und -überprüfung der Sustainable Development Goals ein komplexes Monitoring Framework und die kontinuierliche Ermittlung und Überprüfung globaler, nationaler und regionaler Indikatoren. In einem erläuternden UN-Bericht werden der Evaluationsansatz sowie die dafür benötigten Daten wie folgt beschrieben[15]: *„Zusammengenommen werden sie es ermöglichen, eine Datenrevolution für die Entwicklung einzuleiten. Offizielle Statistiken, die aus Umfragen und anderen offiziellen Verwaltungsdaten abgeleitet werden, werden eine entscheidende und herausragende Rolle spielen. Sie werden unter anderem ergänzt durch inoffizielle Daten und andere Leistungskennzahlen, einschließlich Geschäftskennzahlen, Umfragedaten und georeferenzierte Informationen über staatliche Einrichtungen.”* (Sustainable Development Solutions Network, 2015, S. 22). Es besteht jedoch das Problem, dass die relevanten Daten nicht in jedem Land oder jeder Weltregion in gleicher Abdeckung und Qualität vorhanden sind. Neue KI-Ansätze, die bspw. mittels kompositionaler Ansätze strukturelle Daten und prozedurales Expertenwissen systematisch in statistische Trainingsprozesse einbringen (“Informed Machine Learning”), können entscheidende Mehrwerte liefern, um Nachhaltigkeitsindikatoren trotz lückenhafter Datenlagen robust und adaptiv zu ermitteln.

4.6 KI als Betriebssystem für das „Raumschiff Erde

Es ist die Aufgabe der Politik, Pfade für nachhaltige Entwicklung zu finden, die das Dilemma lösen helfen zwischen einerseits dem Anspruch auf gleiche und gute Lebensbedingungen für alle Menschen und andererseits dem Bewusstsein, dies nicht auf Kosten von Klima, Umwelt und künftiger Generationen realisieren zu können. Ansätze von Green Growth oder einer Green Economy verdeutlichen diese Ambitionen, bleiben hinsichtlich konkreter Gestaltungs- und/oder Regulierungsvorschläge jedoch zumeist vage. Ähnlich verhält es sich mit den existierenden

15 Aus dem englischen Original übersetzt mit www.DeepL.com/Translator: „Taken together, they will enable launching a data revolution for development. Official statistics derived from surveys and other official administrative data will play a critical, preeminent role. They will be complemented by unofficial data, and other performance metrics including business metrics, polling data, and georeferenced information on government facilities, among others.” Sustainable Development Solutions Network (2015, S. 22)

Klimamodellen, die zwar die notwendigen Emissionsreduktionen zur Einhaltung politisch vereinbarter Klimaziele berechnen, hinsichtlich möglicher Ansätze und Maßnahmen, wie die ambitionierten Ziele zu erreichen sind, jedoch eher allgemein und ungenau bleiben[16]: *„Wege zur Begrenzung der globalen Erwärmung [....] würden schnelle und weitreichende Übergänge in den Bereichen Energie, Land, Städte und Infrastruktur (einschließlich Verkehr und Gebäude) sowie Industriesysteme [....] erfordern und zu einer tiefgreifenden Emissionsreduzierung in allen Sektoren, einem breiten Portfolio von Minderungsoptionen und einer deutlichen Erhöhung der Investitionen in diese Optionen führen.“* (IPCC, 2018, S. 21).

In der Schnittmenge von allgegenwärtiger Datengenerierung, selbstlernenden Auswertungs- und Prognosealgorithmen und exponentiellen Verbesserungen von Prozessor- und Speicherkapazitäten stellt künstliche Intelligenz eine neue, vielversprechende Möglichkeit dar, um Ursachen und Wirkungen in Bezug auf Klimawandel, Umweltverschmutzung, Biodiversität etc. mit zunehmender Detaillierung zu verarbeiten.

Auf der einen Seite werden im Kontext von Industrie 4.0, Plattformökonomie, Smart Cities, Precision Farming, Dezentralen Energienetzen, sozialen Netzwerken etc. in einer Vielzahl unterschiedlicher Wertschöpfungssysteme kontinuierlich Daten über Ressourcenströme, Energieverbräuche, Finanztransaktionen, Konsumstile etc. erhoben. Auf der anderen Seite werden der Zustand der Erde und der Status planetarer Belastungsgrenzen durch Klimamodelle, Erdbeobachtungen, Wetteraufzeichnungen etc. latent erfasst und bewertet. Obwohl Daten den gemeinsamen Nenner für jede dieser Bestrebungen bilden, findet eine umfassende Verknüpfung der verfügbaren Datenmengen bisher nicht statt. Der Einsatz einer leistungsstarken, selbstlernenden, immer komplexer werdenden KI kann die technologische Grundlagen für diese Verknüpfung herstellen und dazu beitragen, die großen Zusammenhänge des Systems Erde zu erfassen.

Beschrieb Buckminster Fuller die Erde in den 60er-Jahren als *„spaceship that didn’t come with an operation manual“* (vgl. Sieden, 2014), kann KI nicht zuletzt (umwelt-)politischen Entscheidungsträgern dabei helfen, die technischen, ökonomischen oder sozialen Stellschrauben nachhaltiger Entwicklung besser zu verstehen und die Gestaltung regulatorischer Rahmenbedingungen daran auszurichten. Das Betriebssystem liefert die Koordinaten für den zukünftigen Kurs.

16 Aus dem englischen Original übersetzt mit www.DeepL.com/Translator: „Pathways limiting global warming [...] would require rapid and far-reaching transitions in energy, land, urban and infrastructure (including transport and buildings), and industrial systems [...] and imply deep emissions reductions in all sectors, a wide portfolio of mitigation options and a significant upscaling of investments in those options.” Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC] (2018, S. 21)

5 Umweltpolitische Gestaltungs- und Regulationsansätze

Auch wenn in den skizzierten Entwicklungskorridoren vielversprechende Ansätze für nachhaltigkeitsfördernde Anwendungszusammenhänge entstehen, ist die Etablierung einer ökologisch sinnvollen Nutzungspraxis von künstlicher Intelligenz kein Selbstläufer. Vielmehr ist davon auszugehen, dass es gezielter politischer Impulse bedarf, um Technologieentwicklungen und -anwendungen in nachhaltige Bahnen zu leiten.

Obwohl Nachhaltigkeit als Leitbild von Innovations- und Förderpolitik fest verankert ist, wird in der öffentlichen Auseinandersetzung mit neuen Technologien im Allgemeinen sowie KI im Speziellen deutlich, dass die zur Umsetzung dieses Leitbildes vorhandenen Potenziale noch nicht ausgeschöpft sind. Während ethisch-soziale Aspekte in der Diskussion um „KI made in Germany" zu Recht eine bedeutende Rolle spielen, werden ökologisch-nachhaltige Effekte und Technikfolgen nur unzureichend thematisiert. Dies wird bspw. auch in der Mitglieder- und Informationsstruktur auf Vernetzungsplattformen wie der I4.0 Plattform[17], der Plattform „Lernende Systeme"[18], Veranstaltungen wie dem Digitalgipfel[19] oder Gremien wie dem Digitalrat[20] deutlich. Akteure und Initiativen, die Positionen im Sinn von Umwelt und Nachhaltigkeit adressieren, finden sich entweder gar nicht oder werden nur am Rand beteiligt – hier ergibt sich für das Umweltressort die Notwendigkeit, sich und seine Positionen stärker in die einschlägigen politisch-öffentlichen Debatten einzubringen.

Eine Grundvoraussetzung dafür bildet, den Technologie- und Fortschrittsglauben, der aktuell die öffentliche Debatte um künstliche Intelligenz prägt, unter sozial-ökologisch kritischen Gesichtspunkten zu hinterfragen. So müssen in vielen möglichen Anwendungsbereichen von KI neben den (in der Regel wirtschaftlichen) Potenzialen auch etwaige ökologische Risiken berücksichtigt werden. Mit Blick auf autonome Autos bspw. ist denkbar, dass die Integration von KI in Assistenz- und Entertainmentsysteme auch zu mehr Individualverkehr bzw. höheren Energieaufwände während der Fahrt führen kann. Dies würde dem Ziel einer nachhaltigen Verkehrswende offensichtlich widersprechen. Ähnlich ist es im Kontext von Online-Marketing: Wenn selbstlernende Algorithmen Werbung besser personalisieren, führt dies zu mehr Konsum, was wiederum steigende Ressourcenaufwände für Produktion und Logistik erfordert. Selbst in Kontexten, in denen Effizienzgewinne erzielt werden können, entstehen Rebound-Risiken, die sich ökologisch nachteilig auswirken können (vgl. Entwicklungskorridor 1). Da die Wissensbasis für die ökologischen Effekte künstlicher Intelligenz auch international noch dünn ist, können entsprechend ausgerichtete Forschungsprojekte neben dem nationalen auch den internationalen Diskurs anregen.

Im Gesamtkontext politischer Handlungsfelder zur Schaffung innovationsfördernder oder regulierender Rahmenbedingungen für KI-Lösungen sollten auch die Eckpunkte für die Entwicklung der Algorithmen selbst nicht vergessen werden. Der Digitalisierungs-Slogan „Code is law" ist in dieser Hinsicht durchaus als Warnung zu verstehen (Lessig, 2000). So müssen die eingeschriebenen Entscheidungs- und Selektionsprämissen der Algorithmen transparent sein: Wenn KI bspw. Vorschläge zur Nutzung multimodaler Verkehrswege macht, sollte nachvollziehbar sein, nach welchen Kriterien Vorschläge und Empfehlungen folgen. Hier gilt es, Einklang mit politischen Präferenzen wie bspw. nachhaltiger Entwicklung herzustellen.

17 https://www.plattform-i40.de/I40/Navigation/DE/Home/home.html

18 https://www.plattform-lernende-systeme.de/

19 https://www.de.digital/DIGITAL/Navigation/DE/Digital-Gipfel/digital-gipfel.html

20 https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/digitalisierung/der-digitalrat-experten-die-uns-antreiben-1504866

Das Repertoire politischer Handlungsoptionen zur Steigerung von Nachhaltigkeit und Transparenz im KI-Kontext umfasst neben Anreizen für Forschung und Entwicklung (1) auch regulative Stellschrauben (2):

1. Im Kontext von Förderbekanntmachungen zu KI kann die Bedeutung von Nachhaltigkeitsaspekten unmittelbar gestärkt werden. Als Vorbild taugt hier die Integrierte Forschung im BMBF- Förderprogramm „Technik zum Menschen bringen“[21], die in den Auswahlkriterien für Projektanträge neben technischen Kriterien auch ethische, rechtliche und soziale Aspekte berücksichtigt. Hier sollten UBA/BMU einen ressortübergreifenden Austausch suchen und prüfen, inwiefern umweltbezogene Entwicklungsleitbilder und -standards für neue Technologien wie KI gemeinsam entwickelt und umgesetzt werden können. Empfehlenswert wäre es, die relevanten interdisziplinären Fach-Communities an einen solchen Prozess beratend teilhaben zu lassen. In diesem Zusammenhang bieten die im Rahmen der nationalen KI-Strategie in Aussicht gestellten 50 digitalen Leuchttürme für Umwelt- und Klimaschutz eine Möglichkeit (BMU, 2018), um grüne KI-Lösungen unmittelbar zu fördern, aber auch einen nachhaltigen Forschungs- und Entwicklungsstil für technologische Innovationen zu prägen.
2. In der aktuellen Auseinandersetzung mit KI bilden Effizienzpotenziale einen wesentlichen Bezugspunkt zur Nachhaltigkeitsthematik. Wie im Entwicklungskorridor 1 angedeutet, ist in einem kapitalistischen Wirtschaftssystem davon auszugehen, dass Unternehmen die eingesparten Ressourcen in neue Wertschöpfungsprozesse investieren, was zwar im Sinn der Wirtschaft, nicht jedoch der Umwelt ist. Diese Tendenz aufgreifend, drängen sich im Kontext neuer, produktivitäts- und effizienzsteigernder Technologien wie KI aus umweltpolitischer Sicht regulatorische Konzepte einer (digital-)ökologischen Steuerreform auf (Lange & Santarius, 2018, 180ff.). Deren Umsetzung würde einen entscheidenden Beitrag leisten, um die Verbindlichkeit von Green Growth-/Economy-Ambitionen zu erhöhen und das ökologische Bewusstsein unternehmerischen Handels zu stärken.

21 https://www.technik-zum-menschen-bringen.de/forschung/integrierte-forschung

6 Anhang

Tabelle 4: FORD-Anwendungsfelder (OECD, 2015, S. 59)

Broad classification	Second-level classification
1. Natural Sciences	1.1 Mathematics 1.2 Computer and information sciences 1.3 Physical sciences 1.4 Chemical sciences 1.5 Earth and related environmental sciences 1.6 Biological sciences 1.7 Other natural sciences
2. Engineering and technology	2.1 Civil engineering 2.2 Electrical engineering, electronic engineering, information engineering 2.3 Mechanical engineering 2.4 Chemical engineering 2.5 Materials engineering 2.6 Medical engineering 2.7 Environmental engineering 2.8 Environmental biotechnology 2.9 Industrial biotechnology 2.10 Nano-technology 2.11 Other engineering and technologies
3. Medical and health sciences	3.1 Basic medicine 3.2 Clinical medicine 3.3 Health sciences 3.4 Medical biotechnology 3.5 Other medical sciences
4. Agricultural and veterinary sciences	4.1 Agriculture, forestry, and fisheries 4.2 Animal and dairy science 4.3 Veterinary science 4.4 Agricultural biotechnology 4.5 Other agricultural sciences
5. Social Sciences	5.1 Psychology and cognitive sciences 5.2 Economics and business 5.3 Education 5.4 Sociology 5.5 Law 5.6 Political Science 5.7 Social and economic geography 5.8 Media and communications 5.9 Other social sciences
6. Humanities and the arts	6.1 History and archaeology 6.2 Languages and literature 6.3 Philosophy, ethics and religion 6.4 Arts (arts, history of arts, performing arts, music) 6.5 Other humanities

Tabelle 5: Ergebnisse der Crunchbase-Analyse

Organization Name	Description
Rubicon Global	Rubicon Global is a technology company that provides waste, recycling, and smart city solutions to businesses and governments worldwide.
Plenty	Plenty is an agriculture technology company that develops plant sciences for crops to flourish in a pesticide- and GMO-free environment.
NEOS GeoSolutions	NEOS is a geosciences company providing 3D model of the subsurface to assist exploration geoscientists make informed decisions.
Drayson Technologies Group	An IoT platform company using innovative wireless charging technology & machine learning software to create smart sensor networks
One Concern	One Concern is an AI company with a vision for planetary-scale resilience where everyone lives in a safe, equitable, and sustainable world.
NuMat Technologies	The future of precision engineering.
TROVE Predictive Data Science	TROVE Predictive Data Science, Inc. is an innovator in predictive data-science technology.
Clobotics	Clobotics offers information technology services.
V5 Systems	Developer of World's first Self-Powered Outdoor Security and Computing Platform for the Industrial IoT
ZenRobotics	ZenRobotics is a supplier of intelligent sorting robots for the waste industry.
H3 Dynamics Holdings	Off-grid tele-robotics and AI-enabled micro-services marketplace for asset maintenance or security automation
REstore	REstore is an award-winning energy technology company leading the delivery of advanced automated Demand Response
Smarter Sorting	Smarter Sorting is a machine learning for waste.
Sealed	Sealed finances home upgrades with energy savings
Verv	Verv is a clever home energy assistant that gives you intelligent information about home appliances.
iUNU	iUNU is an industrial computer vision company.
Bractlet	Bractlet has created the most advanced energy analytics platform to help commercial buildings maximize net operating income.
Elmodis	Elmodis offers an end-to-end IoT solution that monitors performance and improves operating efficiency of industrial machines.
Secure Supplies Group - Fueling Healthy Communities	Secure Supply Group Fuels Healthy Communities by Providing Power to Gas, Energy Storage, Grid Security ,Critical Gas & Gas Fueling Solutions
Limejump	Limejump is a Technology-Driven Utility: harnessing the power of big data to positively disrupt and transform today's energy market.
Wexus Technologies	Utility-scale, IoT software company that empowers the global food supply chain

Organization Name	Description
GreenSight	GreenSight is building the scaleable, enterprise platform for low altitude aerial intelligence.
Astraea	Information Technology and Services
GreenPocket	GreenPocket is a leading specialist for consumption visualization and energy management.
Raycatch - Automatic AI diagnostics for Solar Energy	Pure SaaS product that provides actionable insights to operators & owners of solar plants that can significantly enhance the project yield.
Wasteless	Wasteless provides machine learning and real-time tracking solution for grocery stores.
VIA	VIA helps energy companies across the globe realize the value of their data through AI and blockchain.
Ween	Predict real-time flows of people to adapt the behavior of all their environments
PlanetWatchers	PlanetWatchers is a geospatial intelligence and enterprise natural resource monitoring service.
Viva Labs	Artificial Intelligence for Homes
Carbice Corporation	Game-changing heat dissipation solutions for smaller, cheaper, lighter, and more functional electronic devices. We enable a connected future
XIMANTIS	Intelligent Traffic Solutions for Autonomous Navigation and Congestion avoidance through patent-pending Deep Learning technologies.
Envio Systems	Envio has developed a next generation building management solution enabling exponentially smarter digital commercial buildings
Aponomy	Aponomy is a Swedish company that uses information technology to help people improve our society.
Optisort	Optisort offers computer vision-based sorting solutions for the recycling industry.
GreyAtom	GreyAtom is an onsite school focused on providing industry relevant programs on emerging technologies.
Metis Labs	Intelligent software, improving the performance of manufacturing processes.
Airly	Airly builds networks of air quality sensors that can be deployed across entire cities to enable real-time monitoring via map.airly.eu
eCozy	Your frictionless smart heating experience.
Mirubee	Mirubee is the manufacturer Mirubox that allows to save energy intended only to households, knowing your power consumption in real time.
Sawatch Labs	Sawatch helps organizations make data driven transportation decisions.
Wattsense	The Building API
Nnergix	Nnergix is a weather analytics startup focused in the renewable energy industry.
Conectric Networks	Turns commercial buildings into prosumers, using end-to-end building energy

Organization Name	Description
	management platform
Wisestate	Building Automation and Intelligence Solutions
Sniffer Robotics	An environmental solutions company leading with a more effective & efficient method for locating methane gas emissions.
twingz	twingz delivers predictive analytics based on anomaly detection out of energy meterdata feeds & provides damage prevention services on top.
Gradient Health	We use machine learning to assist radiologists with their workflow to reduce their cognitive load and increase their operational efficiency
CollectiveCrunch	CollectiveCrunch is a leader in AI for the forestry industry. We bring a step-change to prediction of wood inventories.
Effilogics Technologies	Effilogics Technologies provides a unique energy management software.
Airlitix	Airlitix is a precision AgTech company specializing in autonomous, indoor, drone technology for greenhouse management.
WillCo Intelligent Stored Energy (WISE)	Intelligent energy storage and management solution with Energy IoT features to enable consumer’s connection to the modern smart grid.
EnergSoft	Our mission is to build a software to enable clean tech research, disrupt sustainability space, and improve the environment.
Airgloss	Airgloss develops advanced devices aimed at improving indoor environmental comfort using a proprietary AI based sensing technology.
Solisite	AI for unlocking energy and infrastructure projects' financing.
Sensewaves	Predictive Analytics for Utilities, Gas, Water, and Industrial Assets
CoControl	CoControl provides the UK’s first heating control and social metrics system, which is tailored.
Vidrona	Vidrona is ushering in the new era of energy asset management.
Greengame	Greengame is a social impact startup that enables cities and companies to incentivize sustainable living.
Wego Europe	Wego is a blockchain based innovative startups in the sustainable mobility.
Buoy Labs	Smart home IoT company that developed Buoy, the first complete device for managing household water use
Curie Labs	Curie Labs, operated by Delhi-based Predictive Labs Pvt. Ltd, helps building owners and malls save on power
smaXtec animal care	smaXtec offers a unique monitoring solution for health, reproduction and feed optimization for sustainable livestock farming #InternetOfCows
Hydro Italia	Hydro Italia develops and manufactures industrial water purification systems.
Urbint	Plan for what's next
Rockstart Accelerator	Rockstart Accelerator supports startups in becoming scalable by providing them with access to the market, capital, expertise, and community.
Station A	Automated Clean Energy Development Platform

Organization Name	Description
Save your wardrobe	FashionTech startup using AI to make Fashion more digital and sustainable
EarthNow	EarthNow provides pictures of the planet on demand and real-time video anywhere a client desires.
Ai Incorporated	Ai incorporated offers a Versatile Mobile Platform which is a customizable SLAM enabled Mobile robot.
Mark Labs	Mark Labs is an AI-powered Impact Analytics Platform that enables its users to Measure, Communicate, and Improve their Impact Performance.
The Data Guild	The Data Guild is a venture studio connecting technical founders with the opportunity to use machine learning for social good.
AIRMESH	Creating a Global Ecosystem to Enable Connected Life
INSOLAR	INSOLAR connects solar customers with the best solar panel installers at the lowest prices in the market using Artificial Intelligence.
Untether AI	Ultra-efficient AI inference processor for edge devices.
HST Solar	HST Solar is expanding large scale solar globally by automating solar design and engineering through software while licensing our solution.
weXelerate GmbH	Europe's biggest and smartest startup&innovation hub
Fr8 Network	A new paradigm for the freight industry
WattzOn	WattzOn providing utility bill data to energy and credit markets. Any data, any utility
Revotree	Scalable IoT system for Agtech to monitor water needs in large rural areas, manage water supply and save resources thanks to AI.
Panacea.Ag	Sustainable Local Food Ecosystems
Terrabotics	They transform terabytes of satellite, aerial and UAV/drone imagery into very high precision true 3D terrain data and 2.5D elevation models.
FSIGHT	FSIGHT is an energy artifical intelligence platform based in Hod Hasharon, Israel.
3DFS Software-Defined Electricity	3DFS designs and manufactures a new and more efficient way to deliver electricity leveraging Real-Time computing
Energisme	Energisme Specialist in energy management, at the crossroads of the Iot and Artificial Intelligence.
ZyseMe	ZyseMe is a technology platform that empowers fashion brands to produce and sell fully personalized clothing at scale.
Field Complete	FieldComplete is an all-in-one solution for service companies, streamlining work order management and tracking technicians out in the field
ConserWater Technologies	ConserWater Technologies uses artificial intelligence to grow more plants or crops with less resources.
DABBEL - Automation Intelligence	DABBEL can autonomously control the building more efficiently than a human being and saves more than 50% in energy
vilisto GmbH	vilisto: The AI Solution to Europe’s Office Energy Consumption Problem

Organization Name	Description
Worthwhile Industries Campuses	We build self-sufficient, sustainable automated communities that build high-quality low-cost export wealth while we sleep.
Bandora Systems	Artificial Intelligence platform for Energy Efficiency in Buildings
Ensemble Energy	Advanced Energy Analytics, SaaS, Predictive Maintenance, Renewable Energy
Commercialization Reactor	We create, accelerate and invest in deep-tech startups.
Cervest	Cervest is a machine learning platform that monitors, predicts, and simulates crop productivity anywhere on the planet.
Agsol	Agsol is an award winning social business.
Tomorrow	Quantifying the climate impact of the daily choices we make
ThermoAI	Artificial intelligence for optimizing and automating power plants
CartMe	App that buys products according to your preferences and nutritional needs automatically.
Soltell Systems	Soltell leads the automation revolution in operation and management of commercial and residential PV solar energy systems
Algoritmica	Algoritmica makes predictive maintenance software that predicts asset failures using machine data and deep learning.
Sharpsense.AI	Artificial Intelligence for developers and engineers working with sensors.
WindAlly	Modern software for wind asset management. Looking for a seed investment and an opportunity to start a pilot project.
FYBR	Turnkey technology solutions that enable optimized forestry powered by drones, satellites, remote sensing, big data and machine learning.
Emerging Insider	Insight driven marketing and communications agency, with a focus on emerging media and technology.
Oceanit	Oceanit operates as a science and engineering company.
ESI Group	ESI Group, innovator in Virtual Prototyping software, helps industrial manufacturers replace physical prototypes with virtual prototypes.
OnSwitch Inc.	The market platform using data analytics and machine learning to radically simplify how building owners buy cost-saving energy systems
Smartnodes	Innovative Control for Outdoor Lighting
datacracy.io	The first global sustainability intelligence ecosystem that is aimed at enabling enterprises and governments around the world to reach SDGs.
CamIn - Cambridge Innovation Consulting	CamIn provides consulting and expert network services related to emerging technologies.
MistyWest	Innovation focused research and development. Hard problems only.
Scanbots	Scanbots executes aerial monitoring of linear infrastructure with UAVs and develops solutions for data collection,analytics and exploitation
Demizine Technology	Our mission is to make decentralized energy and water available to everyone, everywhere.

Organization Name	Description
Hepta Airborne	Autonomous airborne data collection and analysis for utilities, replacing six engineers with one
Modularity Grid	Intelligent sensors and software for managing electrical systems for electric utilities and aerospace markets
Neptune Benson	Neptune Benson is a manufacturer of high-quality water filtration and disinfection products.
Alsen Inc.	Alsen is a B2B platform that helps organizations with large commercial buildings to save energy.
Megatris	Megatris is an IT company that develops cloud-computing software.
Automatski Fundamental Research	Fundamental Research, 100+ Millennium Inventions
Tresorio	The Fog Computing platform based on a distributed network of Green Nodes
Musical Blockchain	World's #1 Creative approach to Blockchain. Longstoryshort: we created a solution that converts img/txt/data into music using AI+Blockchain.
Delfos intelligent maintenance	Delfos provides Artificial Intelligence for the Energy Industry in order to predict failures.
Twin Cities Computing LLC	Twin Cities Computing offers secure and reliable technology support to make you and your business worry-free!
Smart Future Lab Private Limited Company.	The Smart Future Lab helps startups through support contracts, which contain initial/seed investment and/or mentoring.
R&D Partners	Funding experts helping technology companies get government funding.
Ampacimon	Ampacimon develops dynamic line rating systems for transmission and distribution systems operators.
HELPFUL	Recycle plastic and break the habit
Armita-X	The Worldâ's First Intelligent outdoor portable patio heater and cooler
Cloudrun	Premier numerical weather prediction in the cloud. Batteries included.
Akitig	We Grow Food On Trees. The Solution Is Delicious.
Alea Labs	Smart HVAC air distribution and energy management.
Usful	Be useful, change the world.
Potomac Aviation Technology Corp	Artificial Intelligence providing Air Traffic Services for small airports
NeuTigers	NeuTigers is an end-to end machine learning powerhouse that brings highly accurate and uniquely energy-efficient neural network models.
Renew Solutions	Renew Solutions is a leading provider of revolutionary on & offline asset management solutions for water, waste & environmental industries
Volatix	Energy Analytics Technology Developer
Homeys	Energy efficiency in buildings | IoT & AI

Organization Name	Description
Ascent Systems Technologies	Private R&D and integrated solutions provider in the area of clean energy, using adaptive control, machine learning and intelligent network.
Citiride	Infrastructure as a service platform providing highly scalable secure underground robotic parking for e-bikes and e-scooters
Easy Zippy Pte Ltd	Easy Zippy is a technology company focused on last mile services and solutions
Oxygen at Work	We help companies reduce health care and energy costs by using data analytics and specific plants to improve office indoor air quality.
Loggma	SaaS
PressureNet	Pressurenet.io is company of cunsatency firm for the many way to resion to way to find this way.
Treevolt	Ruptive self-powered sensors for smart-transportation
ALPHA ENGINEER	Energy Tech Start Up distruping energy through the application of novel designs, internet of things (IoT) and artificial intelligence (AI)
Be Energy Part	Be Energy Part is an online investment platform that connects cleantech startups projects with investors.
Del2infinity	A one-step solution to gather insights into Renewable Energy enabling smart decisions to achieve the best Return on Investment.
Stattus4	Stattus4, startup incubated at Sorocaba Technology Park, works in the Intelligent Cities and Sustainability segment.
Shenzhen J&D Group	Shenzhen J&D Group supplies water-related machineries, including water treatment, water filling and packing, dispensers, and more.
EG MEDIA SB s.r.l.	ARTIFICIAL INTELLIGENCE FOR SUSTAINABLE BRANDS
Strike	STRIKE builds solar cum electric vehicles
envirist.ai	envirist uses artificial intelligence to create strategies for businesses of all sizes to reduce costs and go green.
Zome Energy Networks	We use machine learning algorithms to virtualize, control and scale device power loads on the energy grid.
Sunnie	Solar Powered A.I.

7 Quellenverzeichnis

Bernauer, M., Diels, J., Micklitz, H. W., Reisch, L., Thorun, C., Vetter, M. et al. (2017). *Nudge-Ansätze beim nachhaltigen Konsum:. Ermittlung und Entwicklung von Maßnahmen zum „Anstoßen" nachhaltiger Konsummuster*. Abschlussbericht (Umweltbundesamt (UBA), Hrsg.). Zugriff am 29.05.2019. Verfügbar unter https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-22_texte_69-2017_nudgeansaetze_nach-konsum_0.pdf

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit. (2018). *Bundeskabinett beschließt 50 digitale Leuchttürme für Umwelt- und Klimaschutz.* Zugriff am 29.05.2019. Verfügbar unter https://www.bmu.de/pressemitteilung/bundeskabinett-beschliesst-50-digitale-leuchttuerme-fuer-umwelt-und-klimaschutz/

Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (Hrsg.). (2019, 6. Mai). *Umwelt in die Algorithmen! Eckpunkte für eine umweltpolitische Digitalagenda des BMU.* Zugriff am 24.05.2019. Verfügbar unter https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Nachhaltige_Entwicklung/eckpunktepapier_digitalisierung_bf.pdf

Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur. *KI-Projekte in der Mobilität* (Bundesministerium für Verkehr und digitale Infrastruktur (BMVI), Hrsg.). Zugriff am 24.05.2019. Verfügbar unter https://www.bmvi.de/DE/Themen/Digitales/Aktionsplan-Digitalisierung-und-Kuenstliche-Intelligenz/KI-Projekte-in-der-Mobilitaet/aktionsplan.html

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (BMWi), Hrsg.). (2018). *Eckpunkte der Bundesregierung für eine Strategie Künstliche Intelligenz*. Gemeinsame Pressemitteilung - Schlüsseltechnologien, Bundesministerium für Wirtschaft und Energie. Zugriff am 24.08.2018. Verfügbar unter https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Pressemitteilungen/2018/20180718-gem-pm-eckpunkte-der-bundesregierung-fuer-eine-strategie-kuenstliche-intelligenz.html

Bundesministerium für Wirtschaft und Energie (Hrsg.). (2019). *Nationale Industriestrategie 2030.* Zugriff am 25.02.2019.

Bundesregierung. (2018a). *Strategie Künstliche Intelligenz der Bundesregierung* (Bundesregierung (BReg.), Hrsg.). Berlin. Zugriff am 31.01.2019.

Bundesregierung. (2018b, 15. Oktober). *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie. Aktualisierung 2018* (Bundesregierung (BReg.), Hrsg.). Berlin. Zugriff am 25.02.2019.

Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. & Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH. (2017). *Künstliche Intelligenz. Wirtschaftliche Bedeutung, gesellschaftliche Herausforderungen, menschliche Verantwortung* (Bundesverband Informationswirtschaft, Telekommunikation und neue Medien e. V. (BITKOM) & Deutsches Forschungszentrum für Künstliche Intelligenz GmbH (DFKI), Hrsg.).

Dratwa, J. (2018). *Statement on Artificial Intelligence, Robotics and 'Autonomous' Systems* (European Group on Ethics in Science and New Technologies, Hrsg.). Brüssel: Europäische Kommission. Zugriff am 19.03.2018. https://doi.org/10.2777/531856

Dutton, T. (2018, 28. Juni). *An Overview of National AI Strategies* (medium.com, Hrsg.). Zugriff am 11.03.2019. Verfügbar unter https://medium.com/politics-ai/an-overview-of-national-ai-strategies-2a70ec6edfd

Eberl, U. (2018, 5. Februar). Was ist Künstliche Intelligenz. – Was kann sie leisten? *Aus Politik und Zeitgeschichte (APuZ),* S. 8–14.

Elsevier (Hrsg.). (2018). *Artificial Intelligence: How knowledge is created, transferred, and used. Trends in China, Europe, and the United States.* Zugriff am 13.03.2019. Verfügbar unter https://p.widencdn.net/jj2lej/ACAD-RL-AS-RE-ai-report-WEB

Europäische Kommission (Hrsg.). (2018). *Communication Artificial Intelligence for Europe.* Zugriff am 17.05.2018. Verfügbar unter https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/news/communication-artificial-intelligence-europe

Europäische Kommission. (2019, 15. April). *Artificial Intelligence. A European approach to Artificial Intelligence*. Policy (Europäische Kommission, Hrsg.). Zugriff am 24.05.2019. Verfügbar unter https://ec.europa.eu/digital-single-market/en/artificial-intelligence

Europäische Kommission. (2018, 27. März). *The Age of Artificial Intelligence. Towards a European Strategy for Human-Centric Machines* (European Political Strategy Centre, Hrsg.) (EPSC Strategic Notes Nr. 29). Zugriff am 24.05.2019. Verfügbar unter https://ec.europa.eu/epsc/sites/epsc/files/epsc_strategicnote_ai.pdf

Goertzel, B., Pennachin, C. & Geisweiller, N. (2014). A Brief Overview of CogPrime. In B. Goertzel, C. Pennachin & N. Geisweiller (Hrsg.), *Engineering General Intelligence, Part 1. A Path to Advanced AGI via Embodied Learning and Cognitive Synergy* (Atlantis Thinking Machines, Bd. 5, S. 21–40). Paris: Atlantis Press. https://doi.org/10.2991/978-94-6239-027-0_2

Herweijer, C., Combes, B., Ramchandani, P. & Sidhu, J. (2018). *Harnessing Artificial Intelligence for the Earth* (World Economic Forum, Hrsg.) (Fourth Industrial Revolution for the Earth Series). Genf. Zugriff am 19.03.2018.

Intergovernmental Panel on Climate Change (Hrsg.). (2018). *Global warming of 1.5°C. Summary for Policymakers* (Special report). Genf. Zugriff am 13.03.2019.

Joppa, L. N. (2017). The case for technology investments in the environment. *Nature, 552* (7685), 325–328. https://doi.org/10.1038/d41586-017-08675-7

Lange, S. & Santarius, T. (2018). *Smarte grüne Welt? Digitalisierung zwischen Überwachung, Konsum und Nachhaltigkeit*. München: oekom verlag.

Lessig, L. (Harvard Magazine, Hrsg.). (2000). *Code Is Law. On Liberty in Cyberspace.* Zugriff am 29.05.2019. Verfügbar unter https://harvardmagazine.com/2000/01/code-is-law-html

Moser, S. & Kleinhückelkotten, S. (2017). Good Intents, but Low Impacts. Diverging Importance of Motivational and Socioeconomic Determinants Explaining Pro-Environmental Behavior, Energy Use, and Carbon Footprint. *Environment and Behavior, 50* (6), 626–656. https://doi.org/10.1177/0013916517710685

OECD. 2015. *Frascati Manual 2015. Guidelines for collecting and reporting data on research and experimental development. // Guidelines for collecting and reporting data on research and experimental development*. The measurement of scientific, technological and innovation activities. (OECD, ed.). Paris. Accessed 13.02.2019. Retrieved from https://www.conicyt.cl/wp-content/uploads/2014/07/Manual-Frascati-2015.pdf

Petschow, U. (2018). Kybernetische Governance als Planwirtschaft 2.0? *Ökologisches Wirtschaften - Fachzeitschrift, 33* (2), 30. https://doi.org/10.14512/OEW330230

Rohde, N. (2018). *Gütekriterien für algorithmische Prozesse. Eine Stärken- und Schwächenanalyse ausgewählter Forderungskataloge* (Bertelsmann Stiftung, Hrsg.). Gütersloh. Zugriff am 18.03.2019. https://doi.org/10.11586/2018027

Seifert, I., Bürger, M., Wangler, L., Christmann-Budian, S., Rohde, M., Gabriel, P. et al. (Gabriel, P., Hrsg.). (2018). *Potenziale der Künstlichen Intelligenz im produzierenden Gewerbe in Deutschland. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie (BMWi) im Rahmen der Begleitforschung zum Technologieprogramm PAiCE – Platforms | Additive Manufacturing | Imaging | Communication | Engineering,* Institut für Innovation und Technik in der VDI/VDE Innovation + Technik GmbH. Zugriff am 25.07.2018. Verfügbar unter https://www.digitale-technologien.de/DT/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/PAiCE_KI_Studie.pdf?__blob=publicationFile&v=5

Sieden, L. S. (2014). *A Fuller View. Buckminster Fuller's Vision of Hope and Abundance for All*. New York: Divine Arts.

Sustainable Development Solutions Network (Hrsg.). (2015). *Indicators and a Monitoring Framework for the Sustainable Development Goals. Launching a Data Revolution*. Abridged Report. Zugriff am 18.03.2019.

Terzidis, O., Jahn, B. & Waldmann, L. (2018). *Internet der Energie – Künstliche Intelligenz aus der Sicht von Energie und Klima. Strategie Künstliche Intelligenz der Bundesregierung vom 16.11.2018*. Position (Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI), Hrsg.). Berlin. Zugriff am 18.03.2019. Verfügbar unter

https://bdi.eu/publikation/news/internet-der-energie-kuenstliche-intelligenz-aus-der-sicht-von-energie-und-klima/

Wilts, H. & Berg, H. (2017). *Digitale Kreislaufwirtschaft* (Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH, Hrsg.) (in brief 04/2017). Zugriff am 24.05.2019. Verfügbar unter https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6977/file/6977_Wilts.pdf

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (Hrsg.). (2016). *Entwicklung und Gerechtigkeit durch Transformation. Die vier großen I* (Sondergutachten). Berlin. Zugriff am 13.03.2019. Verfügbar unter https://www.wbgu.de/sg2016/

Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (Hrsg.). (2019). *Unsere gemeinsame digitale Zukunft*. Zusammenfassung. Berlin. Zugriff am 24.05.2019. Verfügbar unter https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2019/pdf/WBGU_HGD2019_Z.pdf