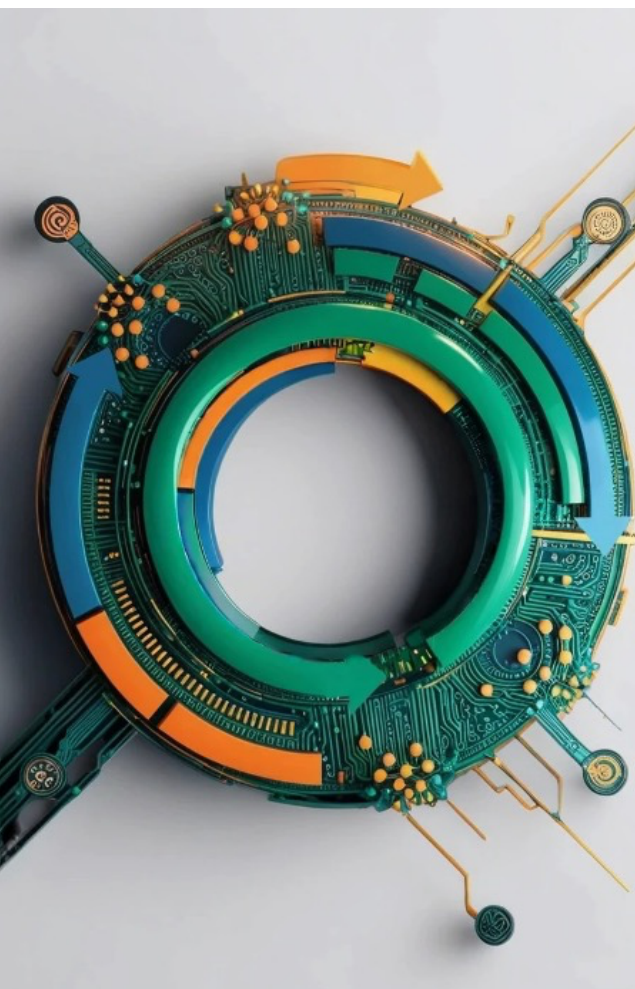


Prospektiven

Neues zur zirkulären Wertschöpfung

Circular Economy News

2025 | 01



Künstliche Intelligenz für die Circular Economy

Ein Werkzeug für die nachhaltige
Transformation?

Michael Leitl, Jan Quaing, Birgitt Helms, Kay Langhammer,
Johanna Graf, David Rohrschneider, Paul Szabó-Müller



Autor*innen

Michael Leitl, INDEED Innovation, m.leitl@indeed-innovation.com
Jan Quaing, Deutsche Bundesstiftung Umwelt, DBU nachhaltig.digital j.quaing@dbu.de
Birgitt Helms, Effizienz-Agentur NRW, bhe@efa.nrw
Kay Langhammer, Wuppertal Institut, kay.langhammer@wupperinst.org
Johanna Graf, Germanwatch e.V., graf@germanwatch.org
David Rohrschneider, Hochschule Ruhr West, david.rohrschneder@hs-ruhrwest.de
Paul Szabó-Müller, Hochschule Ruhr West, paul.szabo-mueller@hs-ruhrwest.de

Reihe

Prospektiven – Neues zur zirkulären Wertschöpfung / Circular Economy News
Uwe Handmann, Wolfgang Irrek, (Hrsg.)
ISSN (Print) 2750-4840
ISSN (Online) 2750-4859
1. Auflage, 20.02.2025

Bildquellen

Titelbild generiert mithilfe Canva Magic Media und der Hintergrund optimiert mit <https://www.aiease.ai/app/>
Layout der Abbildungen 1-4: INDEED Innovation und Hochschule Ruhr West

Bitte zitieren als:

Leitl, M., Quaing, J., Helms, B., Langhammer, K., Graf, J., Rohrschneider, D., Szabó-Müller, P. (2025): Künstliche Intelligenz für die Circular Economy? Prospektiven – Neues zur zirkulären Wertschöpfung 2025/01. Bottrop: Prosperkolleg e.V.

Please cite as:

Leitl, M., Quaing, J., Helms, B., Langhammer, K., Graf, J., Rohrschneider, D., Szabó-Müller, P. (2025): Künstliche Intelligenz für die Circular Economy? Prospektiven – Circular Economy News 2025/01. Bottrop, Germany: Prosperkolleg e.V.



Dieses Werk ist lizenziert unter einer [Creative Commons Namensnennung - Weitergabe unter gleichen Bedingungen 4.0 International Lizenz](https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/).

Impressum / Kontakt

Prosperkolleg e.V.
Gladbecker Straße 19b
46236 Bottrop
Germany
info@prosperkolleg.ruhr



Projekt: www.circular-performer.de



Kofinanziert von der
Europäischen Union

Gefördert durch:

Ministerium für Wirtschaft,
Industrie, Klimaschutz und Energie
des Landes Nordrhein-Westfalen



Organisationen der Autor*innen (Reihenfolge nach Aufzählung der Autor*innen):

INDEED



**Wuppertal
Institut**



HOCHSCHULE RUHR WEST
UNIVERSITY OF APPLIED SCIENCES

Die Arbeit von Germanwatch e.V. wird gefördert von der Stiftung Mercator:

STIFTUNG
MERCATOR



Abstract

Künstliche Intelligenz (KI) kann die Transformation zu einer Circular Economy (CE) in allen Wertschöpfungsstufen unterstützen. KI kann so dazu beitragen, Ressourcen zu sparen, die Produktlebensdauer zu erhöhen und Stoffkreisläufe möglichst zu schließen. Dies gelingt jedoch nur, wenn Ressourceneinsparungen nicht durch den eigenen Ressourcenverbrauch der KI aufgezehrt und Rebound-Effekte vermieden werden, wie zum Beispiel ein durch neue Angebote auf dem Markt ausgelöster Mehrkonsum.

Das Impulspapier illustriert Anwendungsmöglichkeiten durch praktische Beispiele und liefert Empfehlungen für eine gesellschaftlich, wirtschaftlich und ökologisch verträgliche Anwendung von KI in sieben Kernbereichen der CE.

Inhalt

Executive Summary	4
Einleitung	5
Teil I Anwendungspotenziale – Wo KI die CE stärken kann	9
Think	9
Take	12
Make	13
Sell	16
Use	17
Return	19
Teil II Gestaltungsaufgaben – Wie KI für die CE gestaltet werden sollte	22
KI für die CE: Notwendigkeit einer ganzheitlichen Strategie	23
KI und Digitale Produktpässe sinnvoll kombinieren	24
KI-Systeme selbst nachhaltig gestalten	25
Klima- und Umweltauswirkungen von KI-Systemen messen und Rebound-Effekte vermeiden	25
Die Grenzen von KI-Systemen anerkennen	27
KI-Literacy und CE-Literacy miteinander verschränken	27
Gesellschaftliche Normen und Verhaltensweisen bei KI-Entwicklung mitdenken	28
Datenverfügbarkeit und -Austausch sicherstellen	28
Fazit	29
Abbildungsverzeichnis	30
Über die Autor*innen	30
Literaturverzeichnis	32

Hinweis zur Nutzung gendersensibler Sprache

In dieser Publikation wird gendersensible Sprache verwendet. Wir beschränken uns darauf natürliche Personen zu gendern, während juristische Personen, wie Unternehmen, ohne Genderung genannt werden.



Executive Summary

Die Transformation zur Circular Economy (CE) gewinnt politisch immer mehr an Bedeutung. Auch Unternehmen zeigen zunehmend Offenheit für ein Wirtschaften, bei der die Kreislaufführung von Materialien, Komponenten und Produkten im Zentrum steht. Wenn Künstliche Intelligenz (KI) richtig eingesetzt wird, kann sie dazu beitragen, dass aus Wertschöpfungsketten möglichst Wertschöpfungskreisläufe werden. Sie kann an vielen Stellen unterstützen, um Ressourcen wie Energie, Materialien oder Zeit zu sparen:

- **Think:** In der Produktentwicklung kann KI bei der Ideen- und Konzeptentwicklung für zirkuläre Produkte und Geschäftsmodelle unterstützen. Sie kann bei der Auswahl langlebiger und recycelbarer Materialien helfen, um Abfall zu reduzieren.
- **Take:** KI kann beim Erschließen sekundärer Rohstofflager (Urban Mining) und dem Weiterverwenden funktionierender Komponenten aus gebrauchten Produkten (Remanufacturing) unterstützen.
- **Make:** In der Produktion kann KI dazu beitragen Rohstoffe effizienter zu nutzen, indem sie hilft, Ausschuss zu verringern und Energie zu sparen. KI kann auch dabei helfen, Produktionsmaschinen vorausschauend instand zu halten.
- **Sell:** KI kann beim Etablieren von Alternativen zum klassischen Verkauf unterstützen, zum Beispiel für Miet- und Sharing-Angebote. Sie die Logistik optimieren, indem Lager- sowie Transportaufwände reduziert werden.
- **Use:** KI-basierte Systeme können eine längere Lebensdauer und intensivere Nutzung von Produkten beflügeln, indem Nutzer*innen durch automatisierte Kundendienst-Prozesse bei der Selbstreparatur unterstützt oder Kontroll- und Prüfungsabläufe bei Sharing-Modellen verbessert werden.
- **Return:** KI kann entscheidend zur Rückgabe und zum Recycling beitragen, indem sie das Prüfen und Sortieren gebrauchter Produkte und die Rückführungslogistik verbessert und die Recyclingqualität durch automatisierte Materialerkennung optimiert.

Die Fallbeispiele in diesem Impulspapier zeigen, dass KI-Systeme in der CE Potenziale bieten, um Ressourcen effizienter zu nutzen, Abfall zu minimieren und Geschäftsmodelle zu überarbeiten. Dazu sind jedoch klare politische, gesellschaftliche und wirtschaftliche Rahmenbedingungen notwendig. Unternehmen müssen häufig ihre Geschäftsmodelle anpassen, um zirkuläre Strategien zu integrieren, wie zum Beispiel die Reparatur, das Wiederaufbereiten alter Produkte (Refurbishment), das Wiederverwenden gebrauchter Komponenten (Remanufacturing), das Herstellen neuer Produkte oder Angebote für geteilte Nutzung (Sharing). Nur durch die Integration von KI in eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsstrategie kann sie zur CE beitragen.

Gut zu wissen

Nur, wenn durch politische Rahmenbedingungen der notwendige wirtschaftliche Anreiz für Ressourcenschonung gesetzt wird, ist eine systematische Besserstellung von zirkulären gegenüber linearen Geschäftsmodellen zu erwarten. Dies ist Grundlage, um eine nachhaltige Kreislaufwirtschaft zu entwickeln. Erst dann kann KI ein Treiber sein.

Dazu müssen die ökologischen und sozialen Risiken berücksichtigt und gegenüber dem potenziellen Nutzen abgewogen werden. Hierzu gehören der Energie- und Ressourcenverbrauch von KI-Systemen selbst sowie Rebound-Effekte. So kann sichergestellt werden, dass der Einsatz von KI tatsächlich Ressourcen schont.

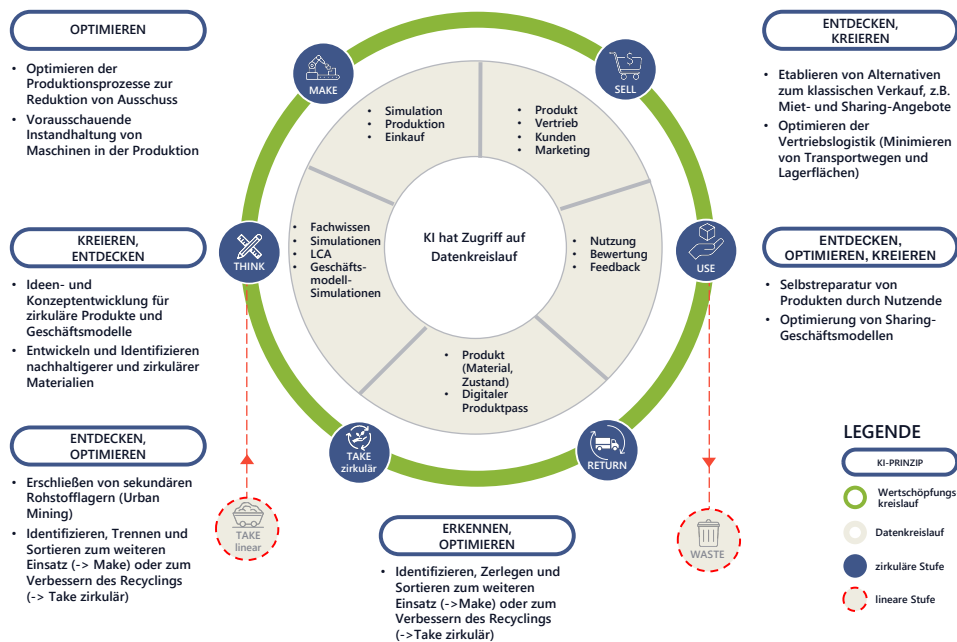


Abbildung 1: KI kann die Entwicklung einer CE an vielen Stellen begünstigen. Die Abbildung zeigt beispielhaft verschiedene Einsatzgebiete entlang des Wertschöpfungskreislauf und die Verknüpfung mit ebenfalls exemplarischen Datenquellen (Datenkreislauf)

Einleitung

Die Transformation zur CE gewinnt politisch immer mehr an Bedeutung. Auch Unternehmen sind zunehmend offen für ein Wirtschaften, bei der die Kreislaufführung von Materialien, Komponenten und Produkten im Zentrum steht.

Hierbei sind digitale Technologien ein wichtiges Hilfsmittel. Digitale Produktpässe (DPP), Datenplattformen und -netzwerke tragen z. B. zum Schließen von Materialkreisläufen bei, indem sie zunehmend mehr und genauere Informationen über die Verfügbarkeit, den Standort und den Zustand von Produkten liefern. Darüber hinaus kann Digitalisierung effizientere Prozesse in Unternehmen ermöglichen, eine längere Lebensdauer von Produkten fördern und zur Abfallvermeidung beitragen (Böckel et al., 2022). Insbesondere KI kann an verschiedenen Stellen der CE eine wichtige Rolle spielen.

Die Autor*innen dieses Papiers kommen aus vielfältigen Fachbereichen. Sie befassen sich aus unterschiedlichen Perspektiven (Praxis, Forschung, Zivilgesellschaft) mit den Themen KI und CE. Mit dieser Veröffentlichung soll dazu beigetragen werden, ein Bewusstsein für die Relevanz des Zusammenspiels von CE und KI zu schaffen. Dabei soll auch aufgezeigt werden, wer welche Gestaltungsaufgaben hat, sodass die Chancen von KI für die CE genutzt und Herausforderungen adressiert werden können. Der vorliegende Artikel soll als interdisziplinärer Einstieg in diese Themen dienen und richtet sich in erster Linie an Personen ohne tiefgreifende Hintergrundkenntnisse im Bereich KI. Die aufgeführten Praxisbeispiele und Unternehmen sind illustrativ für die Anwendung von KI für CE.

Die CE zielt darauf ab, Ressourcen auf möglichst hohem Wertschöpfungsniveau zu erhalten und Abfall zu minimieren, indem Produkte und Materialien so gestaltet werden, dass sie geteilt, wiederverwendet, repariert oder recycelt werden können. Eine typische lineare Wertschöpfungskette folgt aus Produzent*innenperspektive den Stufen Think, Take, Make, Sell, Use und Waste. In einem idealen zirkulären Wertschöpfungskreislauf ersetzt Return die Phase Waste und Take umfasst nicht mehr nur die Extraktion von Primärressourcen, sondern verlagert sich soweit möglich auf die Nutzung von Sekundärressourcen (siehe Abb. 2).

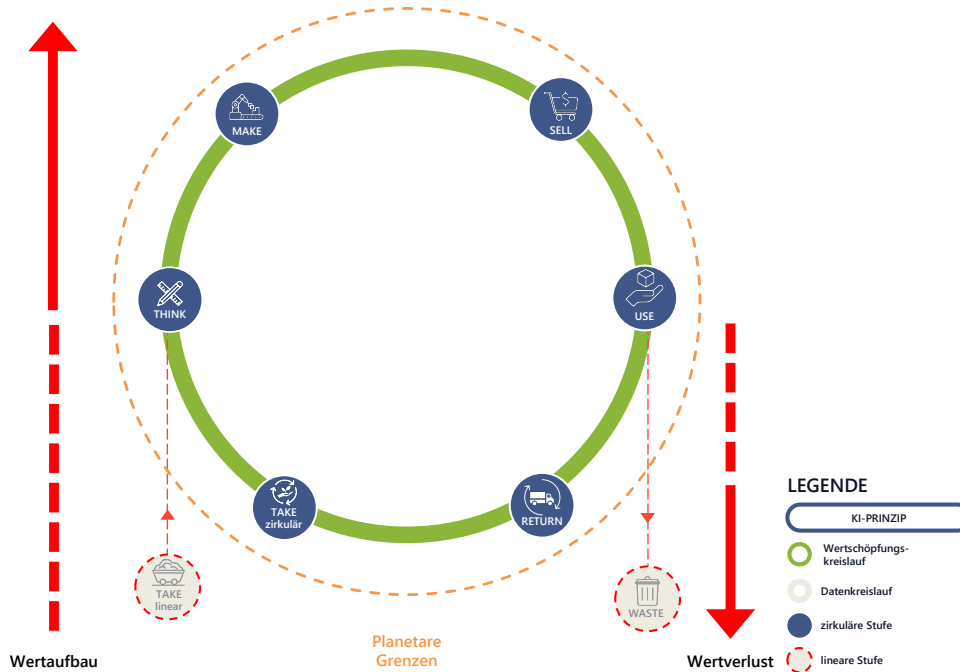


Abbildung 2: CE ist ideal umgesetzt, wenn der in der Produktion geschaffene Wert maximal erhalten bleibt und die Produktion innerhalb der planetaren Grenzen erfolgt.

Think – Produktentwicklung und Design:

In der Stufe *Think* liegt der Fokus auf der Gestaltung von Produkten, die langlebig, reparierbar, demontierbar und ganz oder in Teilen wiederverwendbar sind. Abfall und Umweltbelastungen sollen minimiert werden, indem Produkte und Materialien möglichst lange und auf hohem Niveau im Kreislauf gehalten werden.

Take – Ressourcengewinnung:

In dieser Stufe werden Rohstoffe gewonnen und Materialien für die Herstellung von Produkten beschafft. Der Einsatz von sekundären, nachhaltigen und erneut wiederverwendbaren Ressourcen steht in der CE im Vordergrund.

Make – Produktion :

Die Produktionsprozesse effizient und ressourcenschonend zu gestalten, ist Ziel der Stufe *Make*. Fokussiert wird der Einsatz gebrauchter Materialien unterschiedlicher Herkunft bei gleichbleibender Qualität des Endprodukts verbunden mit dem Ziel, Material- und Energieverbrauch während der Herstellung zu minimieren.

Sell - Handel:

In der Stufe *Sell* verlassen die Produkte den primären Einflussbereich des Unternehmens. Hier geht es um die Etablierung von Alternativen zum klassischen Eigentumsübergang auf die Käufer*innen. Der Fokus liegt auf dem Mehrfachhandel gebrauchter Produkte oder Komponenten sowie auf Konzepten, die bedarfsgerecht den Nutzen eines Produkts temporär zur Verfügung stellen.

Use – Nutzung der Produkte:

Die Stufe *Use* zielt darauf ab, die Nutzungsdauer von Produkten zu maximieren. Dabei gibt es unterschiedliche Möglichkeiten wie zum Beispiel die Reparatur eines Produktes. Auch die Wiedernutzung nach „Return“ fällt in diese Phase.

Return – Rückgabe und Recycling:

In der Stufe *Return* liegt der Fokus auf der Rückführung von Produkten, Komponenten oder Materialien am Ende ihres Lebenszyklus, zur Aufbereitung und Wiederverwendung, also Rückführung in den Produktions- und Nutzungs-Kreislauf.

Die hier skizzierten Stufen sind bewusst vereinfacht. In Teil I *Anwendungspotenziale – Wo KI die CE stärken kann werden* grundlegende Konzepte, Anwendungsmöglichkeiten und Praxisbeispiele präsentiert. Wichtig ist, dass KI als Werkzeug und nicht als Selbstzweck betrachtet wird. Falsch eingesetzt kann diese Technologie soziale und ökologische Risiken erzeugen, etwa Rebound-Effekte: Rückkopplungen, die an anderswo unbeabsichtigte Verschlechterungen hervorrufen. Kostenersparnisse durch Materialreduktion und Effizienz dürfen nicht zu höherer Produktion und erhöhtem Primärressourcenverbrauch führen (siehe Infokasten Rebound-Effekte, S. 28). Ziel ist, KI für eine längere Nutzung von Produkten und das Wiedereinbringen von Sekundärmaterial einzusetzen.

Gut zu wissen

Wang et al. (2023) zufolge kann das Elektroschrottaufkommen durch KI-Systeme bis zum Jahr 2030 auf bis zu 2,5 Millionen Tonnen pro Jahr ansteigen – fast tausendmal so viel wie 2023. Das Müllaufkommen steigt u. a. durch die Zunahme an Sensoren und anderer Hardware.

Richtig eingesetzt und gestaltet, kann KI eine wichtige Rolle spielen, um die dringend erforderliche Transformation zu einer nachhaltigen und zirkulären Wirtschaft zu unterstützen. Da es den Rahmen des Papiers übersteigt, wird nicht tiefgreifend analysiert, wie KI-Systeme selbst so gestaltet werden können, dass sie möglichst wenig Energie und Ressourcen verbrauchen („Grüne KI“). Dennoch darf nicht aus dem Blick geraten, dass die Ökobilanz und die sozialen Implikationen der hier betrachteten Systeme für die Diskussion möglicher Potenziale unerlässlich sind. Der zweite Teil *Gestaltungsaufgaben – Wie KI für die CE gestaltet werden sollte* skizziert die notwendigen Rahmenbedingungen für den erfolgreichen Einsatz von KI-Systemen in der CE.

Kurz erklärt

Was ist Künstliche Intelligenz?

Der Begriff KI wurde 1956 von dem amerikanischen Forscher Marvin Minsky geprägt und bezeichnet ein interdisziplinäres Forschungsgebiet der Informatik. Ziel von KI-Systemen soll es sein, Aufgaben auszuführen, die typischerweise menschliche Intelligenz erfordern, wie Lernen, Problemlösen oder Entscheidungsfindung. Heute wird der Begriff Maschinelles Lernen oft Synonym für KI verwendet, bildet jedoch nur einen Teilbereich des Forschungsfeldes (siehe Abb. 2).

Da es für den Begriff der Intelligenz keine feste Definition gibt, ist auch die Definition von KI herausfordernd. Zu den auszeichnenden Attributen Künstlicher Intelligenz gibt es eine breite und kontroverse wissenschaftliche Diskussion. Im Verständnis der Autor*innen dieses Papiers bedeutet KI, dass einer „Maschine“ nicht mehr fest einprogrammiert wird, wie sie Aufgaben ausführen soll, sondern sie lernt auf Basis von Daten und Algorithmen, wie sie diese optimal lösen kann.

KI zeichnet sich durch zwei Hauptmerkmale aus: (1) **Autonomie**, das heißt die Fähigkeit, Aufgaben in komplexen Umgebungen, ohne ständige menschliche Anleitung auszuführen, und (2) im Fall adaptiver beziehungsweise selbstlernender Systeme eine gewisse **Anpassungsfähigkeit**, indem die KI-Anwendung aus Erfahrungen lernt und auf Basis dessen die Leistung verbessert.

KI-Systeme selbst haben ganz unterschiedliche Fähigkeiten. Ihr Einsatz lohnt sich vor allem bei komplexen Systemen mit multiplen Parametern. Sie können Muster erkennen, Trends vorhersagen oder auch eigene Inhalte produzieren. Letzteres, die generative KI, ist der Einsatzbereich von KI, der den meisten Nutzer*innen am geläufigsten ist: Large Language Modelle wie GPT erstellen Texte und Programmcode. Grafikprogramme wie Midjourney können auch Bilder und Videos produzieren (Brandolisio et al., 2021).

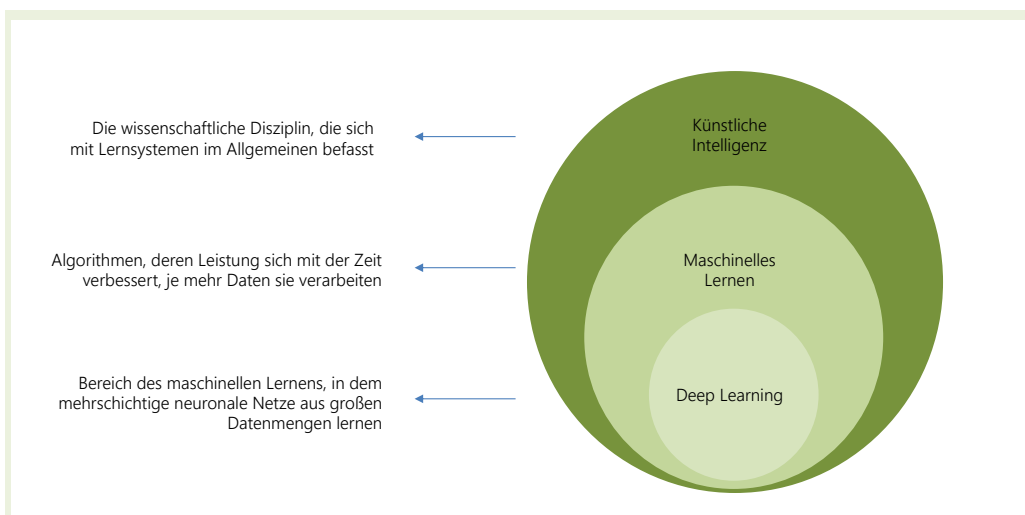


Abbildung 3: KI hat zwei Hauptmerkmale: Autonomie und Anpassungsfähigkeit (nach Brandolisio et al., 2021).

Was ist die Circular Economy?

Die Circular Economy (CE) ist ein Leitkonzept des nachhaltigen Wirtschaftens. Es zielt darauf, in möglichst geschlossenen Kreisläufen zu denken und zu handeln, um den wirtschaftlichen und gesellschaftlichen Nutzen von Produkten, Komponenten und Materialien langfristig zu sichern und Ressourcen zu schonen. Dies geschieht unter Beachtung der ökologischen Grenzen unseres Planeten. Diese „zirkuläre“ Wertschöpfung steht in Kontrast zum aktuell dominierenden „linearen“ Wirtschaftssystem, in dem die Wertschöpfung nach einer kurzen Kette aus Rohstoffgewinnung, Verarbeitung und Verbrauch mit einer oftmals unzureichenden Entsorgung, Depositionierung oder rein energetischen Verwertung abrupt endet (Prosperkolleg, 2024 a). Ein weiteres Ziel ist es, den Materialdurchlauf in den einzelnen Kreisläufen zu verlangsamen, denn mit jedem Kreislauf geht Material (u. a. durch Dissipation und Qualitätsverlust) verloren und es muss Energie zur (Wieder-) Verwertung aufgewandt werden.

Strategien zur Umsetzung der CE finden sich zum Beispiel im 10-R-Modell von Potting et al. (2017). Dessen zehn sogenannte **R-Strategien** können in drei Kategorien eingeteilt werden:

1. **Ressourcenverbrauch minimieren**, z. B. durch weniger Verbrauch, intensivere Nutzung oder Steigerung der Ressourceneffizienz („Refuse“, „Rethink“ und „Reduce“).
2. **Produktlebensdauer verlängern** z. B. durch Wiederverwendung, Reparatur und Aufarbeitung („Reuse“, „Repair“, „Refurbish“, „Remanufacture“, „Repurpose“).
3. **Stoffliche oder energetische Verwertung** („Recycle“ und „Recover“)

Die politische Umsetzung der CE

Die R-Strategien sind nicht mehr nur ein konzeptionelles Rahmenwerk zur Entwicklung zirkulärer Geschäftsmodelle. Einzelne Strategien aus dem 10-R-Modell werden inzwischen durch den **European Green Deal** teilweise in (EU-)Gesetzgebung übersetzt (z. B. neue EU-Ökodesign-Verordnung) und sind Gegenstand von Aktivitäten von Normungsgremien wie DIN und ISO/CEN. CE wird hierdurch zunehmend sowohl verpflichtend als auch standardisiert.

Auf Bundesebene wurde im Dezember 2024 die **Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie** (NKWS) verabschiedet (Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz, 2024). Die Strategie verfolgt das Ziel, den Anteil von Sekundärrohstoffen an der Gesamtmenge der genutzten Rohstoffe bis 2030 zu verdoppeln. Zudem soll die Umsetzung des Critical Raw Materials Act auf nationaler Ebene die Rohstoffsicherheit und -souveränität stärken.

Weiterhin soll das Pro-Kopf-Aufkommen an Siedlungsabfällen bis zum Jahr 2030 um 10 Prozent und bis zum Jahr 2045 um 20 Prozent sinken im Vergleich zum Jahr 2020. KI wird als eine zu fördernde Technologie genannt, um diese Ziele zu erreichen und gleichzeitig die ökonomische Wettbewerbsfähigkeit Deutschlands zu erhalten.

Konkret als Beispielanwendungen genannt werden etwa KI-Assistenten für zirkuläres Produktdesign oder KI-basierte Sprachassistenten, die Konsument*innen helfen, nachhaltige Kaufentscheidungen zu treffen.



Abbildung 4: Ansätze der CE in den unterschiedlichen Abschnitten des Wertschöpfungskreislaufs. Die Phasen sind eng miteinander verknüpft und unterscheiden sich je nach gewähltem Ansatz bei der konkreten Umsetzung.

Teil I Anwendungspotenziale – Wo KI die CE stärken kann

Think

Wo KI unterstützen kann

- **Beschleunigte Produktentwicklung:** KI kann helfen, den Entwicklungsprozess von zirkulären Produktdesigns und Geschäftsmodellen zu verkürzen, indem sie Simulationen und Tests effizienter gestaltet, sowie bei der Ideen- und Konzeptentwicklung unterstützt.
- **Optimierung von Materialauswahl:** KI kann bei der Entwicklung nachhaltiger, langlebiger und wiederverwertbarer Produkte unterstützen, indem sie die besten Materialien für zirkuläres Design identifiziert.

Eine wesentliche Voraussetzung für die CE sind passende Produkte, Dienstleistungen und Geschäftsmodelle. Sie müssen den besonderen Anforderungen genügen, dass Kreisläufe möglichst geschlossen und Produkte so lange wie möglich in diesen gehalten werden. Diese Anforderungen wirken sich auf die verwendeten Materialien aus und ob das Produkt langlebig oder einfach zu reparieren beziehungsweise wiederzuverwerten ist. Für all diese Aspekte ist die Entwicklungsphase eines Produktes entscheidend. Sie umfasst den gesamten Prozess von der Ideenfindung bis zur Markteinführung eines Produktes. Je nach Produktlebenszyklus wird mit diesen Entscheidungen die Kreislauffähigkeit über Jahre oder sogar Jahrzehnte (Luftfahrt, Medizintechnik) festgelegt.

KI kann in der Think-Phase die Arbeit beschleunigen. Dadurch können sowohl die Entwicklungen von linearen, aber auch zirkulären Produktdesigns unterstützt werden. Darüber hinaus kann der Einsatz von KI auch für eine bessere Produktqualität sorgen, was die Grundlage für eine längere

Nutzungsdauer ist. KI kann weiterhin dabei helfen, den Ressourceneinsatz zu optimieren und basierend auf Nutzungs- und Trendanalysen neue Geschäftsmöglichkeiten zu identifizieren (Isler, 2024).

Unterscheiden lassen sich in der Produktentwicklung primäre zwei Anwendungen: KI kann auf der Basis von Large Language Models (LLM) als Assistenzsystem dienen. Zweitens ermöglichen speziell trainierte Systeme die Entwicklung neuer Produkte. Der Einsatz dieser Technologien beschränkt sich nicht auf zirkuläre Produkte, ist dort jedoch besonders lohnend, da der Innovationsdruck in diesem Bereich besonders hoch ist.

KI-Assistenzsysteme in der Entwicklung von Konzepten für die CE

Die CE erfordert in vielen Bereichen das gemeinsame Arbeiten in neuen Wirtschaftssystemen, um Stoffströme wirtschaftlich zirkulieren zu lassen. KI-Assistenten können dazu beitragen, das Entwickeln von Konzepten für zirkuläre Geschäftsmodelle und deren Umsetzung zu beschleunigen – indem sie das vorhandene Wissen auf individuelle Fragestellungen anwenden.

KI kann in verschiedenen Phasen der Produktentwicklung eingesetzt werden. Bei der Ideenfindung kann beispielsweise ein vollständiger Design-Thinking-Zyklus mithilfe von LLMs wie GPT-4 innerhalb weniger Stunden durchlaufen und ein erstes, brauchbares Konzept erstellt werden. Mithilfe von KI-Agenten, die Software mit KI verknüpfen, lassen sich zunehmend auch vielfältige Datenquellen integrieren und komplexe Arbeitsabläufe für den kreativen Prozess automatisieren. In Kombination mit bilderzeugenden Modellen wie Midjourney können erste Konzepte bis hin zu Prototypen, etwa in Form eines Storyboards, visualisiert werden.

In Forschung und Entwicklung werden seit Jahren schon KI-Systeme für Simulation und Optimierung eingesetzt. Entscheidend dabei ist die Kombination der Fähigkeiten von Mensch und Maschine. Die Maschine liefert in der Regel einen durchschnittlichen Entwurf eines Konzeptes – basierend auf dem Stand des in den Trainingsdaten verfügbaren Wissens. Der Mensch kann und muss dieses dann kritisch hinterfragen und weiterentwickeln – auf der Basis von Erfahrung, Fachexpertise und einer Vision, was idealerweise erreicht werden soll.

Gut zu wissen

KI-Daten können Biases, also Verzerrungen, bzw. unverhältnismäßige Gewichtungen enthalten. Die KI bildet nur das Wissen ab, mit dem sie trainiert wurde. Das ist besonders im Prozess für das Design von zirkulären Produkten von Relevanz. Diese spezielle Medienkompetenz, die KI-Literacy, muss auch bei Designer*innen gestärkt werden. Für mehr Informationen siehe Teil II, *KI-Literacy und CE-Literacy miteinander verschränken*.

Die Modedesignerin Stefanie Kroth entwickelt eine KI-basierte Software-Lösung für „Zero-Waste“-Produktdesigns im Modebereich (Stefanie Kroth, 2024). Modelabels und DIY-Schneider*innen bekommen bei Kroth Vorschläge für Schnittmuster, die ohne Stoffverschnitt auskommen. Stoffreste und damit Abfall wird so vermieden. Dabei wird, basierend auf der Stoffgröße (insbesondere der Breite), der gesamte Stoff für das jeweilige Kleidungsstück eingesetzt. Abhängig von der Konfektionsgröße und weiteren Parametern wird die benötigte Mindest-Stofflänge entweder angegeben oder die volle Stofflänge genutzt. Die KI generiert aus einer Vielzahl von Variablen, wie Konfektionsgröße, Stoffart, Muster, Stoffbreite, ggf. auch Stofflänge, etc. verschiedene Schnittmuster für unterschiedliche Kleidungsstücke, die den Stoff komplett ausnutzen. Dies können Oberteile, Röcke, Hosen, Jacken oder Mäntel sein.

KI-basierte Unterstützung bei der Entwicklung und Auswahl von Materialsubstituten und Zusammensetzungen

Viele Materialien, die derzeit für Verpackungen und Produkte genutzt werden, lassen sich nicht oder nur schwer in einen Kreislauf zurückführen. Kunststoff ist langlebig. Deshalb findet er mittlerweile seinen Weg als Mikroplastik in Lebensmittel. Abrieb von Reifen verschmutzt als Feinstaub die Städte, Chemikalien, die zur Beschichtung verwendet werden, verunreinigen das Grundwasser. Wenn Produkte, die nicht biologisch abbaubare Stoffe enthalten, erfolgreich sind und sich global verbreiten, entwickeln sich auch Kleinstabfälle zu einem Problem.

Neue nachhaltige Materialien und die Standardisierung des Materialeinsatzes etwa für Plastik in Verpackungen und anderen Produkten können Chancen für weniger schädlichen Abfall bieten. Neue Materialien lassen sich seit einigen Jahren immer besser mithilfe von KI-Systemen entwickeln und zwar über sehr unterschiedliche Branchen hinweg nach demselben Prinzip. Das KI-System lernt die Eigenschaften von einzelnen Inhaltsstoffen und deren Wirkung in einem Endprodukt zu verstehen und leitet daraus neue Zusammensetzungen für gewünschte Eigenschaften ab.

Die Lebensmittelchemiker*innen des chilenischen Start-up-Unternehmens NotCo nutzten beispielsweise maschinelles Lernen, um neue Rezepte für eine Reihe von veganen Produkten wie Milch, Mayonnaise und Speiseeis zu entwickeln, die ohne potenziell klimaschädliche Rohstoffe wie Milchprodukte auskommen. Da ihre Datenbank riesige Mengen an Rezeptdaten und Lebensmittelinformationen enthält, kann die KI auch unwahrscheinlich klingende Zutaten in ihre Berechnungen einbeziehen. So können Extrakte aus Ananas und Kohl helfen, eine vegane Milch herzustellen.

Dieser Ansatz funktioniert auch in anderen Bereichen, sei es bei der Erstellung neuer Rezepturen oder bei der Entwicklung neuer Metalllegierungen mit spezifischen Eigenschaften. Legierungen, also Mischungen aus unterschiedlichen Metallen, sind essenziell im Maschinenbau. Auch in der CE werden zunehmend neue Materialien benötigt: Das weiche Zinn verleiht Kupfer eine deutlich höhere Festigkeit und Härte. Chrom und Nickel machen Eisen zu nichtrostendem Stahl. Moderne Superlegierungen können Eigenschaften von Glas besitzen oder setzen elektrischem Strom keinen Widerstand mehr entgegen. Je nach Zusammensetzung entstehen gänzlich neue Eigenschaften.

Allerdings dauert es lange, eine neue Legierung herzustellen, wenn dabei bestimmte Eigenschaften erfüllt sein müssen. Pro Iteration rechnen die Wissenschaftler*innen mit drei Monaten. 20 Iterationen bis eine gute neue Legierung finalisiert wird, summieren sich dann schnell auf fünf Jahre Entwicklungszeit. Ein neuartiges Robotersystem des Forschungskonsortiums SINTEF liefert in Kombination mit einem KI-Modell das gleiche Ergebnis innerhalb von fünf Monaten. Dabei werden die Metallpulver von einem Roboter gemischt und im Brennpunkt eines Lasers geschmolzen. So entsteht eine millimetergroße Probe der neuen Legierung. Ein automatisches Analysesystem misst die chemischen, physikalischen und mechanischen Eigenschaften und speist diese Daten in eine Legierungsdatenbank ein. Das eingesetzte KI-System kann nun auf der Basis der Daten Muster analysieren und eine Verbindung zwischen den physikalischen Eigenschaften der Legierungen und ihrer chemischen Zusammensetzung herstellen. Das KI-System empfiehlt schließlich die vielversprechendsten neuen Iterationen. Einzelne Prozessschritte werden nach Angaben von SINTEF so um den Faktor 1.000 beschleunigt. Auf diese Weise reduziert sich als Nebeneffekt auch der Energie- und Materialverbrauch für das Herstellen der Legierungen.

Dieses Prinzip der Kreation lässt sich auf vielfältige Anwendungsgebiete übertragen – etwa auf die Herstellung neuer Materialien aus Proteinen, wie es das Berliner Startup Kambrium praktiziert. Ihr erstes Produkt ist veganes Kollagen. Ein Produkt, das vor allem in der Lebensmittel-, Kosmetik- und Pharmaindustrie eingesetzt wird. Gewonnen wird es bisher aus Schlachtnebenprodukten. Laut Lucile Bonin, Head of Personal Care, sind weitere Produkte in Planung. Prinzipiell seien Produkte mit sehr unterschiedlichen Materialeigenschaften denkbar, ihnen gemein sei, dass sie vollständig biologisch abbaubar sein sollen.

Take

Wo KI unterstützen kann

- **Erkunden von anthropogenen Rohstoffvorkommen:** KI kann helfen, urbane Rohstofflager (Urban Mining) besser zu erschließen.
- **Trennen und Sortieren von funktionierenden Komponenten aus gebrauchten Produkten:** KI kann durch eine verbesserte Informationsauswertung während der Demontage von Baugruppen unterstützen, was R-Strategien wie Remanufacturing stärken kann.

Dieses Unterkapitel widmet sich der (Wieder-)Gewinnung von Rohstoffen (Take). In einer CE geht es darum, die Förderung neuer Rohstoffe auf das geringstmögliche Niveau zu senken. Dazu werden primäre Rohstoffe durch sekundäre Rohstoffe ersetzt. Um diesen Übergang voranzutreiben, kann KI dabei an mehreren Stellen helfen. Die folgenden Beispiele zeigen, wie sich Recyclingprozesse verbessern lassen, um Sekundärmaterial für die CE bereitzustellen und wie das Erkunden und Bewerten von anthropogenen Rohstofflagern verbessert werden kann. Anthropogene Rohstofflager beschreiben Rohstoffe, die von Menschen in Produkte oder ähnliches gebunden werden, wie Häuser oder Laptops. Hier können KI-Anwendungen helfen, diese Vorkommen zu beziffern und zu identifizieren.

Gut zu wissen

Neben dem Nutzen von (Primär-)Ressourcen für die Erstellung von Gütern benötigt eine KI für das Entwickeln, Trainieren und Nutzen selbst wertvolle Primärrohstoffe. Deshalb ist es wichtig, auch KI-Systeme selbst möglichst ressourcenarm zu gestalten.

Sekundäre Rohstoffvorkommen erkunden und Sekundärmärkte aufbauen

KI kann helfen, bereits vorhandene anthropogene und natürliche Lagerstätten von Rohstoffen zu erschließen und zu quantifizieren. In einer CE sollen primär die anthropogenen, also von Menschen geschaffenen, Lagerstätten erschlossen werden und als sekundäre Rohstoffquelle dienen. Im Konzept des Urban Mining geht es genau darum: den urbanen Raum als Rohstofflager zu verstehen (Acatech, 2021). Viel zu schnell werden Materialien thermisch verwertet, statt sie sinnvoll weiter zu nutzen. Das führt oft zu einem Wertverlust, der durch fehlende Quantifizierung und Kennzahlensysteme in den unternehmerischen Bilanzen nicht abgebildet wird.

Mithilfe von KI-Systemen können nicht nur Marktplätze skaliert, sondern auch Restwerte ermittelt werden. Weiterhin können Rezertifizierungsmaßnahmen (bspw. im Baubereich) zuverlässiger und kostengünstiger erfolgen. Im Bereich zirkuläres Bauen entwickeln in einem Pilotprojekt des Green-AI Hub Mittelstand zum Beispiel die Unternehmen Circular Structural Design und Concular ein KI-gestütztes Empfehlungssystem, das dabei helfen soll, bestehende Bauteile unter Berücksichtigung ihrer Tragfähigkeit in neue Gebäudeentwürfe zu integrieren.

KI-unterstützte Identifizierung, Trennung und Sortierung von funktionierenden Komponenten aus gebrauchten Produkten

Remanufacturing bezeichnet den Prozess, funktionierende Komponenten aus gebrauchten Produkten für neue oder andere Produkte weiterzuverwenden. Dafür müssen gebrauchte Produkte identifiziert, zerlegt, gereinigt, geprüft und sortiert werden.

KI kann dabei unterstützen, indem sie Prozesse wie die Fehlererkennung und -analyse automatisiert und die Effizienz bei der Demontage oder Inspektion verbessert (Amrhein-Bläser, 2020). Durch Bildverarbeitung und maschinelles Lernen können Objekte und deren Zustand präzise identifiziert und für die Wiederaufbereitung priorisiert werden (Baker/Handmann, 2024). Zudem kann KI Produktionsdaten analysieren, um den Zustand und gegebenenfalls die Lebensdauer von Bauteilen vorherzusagen und so die Ausfallrate zu reduzieren (Hügler/Lehr, 2024).

Gut zu wissen

Remanufacturing stellt neben Repair, Refurbishment und Repurpose (den sogenannten mittleren Rs) einen zentralen Ansatz dar, wie Produkte und Komponenten möglichst lang im Kreislauf gehalten werden können. Remanufacturing-Geschäftsmodelle sind derzeit noch fast gar nicht auf dem Markt vertreten, was unter anderem auch an fehlender Wirtschaftlichkeit und an rechtlichen Hürden wie geistigen Eigentumsrechten und Haftungsfragen liegt (zum Zielkonflikt zwischen geistigen Eigentumsrechten und den mittleren R-Strategien siehe Denter, 2023). Derzeit sind Remanufacturing-Anbieter im Getriebe- und Motoren-Sektor etabliert. Bei Abbau der aktuellen Barrieren besteht enormes Potenzial für weitere Geschäftsmodelle.

Make

Wo KI unterstützen kann

- **Ressourcenschonende Prozesse:** KI kann dabei unterstützen, Produktionsprozesse so zu optimieren, dass weniger Energie und Materialien verbraucht werden.
- **Qualitätskontrolle in Echtzeit:** KI kann Produktionsprozesse überwachen und Qualitätsprobleme frühzeitig erkennen, um Ausschuss und Materialverschwendung zu reduzieren.
- **Einsatz von Sekundärmaterial oder gebrauchten Komponenten:** KI kann unterstützen, die schwankende Qualität von Sekundärmaterial oder gebrauchten Komponenten im Produktionsprozess zu kompensieren. So kann der Anteil an Rezyklaten oder gebrauchten Komponenten unterschiedlicher Herkunft erhöht werden, ohne dass die Produktqualität beeinträchtigt wird.
- **Vorausschauende Instandhaltung:** KI-basierte Systeme können Maschinenverschleiß erkennen und Ausfälle verhindern, was einerseits die Effizienz und Langlebigkeit der Produktionsanlagen erhöht und andererseits damit einhergehende Materialverschwendung reduziert.

Im Produktionssektor (Make) lassen sich im Kontext der CE zwei Ziele verfolgen: Einerseits soll der Einsatz von Sekundärmaterialien, inklusive gebrauchter aufgearbeiteter Komponenten, erhöht werden. Andererseits soll die Ressourceneffizienz gesteigert werden. Durch eine bessere Qualität und reduziertem Ausschuss wird weniger Primärrohstoff benötigt und zusätzlich Energie eingespart. In der Produktion ist der Einsatz von KI vor allem in den Bereichen Prozessregelung, Qualitätskontrolle und Instandhaltung weit verbreitet. Unternehmen setzen KI-Systeme vor allem ein, um die Qualitätskosten zu senken. Kosteneinsparungen können beispielsweise erzielt werden, indem Produktionsfehler vermieden werden. Auch wenn die nachfolgenden Einsatzbeispiele von KI nicht auf eine bewusste Transformation zur CE hindeuten, trägt ihr Einsatz in der Produktion trotzdem zur CE bei, wenn dadurch weniger – insbesondere neue – Ressourcen verbraucht werden.

KI-basierte Optimierung der Produktion zur Reduktion von Ausschuss

Produktionsprozesse können in vielfältiger Weise durch den Einsatz von KI profitieren. Coretechnologie, ein deutsch-französisches Software-Unternehmen, nutzt zum Beispiel in der aktuellen 3D-Druck-Software eine KI-gestützte Methode, das sogenannte Nesting, um die Rohstoffeffizienz durchschnittlich um 30 Prozent zu steigern. Die zu druckenden Teile werden intelligent vorsortiert und ihr Bedarf an Bauraum präzise berechnet. Auf diese Weise wird die Packdichte erhöht und der Bauraum besser ausgenutzt (Coretechnologie, 2024).

Gut zu wissen

Der Begriff „Nesting“ aus dem Englischen, übersetzt als „Schachtelung“ oder „Verschachteln“, bezeichnet ein Fertigungsverfahren zur Herstellung von Formteilen aus einem Materialblock- oder einer -platte. Im Beispiel wird der Begriff für die Anordnung der zu druckenden Formteile in einem 3D-Raum benutzt.

KI-basierte Qualitätsvorhersage in Echtzeit reduziert Ressourceneinsatz und Ausschuss

Ein führender Dämmstoffhersteller spart in einem, von der Effizienz-Agentur NRW begleiteten, Projekt jährlich fast hundert Tonnen Ausschussmaterial, etwa 40 Megawattstunden Strom und über 300 Tonnen CO₂e¹ ein. Möglich macht dies die KI-gestützte Analyse von Produktionsdaten an einer Fertigungslinie. Die Investition in KI-Software und Hardware amortisierte sich innerhalb von 15 Monaten. Die Einsparungen werden sowohl beim Anfahren (siehe Infokasten, S. 16) als auch im laufenden Produktionsprozess erzielt. Das KI-System erkennt frühzeitig, wann der Anfahrprozess abgeschlossen ist und die Produkte den Qualitätskriterien entsprechen. Dadurch kann die Produktion parameter- statt zeitgesteuert beginnen, was wertvolle Rohstoffe schont. Auch während der Produktion wertete das KI-System Qualitätsdaten und Eingangsparameter aus und zeigt frühzeitig an, wenn Qualitätskriterien nicht mehr erfüllt werden. So kann rechtzeitig gegengesteuert und das gewonnene Material effizienter genutzt werden.

Gut zu wissen

Der Anfahrprozess leitet den Produktionsbeginn ein, bei dem Maschinen und Werkzeuge auf optimale Betriebsbedingungen eingestellt werden. Ziel ist es, eine konstant hohe Produktqualität zu sichern. Dazu gehören die Vorbereitung der Werkzeuge, die Materialzufuhr sowie die Einstellung von Prozessparametern wie Aufheiztemperatur, Druck, Zykluszeiten und Geschwindigkeiten. Die ersten produzierten Teile werden geprüft, die Parameter angepasst und feinjustiert, bis die gewünschte Qualität erreicht ist. Das bis dahin hergestellte Material gilt als Anfahr-ausschuss.

Ein Kunststoffunternehmen aus der Automobilindustrie nutzt in einem, von der Effizienz-Agentur NRW begleiteten, Projekt das KI-basierte Softwaresystem Detact, um die Prozessstabilität zu erhöhen und die Produktqualität zu verbessern (Detact, 2022). Dadurch reduziert das Unternehmen den Ausschuss sowohl im Spritzgussverfahren als auch in der Galvanik, bei der Teile mit einer Metallschicht überzogen werden. Die KI sammelt Prozessparameter, kombiniert sie mit Umweltdaten und Rohstoffinformationen, analysiert multiple Einflussfaktoren, verknüpft sie mit Qualitätsdaten und leitet Korrelationen ab. Dabei werden kontinuierlich neue Daten eingespielt und ausgewertet. Die KI lernt also permanent hinzu und kann Ausschuss sowie deren Ursachen immer genauer ankündigen. Eine Spritzgussanlage spart dadurch jährlich mehrere Tonnen Kunststoff und mehrere Megawattstunden Energie, das entspricht mehreren Tonnen CO₂e. Ein weiterer Vorteil ist, dass nur noch Gutteile in den folgenden Verarbeitungsschritt, die Galvanik, gelangen. Während sich der Spritzgussausschuss einfach recyceln und dem Kreislauf zurückführen lässt, sind galvanisierte Teile nur aufwändig zu recyceln.

¹ CO₂e steht für CO₂-Äquivalent (engl. equivalent) und wird als Maßeinheit verwendet, um den Effekt jeglicher Treibhausgase auf das Klima vergleichbar zu machen (Quaing et al. 2023).

KI ermöglicht Einsatz von Sekundärmaterial bei gleichbleibender Qualität

In einem Folgeprojekt beim gleichen Kunststoffunternehmen, das die Effizienz-Agentur NRW ebenfalls begleitete, steuert die KI den Produktionsprozess so, dass die schwankenden Rohstoffparameter des Sekundärmaterials im Prozess kompensiert werden. Auf diese Weise stellt die KI eine gleichbleibende Qualität der Produkte sicher, und das Unternehmen kann den Rezyklat-Anteil problemlos auf über 30 Prozent erhöhen. Dieser hohe Anteil an Sekundärmaterial schont jährlich weitere tausend Tonnen Rohmaterial und senkt so den CO_{2e}-Ausstoß um ebenfalls weitere tausend Tonnen.

In Bereich der Galvanik, bei der Spritzgussteile nacheinander in mehrere Bäder unterschiedlicher Medien getaucht werden, ist der Umwelteffekt noch größer, da galvanisierte Teile nur schwer recycelbar sind. Auch hier steuert die KI den Produktionsprozess zur kontinuierlichen Qualitätssicherung im Prozess. Es werden Tauchwege und -zeiten erfasst. Dadurch werden entstehende Verschleppungen von Tropfen oder Partikeln aus vorigen Bädern in Abhängigkeit von Teileform und -größe vorhergesagt und bestmögliche Routen und Verweildauern vorgegeben, um die Produktqualität sicherzustellen. Durch diesen stabileren Prozess kann der Ausschuss um einige Tonnen galvanisiertes Material reduziert werden. Gleichzeitig werden mehreren tausend Megawattstunden Strom gespart, was weitere tausend Tonnen CO_{2e} jährlich entspricht.

Im Sinne einer CE werden zum einen weniger Energie und Primärrohstoffe eingesetzt, zum anderen Sekundärrohstoffe in Form von Rezyklaten zurückgeführt und zusätzlich Deponieabfall von nicht recycelbarem Ausschuss reduziert.

KI-basierte Vorhersage von Wartungs- und Instandhaltungsmaßnahmen

KI-basierte Diagnosesysteme für eine optimierte Instandhaltung, auch Predictive Maintenance genannt, verfolgen neben einer stabilen, effizienten Maschinenauslastung u. a. das Ziel, möglichst nur qualitativ hochwertige, fehlerfreie Produkte herzustellen. Auf diese Weise kann die Menge an verarbeiteten Materialien reduziert werden, die als Ausschuss oder Abfall recycelt oder entsorgt werden muss.

Vor allem ungeplante Ausfälle und damit verbundene erneute Anfahrprozesse führen oft zu Qualitätseinbußen (Ausschuss) und einem erhöhten Abfallaufkommen z. B. aufgrund von Beschädigungen, Verformungen, Verfärbungen und Verunreinigungen. Um dies zu verhindern, nutzen KI-Systeme während der Produktion Daten von Sensoren, Kameras oder Mikrofonen zur Bauteil- oder Lagerüberwachung und gleichen diese mit zugehörigen Qualitätsdaten ab. Durch die Rückkopplung der Qualitätsprüfung mit der Parameter-Konstellation während der Produktion kann die KI frühzeitig ankündigen, wann Maschinenteile verschleiben oder der Ausfall einer Anlage droht. So kann rechtzeitig die Wartung eingeplant werden, um größere Schäden an den Maschinen zu verhindern und deren Lebensdauer zu verlängern. Indem die Qualitätsdaten (nachher) mit den Zustandsparametern (vorher) iterativ abgeglichen werden, kann die KI einen Erfahrungsschatz aufbauen, der kontinuierlich wächst und genauer wird. Dieser Vorher-nachher-Abgleich ermöglicht es dem System, zu einem früheren Zeitpunkt wesentlich genauere Vorhersagen zu liefern, wann Anlagen gewartet werden müssen. Damit kann die Auftragsplanung und -fertigung optimiert werden. Maschinenausfälle und Qualitätseinbußen lassen sich verhindern, was wiederum Ressourcen schont. Gleichzeitig wird die Produktivität gesteigert. Auch außerhalb der Produktion gibt es zahlreiche weitere Anwendungsmöglichkeiten für KI im Rahmen von Predictive Maintenance, z. B. bei der Wartung von Windkraftanlagen (Schwahlen et al., 2017).

Im Sinne einer CE werden Energie und Rohstoffe, die aus Qualitätseinbußen durch ungeplante Anlagenausfälle entstehen, eingespart.

Sell

Wo KI unterstützen kann

- **Marktprognosen und Bedarfsanalysen:** KI kann Marktdaten analysieren, um Nachfrageprognosen zu erstellen, die Fehl- oder Überproduktion vermeiden und den Abverkauf optimieren.
- **Etablierung von Alternativen zum klassischen Verkauf:** KI kann zirkuläre Ansätze wie „Nutzen statt Besitzen“ und den Mehrfachhandel unterstützen, indem Geschäftsmodelle mit diesen Ansätzen z. B. durch Unterstützung bei der Preis- und Vertragsgestaltung wirtschaftlich tragfähiger werden.
- **Effiziente Vertriebslogistik:** Mit Unterstützung durch KI können Lagerbestände und Lieferketten so optimiert werden, dass Transportwege und Lagerflächen minimiert und Ressourcen effizienter genutzt werden können.

Der Verkauf ist für Unternehmen in einer linearen Wirtschaft die entscheidende Phase, in der der generierte Wert realisiert wird und das Eigentum auf die Käufer*innen übergeht. In einer CE, die darauf abzielt, Produkte so lange wie möglich im Markt zu halten, stellt sich jedoch die Frage, woher die Einnahmen kommen, wenn die Nachfrage bewusst gesenkt wird. Diese Phase ist daher eng mit dem zirkulären Geschäftsmodell verknüpft und erfordert Überlegungen, wie Vertriebsprozesse effizient gestaltet werden können. Das Instrumentarium aus Marketing und Vertrieb, bei dem inzwischen an vielen Stellen KI-Systeme die Prognosen und Berechnungen durchführen, kann auch für zirkuläre Geschäftsmodelle genutzt werden. Dies ist bereits bei vielen Service-, Leasing- oder Mietmodellen beziehungsweise Sharing-Angeboten der Fall. Das Prinzip wird zunehmend auf weitere zirkuläre Absatzmärkte übertragen.

KI-basierte Bedarfsanalysen können Überproduktion verhindern oder neue zirkuläre Absatzmärkte erschließen

Neben dem betriebswirtschaftlichen Interesse, möglichst alle hergestellten Produkte zum vollen Preis zu verkaufen, kann eine KI-basierte Angebotssteuerung auch den Ressourceneinsatz reduzieren, indem nur die tatsächlich benötigte Menge an Produkten zum jeweiligen Zeitpunkt hergestellt und angeboten wird. Überproduktion und unnötiger Abfall lassen sich so vermeiden. Eine KI kann dabei unterstützen Nachfrage und Kaufverhalten der Vergangenheit zu analysieren und diese mit Einflussfaktoren wie Saison, Wetter, demografischem Umfeld und Modeströmungen zu korrelieren. Werden Kassenbons – wie im Einzelhandel üblich – systematisch ausgewertet, kann eine KI multiple Abhängigkeiten identifizieren und zukünftige Bedarfe vorhersagen. Diese Datenbasis lässt sich um nachhaltige Produkteigenschaften erweitern und gezielt für die Bedarfsanalyse nachhaltiger oder zirkulärer Märkte nutzen (Sharma, 2016). Konkret kann dies im Lebensmittelbereich helfen, Lebensmittelverschwendung zu reduzieren, indem etwa der Bedarf für regnerische Mittwoche optimiert wird. So könnte Blumenkohl länger auf dem Feld bleiben, anstatt im Supermarkt zu verderben.

Gut zu wissen

Die KI-Analysen von Kaufverhalten und Prognose möglicher Bedarfe zielen aktuell im Allgemeinen auf maximalen Absatz und höheren Profit ab. Nachhaltigkeitsziele stehen dem oft inhärent entgegen. Bei Nachhaltigkeit als (zusätzliches) Ziel von Bedarfsanalysen müssen auch mögliche Rebound-Effekte, sowie der hohe Energiebedarf der KI-Systeme selbst, beachtet werden.

Ein weiteres Beispiel zeigt, wie Unternehmen Nebenprodukte und Produktionsabfälle wie Randabschnitte und Stanzreste mithilfe der Auswertung von Produktions- und Absatzdaten vermarkten können. In einem Projekt, das die Effizienz-Agentur NRW begleitet, wird die Nachfrage nach Originalprodukten anhand verschiedener Faktoren wie Saison und Modeerscheinungen prognostiziert. So lassen sich die Mengen an Nebenprodukten und Produktionsabfällen abschätzen. Im zweiten Schritt werden diese automatisch online ebenfalls zum Verkauf angeboten.

Der Einsatz von KI zur Prognose und Bedarfsanalyse kann im Sinne einer CE zum Upcycling und somit Verhinderung von Abfall beitragen.

KI-basierte Preis- und Vertragsgestaltung bei Sharing- oder Nutzungsmodellen

Um Sharing- oder Nutzungsmodelle (betriebs-) wirtschaftlich tragfähig anzubieten, müssen Faktoren wie Lebensdauer, Ausfallwahrscheinlichkeit und Wartungsaufwand der Produkte, Nutzungshäufigkeit und -intensität sowie Zerstörungsmöglichkeiten durch den Anwender abgeschätzt werden. Vielen Unternehmen fehlen hierfür die nötigen Daten und Erfahrungen, was die Verbreitung von solchen Alternativmodellen hemmt. KI könnte helfen, basierend auf aktuellen Gegebenheiten bzw. Vergleichsdaten zukünftige Parameter für die Preisgestaltung zur Verfügung zu stellen. Die KI könnte Anbietern von Sharing- und Nutzungsmodellen noch bei weiteren Aufgaben die Arbeit erleichtern. Insbesondere die Vertragsgestaltung kann durch generative KI bei der Nutzung von Produkten durch eine Vielzahl von Akteuren oder beim Outsourcen von damit verbundenen Dienstleistungen, wie Reparatur, Wartung und Wiederaufbereitung, unterstützt werden. Allerdings sollten diese Vertragsentwürfe durch die verantwortlichen Akteure überprüft und gegebenenfalls angepasst werden. Effekte von Sharing- und Nutzungsmodellen für die CE wird im nächsten Abschnitt *Use* behandelt.

Durch KI-basierte Risikokalkulation, Aufwandsabschätzung und Vertragsgestaltung werden Sharing- oder Nutzungsmodelle im Sinne einer CE erleichtert.

Optimierte Logistik durch KI

KI-basierte Prognosen von Marktentwicklungen werden in vielen Unternehmen seit Jahren eingesetzt, um die Vertriebslogistik zu optimieren. Handelsunternehmen wie Otto lassen sich z. B. die Einkaufsmengen der Endkunden von KI vorhersagen. Die Prognose-Genauigkeit ist dabei so hoch, dass bestellte Ware gar nicht erst eingelagert werden muss, sondern während des Transports vom Hersteller zum Logistikzentrum bereits wieder abverkauft wird. Neben den Kosteneinsparungen bei der Lagerhaltung werden Transportwege eingespart, Lagerflächen reduziert bzw. optimiert genutzt und bei den Lieferanten Überproduktion vermieden. Nach Angaben von Otto wird automatisch nachgeordert, sobald der Lagerbestand auf 35 Prozent des Sortiments gesunken ist (Oncsak, 2024).

Use

Wo KI unterstützen kann

- **Maximierung der Produktlebensdauer:** KI-basierte Wartungssysteme können nicht nur den Zustand von Fertigungsanlagen, sondern auch Produkten überwachen und auch hier eine vorausschauende Wartung ermöglichen, um die Lebensdauer zu verlängern.
- **Hilfen zur Selbstreparatur:** KI-gestützte Assistenten können Nutzende bei der Reparatur von Produkten unterstützen, um die Nutzungsdauer zu verlängern und unnötige Retouren und Abfälle zu vermeiden
- **Optimierung von Sharing-Modellen:** KI kann Sharing-Plattformen stärken, indem sie bei der Interaktion mit Nutzenden eingesetzt wird, um Kontroll- und Prüfabläufe zu automatisieren

Wie in den vorigen Kapiteln gesehen, werden in der Produktion vor allem die Maßnahmen für die CE ergriffen, die gleichzeitig einen direkten wirtschaftlichen Mehrwert für die Unternehmen bilden. In der Nutzungsphase hängen die Motivationen und Einflussmöglichkeiten der produzierenden Unternehmen vom jeweiligen Geschäftsmodell ab. Während im klassisch-linearen Geschäftsmodell – günstig produzieren und teuer verkaufen – die Lebensdauer des Produktes nicht zu lang sein sollte, ist bei der Vermietung das Gegenteil der Fall. Die daraus resultierende wirtschaftliche Motivation zur Maximierung der Nutzungsdauer ist automatisch kongruent mit dem Ziel der CE, Produkte möglichst lange in der Nutzung und im Kreislauf zu halten. Zirkuläre Geschäftsmodelle sind in der Regel komplexer, da sie eine höhere Vernetzung der Akteure wie z. B. Anbieter, Nutzer*innen und Dienstleister wie Reparaturbetriebe voraussetzen. Die Digitalisierung kann diese Geschäftsmodelle stärken, indem sie den Austausch zwischen den Beteiligten vereinfacht oder überhaupt erst ermöglicht (Neligan et

al., 2023). Dabei fallen Datenmengen an, die von einer KI genutzt werden können, um wettbewerbsfähige Geschäftsmodelle im Sinne einer CE zu generieren.

Verlängerung der Produktlebensdauer durch KI

Wie bereits im Abschnitt *Make* ausführlich dargelegt, kann die Lebensdauer von Anlagen und Maschinen verlängert werden, wenn KI-basierte Vorhersagen bezüglich Abnutzung und Verschleiß genutzt und frühzeitige Wartungsmaßnahmen durchgeführt werden. Diese Potenziale können auch auf hochwertige Konsumgüter übertragen werden. Das setzt voraus, dass – wie es beispielsweise beim Auto schon der Fall ist – Nutzungsdaten zur Verfügung stehen. Die Nutzungsdaten von Produkten derselben Kategorie (Schwarmdaten) lassen sich auswerten, um z. B. notwendige Wartungsarbeiten automatisiert anzukündigen, oder um Reparaturmaterial rechtzeitig bereitzustellen. Auch KI-gesteuerte elektronische Updates können die Nutzungsphase, insbesondere bei Smartphones oder Tablets, verlängern.

KI-Assistenzsysteme zur Unterstützung bei der Selbstreparatur

Eine Voraussetzung, um Produkte möglichst lange verwenden zu können, ist ihre Reparierbarkeit – wie im Abschnitt *Think* beschrieben. Diese Eigenschaft kann in der Nutzungsphase durch einen KI-gestützten Kundenservice unterstützt werden. So werden im Kundenservice des Elektronik-Händlers tink KI-Chatbots oder KI-Sprachassistenten eingesetzt, die häufig gestellten Fragen über die Internetseite und Hotline beantworten und den Kunden entsprechende Hilfestellungen zur Selbstreparatur geben (tink GmbH, 2024). Häufig auftretende Probleme der Nutzer*innen sollen so schneller behoben und unnötige Retouren verhindert werden. Jedes zurückgeschickte Produkt muss überprüft und ggf. repariert oder generalüberholt werden. Dieser Ressourcenaufwand wird im Sinne einer CE verhindert, wenn die Nutzer*innen die Reparatur selbst durchführen können.

KI-basierte Optimierung von Sharing-Geschäftsmodellen

Sharing Modelle sind ein zentrales Element der CE. Allerdings muss sichergestellt werden, dass die Produkte und Dienstleistungen der Sharing Economy auch sachgemäß angewandt und behandelt werden, damit sie gesellschaftlich akzeptiert werden. In der öffentlichen Debatte heiß diskutiert waren zum Beispiel die unsachgemäß abgestellten E-Scooter. KI-Lösungen können ein Weg sein, um das gewünschte Nutzungsverhalten zu unterstützen. Die Firma Bolt setzt beispielsweise KI-Systeme ein, die prüfen, ob der E-Scooter ordnungsgemäß abgestellt wurde (Bolt Technology OÜ, 2025). Die Nutzer*innen müssen dazu ein Foto vom Abstellort hochladen und werden kurzfristig informiert, wie das Gerät richtig zu parken ist. Ziel ist die Sensibilisierung der Nutzenden für korrektes Parken, um so die Akzeptanz der E-Scooter in der Bevölkerung zu erhöhen und dieses Lückenschluss-Modell zu erhalten. Ähnliche Systeme werden eingesetzt, um bei Miet-Modellen, etwa in der Autovermietung, Schäden automatisiert zu erkennen und zu berechnen. Letztlich nützen diese Anwendungsfälle jedoch nur der Nachhaltigkeit, wenn im Gesamtsystem (Modalmix) unterm Strich weniger Ressourcen benötigt und weniger Schadstoffe in den Umlauf gebracht werden. Im Sinne einer CE werden durch die KI Risiko und Aufwand für Unternehmen reduziert und die Bereitschaft zum Angebot von Sharingmodellen erleichtert.

Gut zu wissen

Damit die digitale Sharing Economy tatsächlich zu Kreislaufwirtschaft und Ressourcenreduktion beiträgt, sind adäquate politische Rahmenbedingungen notwendig. Für eine breitere Diskussion siehe Denter/Heinz (2023).

KI-basierte Wartungssysteme für Endanwender*innen

Das im Kapitel *Make* vorgestellte Konzept der Predictive Maintenance kann nicht nur in der Produktion sinnvoll eingesetzt werden, sondern auch in der Nutzungsphase. Neben dem Vermeiden

überflüssiger Käufe können KI-Systeme im Kontext von Predictive Maintenance helfen, die Lebensdauer eines Produktes zu erhöhen. Die KI kann Verschleißmuster beim Betrieb eines Produktes erkennen. Diese Services sind oft mit einem digitalen Zwilling – einem digitalen Abbild des Produktes – verbunden. Das System gibt Wartungshinweise, wenn ein Ausfall abzusehen ist. Diese Instandhaltung wirkt sich positiv auf die Wirtschaftlichkeit von Maschinen in der Produktion und den Erhalt des Produktwertes in der Nutzungsphase aus. Ein Beispiel ist die prädiktive Instandhaltung von Kehrmaschinen. Die LUVIS AI GmbH führte mit der Stadtreinigung Hamburg ein System ein, das mit akustischen Sensoren Turbinen von Kehrmaschinen überwacht. Das KI-System erkennt anhand der Sensordaten Probleme frühzeitig und weist darauf hin. Damit werden Totalausfälle, unnötige Wartungsvorgänge und verfrühte Komponentenaustausche vermieden (Friedrich et al., 2021). KI-Systeme, die Maschinen so überwachen, können auch dazu beitragen, den Verschleiß zu reduzieren. Die KI lernt, den Betrieb optimal zu steuern und Wartungszyklen zu verlängern – ein Prinzip, das schon bei der Herstellung angewandt werden kann.

Return

Wo KI unterstützen kann

- **Ermöglichung und Optimierung einer effizienten Rückführung (Reverse Logistics):** KI kann die notwendige Rückführung von Produkten, Komponenten oder Materialien unterstützen, zum Beispiel durch ein Netzwerk von „intelligenten“ Sammelcontainern in Kombination mit einer KI-Software zur Routenoptimierung.
- **Prüfung und Sortierung gebrauchter Produkte:** Durch Bilderkennung können KI-Systeme Produkte oder Bauteile identifizieren und deren Qualität bewerten, sowohl als Eingangs-, als auch als Ausgangskontrolle.
- **Steigerung von Reinheit und Wertigkeit von Stoffströmen:** Durch die Kombination von intelligenter Bilderkennung, Robotik und weiteren Technologien können Produkte automatisiert vorzerlegt und vorsortiert werden. Dieses Konzept kann sowohl das Recycling verbessern als das Remanufacturing unterstützen.

Fast alle Kreislaufwirtschaftsstrategien benötigen ein geeignetes Rückführungssystem bzw. eine umfassende Rückführungslogistik (Reverse Logistics). Dabei gibt es unterschiedliche Beziehungen bzw. Verknüpfungen zwischen den Phasen der Wertschöpfung und R-Strategien, welche wir hier zu *Return* zusammenfassen. Es gibt drei zentrale Motivationen für die Rückführung von Produkten: Sie sollen entweder komplett erneut genutzt werden (z. B. durch Sharing, Reparatur oder Refurbishing), funktionierende Komponenten sollen wiederverwendet werden (Remanufacturing) oder verbleibende Materialien aus Komponenten oder Restabfällen sollen recycelt werden. Jede dieser Strategien erfordert spezifische Rückführungswege und logistische Konzepte, die oft mit KI optimiert werden können.

Ein Beispiel für zirkuläre Sharing-Konzepte (Rethink) ist Car- oder Bikesharing. Diese Modelle basieren auf einem ständigen Wechsel zwischen Bereitstellung und Rückführung, wodurch die Auslastung der Fahrzeuge gesteigert und Ressourcen in der Produktion eingespart werden. Die Wiederverwendung unveränderter Produkte (Reuse) erfordert zumindest einen Versand von Erstnutzer*in zu Zweitnutzer*in. Bei erneuter Weitergabe erfolgt weiterer Versand. Strategien wie Repair, Refurbishment oder Remanufacturing benötigen hingegen eine komplexere Rückführung, bei der Produkte geprüft, bearbeitet und erneut ausgeliefert werden. Auch für ein effizientes Recycling zur Gewinnung von Sekundärrohstoffen sind Rückführungskonzepte essenziell, bei deren Optimierung KI sinnvoll unterstützen kann (vgl. Beispiel Circular Digital Economy Lab).

In zirkulären Geschäftsmodellen sind die Phasen Return, Use und Reuse eng miteinander verknüpft. Wird die die Verlängerung der Nutzungsphase konsequent umgesetzt, kann ein Produkt von viel mehr als einer Person besessen bzw. genutzt werden. Geschäftsmodelle wie Product-as-a-Service, Mietangebote oder der Second-Hand-Märkte erfordern jeweils spezifische Rückgabekonzepte. In diesen Modellen sind jeweils unterschiedliche Return-Wege vorgesehen: Beim Angebot von Produkten als Service muss das Produkt eventuell irgendwann ausgetauscht werden, bei der Miete wird es nach Ende der Laufzeit zurückgegeben, muss begutachtet werden und wird wieder neu vermietet. Dasselbe gilt für den Wiederverkauf – nur auf der Basis eines anderen Geschäftsmodells.

Physische Produkte müssen also, wenn sie nicht vor Ort selbst repariert oder wiederaufbereitet werden, zu einem Werk oder einer Werkstatt transportiert, begutachtet und bearbeitet werden, um dann möglichst nah am Originalzustand, oder sogar verbessert, wieder ausgeliefert zu werden. Entlang dieses Prozesses gibt es zahlreiche Aufgaben, bei denen KI auch heute schon eine wichtige Rolle spielt. Die Vorteile für den Einsatz liegen vor allem im Bereich der Zustandsbeurteilung, Verarbeitungsgeschwindigkeit, Präzision oder Kostenreduktion.

Der KI-Einsatz in der Return-Phase konzentriert sich häufig auf intelligente (Bild-) Datenverarbeitung, um die Erkennung und Sortierung verschiedenster Materialien wie Elektrogeräte, Holz, Metalle oder Textilien im Recycling zu verbessern. Die folgenden Beispiele zeigen, dass KI, insbesondere in Kombination mit Technologien wie Robotik, die Rohstoffreinheit deutlich steigern kann. Dies erhöht die Attraktivität und Verfügbarkeit von Sekundärrohstoffen, wodurch Ressourcen und Energie im gesamten Wertschöpfungsprozess eingespart werden können.

Gut zu wissen

KI-Systeme und andere Technologien, die Sortier-, Weiterverwendungs- und Recyclingprozesse unterstützen sollen, müssen stets im Kontext des Gesamtsystems bewertet werden. So ist der Einsatz von KI im Sortierprozess überflüssig, wenn Produkte entweder nicht fachgerecht entsorgt werden (z. B. E-Zigaretten im Restmüll) oder gar nicht im Entsorgungskreislauf landen (z. B. Smartphones, die in Schubladen verbleiben). Auch ein Mangel an Inputmaterial für das Recycling kann die Wirksamkeit solcher Technologien einschränken.

KI-basierte Unterstützung von Sortierung gebrauchter Produkte und Materialtrennung

In einem schwedischen Forschungsprojekt wurde KI für die Sortierung und Begutachtung gebrauchter Textilien genutzt. Dabei entstand eine Datenbank mit über 30.000 Textilien und Informationen zu u. a. Marke, Materialien und Art der Kleidungsstücke. Auf dieser Datenbasis konnten die Textilien automatisch sortiert und größere Mengen wiederverwendet werden. Eine Lebenszyklusanalyse ergab, dass bereits bei einer Verbesserung des Sortierergebnisses um nur ein Prozent ein positiver ökologischer Effekt messbar ist (Vinnova, 2024).

Sind die Weiterverwendung und Reparatur von Materialien nicht mehr möglich, bleibt nur noch die Verwertung der Materialien selbst. Hier geht es darum, die Abläufe zu optimieren und die Qualität der Materialfraktionen zu erhöhen. In Norwegen trennt die landesweit größte Abfallverarbeitungsanlage automatisch verschiedene Holzqualitäten, Nichtmetalle, Hartkunststoffe und schwarze Kunststoffe. Die vollautomatische Robotersortierstation von ZenRobotics in Bjorstaddalen kann nach eigenen Angaben bis zu 6.000 Entnahmen pro Stunde durchführen.

Das deutsche Unternehmen cleansort GmbH nutzt eine spezielle Lasertechnologie, die sogenannten laserinduzierte Plasmaspektalanalyse (LIPS), um recyclingfähige metallische Bestandteile zu identifizieren. Mithilfe dieser Daten wird es dann möglich, eine Sortieranlage zu steuern, die mittels Druckluft die Teile gezielt separiert (DBU, 2023). Ein weiteres Beispiel ist das Unternehmen Re Plano, es setzt KI zur optischen Erkennung ein- und mehrschichtiger Kunststoffabfälle ein, sodass diese sortenrein getrennt werden können (Steinert, 2024).

KI-basierte Objekterkennung und Robotereinsatz zur Verbesserung des Elektroschrott-Recyclings

Ein relevanter Stoffstrom, der kontinuierlich zunimmt, ist Elektroschrott. Gleichzeitig enthalten Elektrogeräte zahlreiche wertvolle und kritische Rohstoffe wie seltene Erden oder Metalle. Um zu erforschen, wie KI, Robotik und weitere Technologien das Recycling von Elektrogeräten effizienter gestalten können, wurde im Projekt Prosperkolleg das Circular Digital Economy Lab (CDEL) an der Hochschule Ruhr West (HRW) aufgebaut. Im CDEL werden digitale Technologien und Verfahrenstechniken

für das Elektroschrott-Recycling intelligent kombiniert (Handmann et al., 2024, Prosperkolleg, 2024 b). Ziel ist es, die Zerlegung und Vorzerlegung von Elektrogeräten in gezielt ausgewählte Stofffraktionen zu automatisieren. Dadurch wird die Sortierung präziser und effizienter als bei bisherigen Verfahren.

Ein Beispiel ist die Verarbeitung von Elektrokleingeräten: Zunächst werden diese mit Kameras erfasst und durch KI-gestützte Objekterkennung eindeutig identifiziert (Baker/Handmann, 2024). Anschließend platziert ein Roboter die Geräte in eine Röntgenkammer, um ihren inneren Aufbau zu analysieren. Mithilfe dieser Daten kann ein weiterer Roboter die Geräte mit einem Wasserstrahlschneider präzise trennen und in Stofffraktionen vorsortieren (Duddek et al., 2024).

Das Vorgehen im CDEL ist flexibel und könnte eine von mehreren Stufen in einem umfassenden zirkulären Produktsystem bilden, wie es eine Fallstudie von INDEED Innovation beschreibt (INDEED Innovation, 2022). Zudem gewinnt die HRW durch das Projekt Erkenntnisse zur Verbesserung des Produktdesigns und gibt diese Informationen an die Hersteller weiter. Die Machbarkeit des Verfahrens wurde anhand von Akkuschaubern erfolgreich demonstriert und lässt sich auf andere Elektroprodukte übertragen. Auch das entwickelte KI-Modell ist universell einsetzbar. Dank der KI-Methode des Transfer-Lernens kann ein großer Teil des Modells für andere Gerätetypen wiederverwendet werden (Baker/Handmann, 2024). Dadurch werden Ressourcen und Energie eingespart, da der Aufwand für das Modelltraining erheblich reduziert wird.

Die Logistik bei Rückführungsprozessen optimieren

Neben der Behandlung der Materialien spielen auch das Behältermanagement und die Routenplanung der Fahrzeuge eine wichtige Rolle in der Rückführung. Dies einerseits, um genügend Sekundärmaterial in der benötigten Qualität zur Verfügung zu haben, andererseits, weil auch die Transporte für die Rückführung einen nicht zu unterschätzenden ökologischen Fußabdruck haben. Ein Beispiel für Abfallmanagement-Lösungen auf Basis des Internets der Dinge und KI ist die Firma Zoltron aus Bochum. Eine ihrer Lösungen erfasst mit speziellen Sensoren KI-basiert anhand des Klangs bzw. der Vibrationen die Füllstände von Glascontainern, sammelt und vernetzt die Daten in einer Cloud und führt auf Basis der Füllstandsdaten eine KI-basierte Routenoptimierung durch. Dieses Vorgehen lässt sich auf viele weitere Anwendungsfälle der CE übertragen.

Teil II Gestaltungsaufgaben – Wie KI für die CE gestaltet werden sollte

Kernbotschaften

- **KI allein bietet keinen Mehrwert:** Unternehmen müssen ihre Geschäftsmodelle, Produkte und Prozesse so anpassen, dass Ressourcenschonung erreicht wird. KI kann nur dabei unterstützen.
- **Gezielter Einsatz in allen Phasen des Produktlebenszyklus möglich:** KI kann in allen Phasen sinnvolle Unterstützung leisten, d.h. beim Design, Materialauswahl, Entwicklung von Materialalternativen, Beschaffung, Logistik, ressourcenschonender Produktion und Nutzung, der Umsetzung von Sharing- und Miet-Geschäftsmodellen sowie bei Sortier- und Recyclingprozessen.
- **Rebound-Effekte:** Effizienzgewinne und Materialeinsparungen durch KI können unbeabsichtigte Folgen haben, wie erhöhte Produktion oder Konsum, die den Ressourcenverbrauch steigern.
- **Rahmenbedingungen sind essenziell:** Für den effektiven Einsatz von KI für CE müssen politische und wirtschaftliche Rahmenbedingungen in beiden Themenfeldern geschaffen werden, die für die Transformation erforderliche Aktivitäten und zirkuläre Geschäftsmodelle fördern und Barrieren abbauen.
- **Kritische Überprüfung der Aufgabenstellung und Ergebnisse:** Bevor KI eingesetzt wird, muss klar definiert sein, welches Problem gelöst werden soll und ob KI tatsächlich die beste Unterstützung bei der Lösung bietet. Die Grenzen von KI müssen dafür reflektiert und anerkannt werden. Die Daten, mit denen die KI-Anwendungen trainiert wurden, müssen zur Zielstellung passen. Die Ergebnisse müssen kritisch überprüft werden, um u. a. Fehlinterpretationen zu verhindern.
- **Literacy:** Es ist notwendig, dass Beteiligte der CE, die KI einsetzen, über eine zumindest grundlegende KI-Kompetenz verfügen, um Verzerrungen in der Datenbasis zu erkennen, Ergebnisse kritisch zu bewerten und darauf basierend fundierte Entscheidungen treffen zu können. Ebenso müssen KI-Entwickler*innen die Prinzipien der CE verstehen und mögliche politisch-gesellschaftliche Werte und Veränderungen beim Training mit einbeziehen.
- **Integration von KI und Digitalen Produktpässen:** KI kann in Kombination mit Digitalen Produktpässen helfen, zirkuläre Geschäftsmodelle durch automatisierte Datenakquise und -analyse zu unterstützen und langfristig nachhaltiger zu wirtschaften.
- **Ökobilanzierung nötig:** Der Energie- und Ressourcenverbrauch von KI-Systemen selbst muss gegen deren potenzielle ökologische Vorteile abgewogen werden, um eine nachhaltige Nutzung sicherzustellen.
- **Gesellschaftliche Akzeptanz:** Technologische Lösungen müssen mit den Werten und Bedürfnissen der Gesellschaft übereinstimmen, um wirklich transformativ wirken zu können.
- **Datenräume schaffen:** Um das Potenzial von KI für die CE zu heben, ist der Zugriff auf Daten innerhalb unterschiedlicher Bereiche eines Unternehmens, aber auch zwischen Unternehmen nötig. Silostrukturen müssen dazu durchlässig werden. Datenschutz und -sicherheit sind dabei einzuhalten.

KI für die CE: Notwendigkeit einer ganzheitlichen Strategie

KI allein wird die Transformation zum zirkulären Wirtschaften nicht bewältigen. Denn eine ganzheitlich umgesetzte CE geht mit tiefgreifendem wirtschaftlichem und gesellschaftlichem Umdenken sowie entsprechenden Rahmensetzungen einher. Das heißt, Politik muss Rahmensetzungen verabschieden, Unternehmen müssen sich in ihren Geschäftsmodellen und Praktiken und Menschen in ihrem Verhalten ändern. Wie im ersten Teil dieses Impulspapiers skizziert, können digitale Technologien wie KI dabei unterstützend wirken. KI-Systeme können beispielsweise in der Entwicklungs- und Designphase eines Produktes eingesetzt werden, um Empfehlungen für die Materialzusammensetzungen und das Design eines Produktes im Sinne der CE zu liefern. Weiterhin können beispielsweise Sortier-, Demontage- und Recyclingprozesse oder auch die Einschätzung der Wiederverwendbarkeit von Produkten oder Komponenten unterstützt werden.

Grundsätzlich hängt das Ausmaß des Lösungsbeitrags von KI davon ab, wie ambitioniert die CE-Strategie ausgerichtet ist und umgesetzt wird, in welche die KI eingebettet ist. Das bedeutet beispielsweise, dass die regulatorischen und ökonomischen Bedingungen für innovative zirkuläre Strategien wie Refurbishment oder Remanufacturing grundsätzlich verbessert werden müssen, damit KI das Ausrollen und die Wirtschaftlichkeit entsprechender Geschäftsmodelle überhaupt unterstützen kann. Schon jetzt kann (generative) KI dabei helfen, Potenziale für solche Strategien effizient zu identifizieren, zum Beispiel durch einen Abgleich eigener Unternehmensinformationen mit Vorreitern aus der eigenen Branche. Jedoch müssen sich für eine erfolgreiche Transformation zur CE politische Entscheidungsträger*innen, die Anreize für KI-Entwicklung setzen, wie zum Beispiel finanzielle Förderungen, immer kritisch hinterfragen, ob und wo KI wirklich substantiell zur Zielerreichung der Nachhaltigkeit beiträgt, oder sie nicht sogar die lineare Wirtschaft befeuert.

Ein gutes Beispiel für die Problematik ist die Sortierung von Elektrogeräten zur Wieder- und Weiterverwendung: Immer wieder geraten batteriehaltige Geräte in Abfallströme, in die sie nicht gehören, wie zum Beispiel Leuchtschuhe in den Altkleidercontainer oder Einweg-E-Zigaretten in den Restmüll. Die falsche Entsorgung erschwert nicht nur den Sortierprozess erheblich, sondern zieht, wie im Fall der Einweg-E-Zigarette, auch Sicherheitsrisiken, wie Brände auf Wertstoffhöfen, nach sich. Sie behindert außerdem die Kreislaufführung von wichtigen Komponenten und Rohstoffen, aus denen solche Produkte bestehen. Angesichts der Risiken und dem geringen gesellschaftlichen Nutzen dieser Produkte stellt sich sogar die Frage nach deren Daseinsberechtigung. Eine Bilderkennungs-KI, die batteriehaltige Produkte im Abfallstrom detektiert, könnte zwar Alarm schlagen, wenn LED-Schuhe mit anderen Schuhen vermischt werden oder E-Zigaretten im Restmüll auftauchen. Doch zum einen bleibt die Frage, welchen Nutzen ein Alarm hätte, da es mit hohem (ökonomischen) Aufwand verbunden wäre, die batteriehaltigen Produkte aus dem Berg an anderweitigem Abfall herauszufiltern. Zum anderen setzt ein solches Nachsorgekonzept, auch „End-of-Pipe-Ansatz“ genannt, erst an, wenn das Problem schon entstanden ist. Es muss also evaluiert werden, ob andere, nicht-technische Maßnahmen das Problem wirksamer lösen können. Vorschläge sind Pfandsysteme für Batterien, bessere Kennzeichnung und Aufklärungsarbeit, ein Verbot lithiumhaltiger Einwegprodukte und die Verbesserung von Sammelsystemen durch bessere Öffnungszeiten, kurze Wege und solide finanzielle Ausstattung. In vielen Fällen können KI-Anwendungen erst dann wirksam zur CE beitragen, wenn die Rahmenbedingungen verändert werden. Im obigen Beispiel könnte das unter anderem bedeuten, dass Anreizmechanismen geschaffen werden, damit sich eine aufwändige, ggfs. mit KI automatisierte Sortierung und Verwertung der Abfälle ökonomisch verhältnismäßig umsetzen lässt. Durch bessere Bildung und Sensibilisierung für Nachhaltigkeit könnte gar vermieden werden, dass solche Produkte überhaupt designt, produziert und konsumiert werden.

Es muss also zunächst die Frage gestellt werden, welches Problem gelöst werden soll, bevor definiert werden kann, ob KI in diesem Kontext eine sinnvolle Rolle spielen kann. Weiterhin müssen KI-Anwendungen im Bereich CE immer eingebettet in eine größere CE-Strategie und durch andere Maßnahmen flankiert werden. Dies gilt sowohl auf politischer Ebene als auch Unternehmensebene. KI sollte im CE Bereich nur dort entwickelt und eingesetzt werden, wo sie tatsächlich einen positiven Beitrag zur Ressourcenschonung leisten kann. Weiter gefasst muss dies für die Nachhaltigkeit

insgesamt gelten (vgl. Sustainable Development Goals, United Nations, 2015). Dabei ist es zentral, den Energie- und Ressourcenverbrauch des KI-Systems selbst, sowie auch soziale Risiken, die KI inhärent sind (z. B. Datenbiases), bei einer Kosten-Nutzen-Betrachtung zu berücksichtigen.

KI und Digitale Produktpässe sinnvoll kombinieren

Als Schlüsseltechnologie, um die Transformation zur CE zu ermöglichen, gelten Digitale Produktpässe (DPP). Sie werden sukzessive europaweit für viele Produktgruppen verbindlich eingeführt. Beim DPP handelt es sich um ein dezentrales System standardisierter Datensätze, durch das die Transparenz über kreislaufwirtschaftliche Produkteigenschaften wie Design, Materialien, oder Reparierbarkeit im gesamten Produktlebenszyklus geschaffen werden soll. Ein Beispiel ist der sogenannte Batteriepass, welcher 2027 als erstes EU-weit eingeführt wird, um die CE insbesondere im Bereich Antriebsbatterien zu unterstützen.

Die regulative Grundlage für die Einführung der meisten DPPs schafft die neue EU-Ökodesign-Verordnung (Europäische Kommission, 2024). Von Datenakquise bis Predictive Maintenance, KI kann in vielfältiger Form genutzt werden, um die Vorteile von DPPs noch stärker auszuschöpfen und so zu einer digital unterstützten zirkulären Wertschöpfung beizutragen.

Die Einführung von DPPs stellt Unternehmen ohne ausreichende digitale Infrastruktur oder Knowhow vor große Herausforderungen. Damit der DPP von Unternehmen eingeführt und sinnvoll genutzt werden kann, müssen zeitliche und finanzielle Hürden von vornherein minimiert werden. Bereits die Sammlung und einheitliche Strukturierung von DPP-relevanten Daten ist aufwändig, denn zurzeit sind die Ressourcen oft auf heterogene Datenquellen verstreut. Im Rahmen einer Datensammlung aus unterschiedlichsten Quellen (beispielsweise PDF-Dateien, Scans von Bedienungsanleitungen, unstrukturierte Excel-Tabellen) ist herkömmliche Software, ohne semantisches Verständnis von Kontexten über mehrere Sprachen hinweg, nicht mehr ausreichend. Sogenannte LLM wie ChatGPT und deren kausales Verständnis textueller und visueller Daten machen es möglich, Informationen automatisiert aus heterogenen Quellen zu analysieren und in ein standardisiertes Datenformat zu überführen (Li et al., 2024). Unternehmen können ihre Daten auf diese Weise ohne fundiertes, technisches Knowhow im Sinne der von der EU-Kommission vorgeschriebenen Standards zusammenführen und für den DPP bereitstellen.

KI kann nicht nur bei der anfänglichen Implementation des DPP unterstützen und den Prozess gegenüber manuellem Aufwand um ein Vielfaches beschleunigen, sondern auch weitere vielseitige Anwendungen im Rahmen einer zirkulären Wertschöpfungskette bieten. Durch sogenanntes Representation Learning wird versucht, grundlegende Strukturen und Muster von Daten zu erfassen. Daraus ergibt sich das Potenzial, Daten effizient zu gruppieren, das Clustering, fehlerhafte bzw. fehlende Daten zu identifizieren und ggf. zu korrigieren, sodass eine grundlegende Datenintegrität sichergestellt werden kann. Liegen die Daten einmal strukturiert vor, so können beispielsweise, wie schon bei modernen Empfehlungssystemen im Einsatz, Vorschläge für zirkuläre Produkte von potenziellem Interesse sowohl für B2B- als auch B2C-Kunden gemacht und so neue Möglichkeiten für das Marketing nachhaltiger Produkte geschaffen werden. Die intelligente Analyse von Zeitreihendaten entlang einer Vielzahl von Produktlebenszyklen mithilfe des DPP kann ein Türöffner sein, um präzise Voraussagen über potenzielle Defekte und präventive Wartungsmaßnahmen verschiedener Produkttypen zu machen.

Zur Unterstützung von Reparaturunternehmen, und somit der längeren Nutzung von Produkten, sollen laut der Ökodesign-Verordnung auch Dokumente wie etwa Anleitungen zur Demontage und Reparatur im DPP enthalten sein. Generative KI kann hier die Navigation erleichtern und die Fokussierung auf relevante Reparaturanweisungen unterstützen, indem LLMs wichtige Textabschnitte und Informationen aus großen Textblöcken extrahiert. Der DPP ist in diesem Fall also auch als eine Art digitaler Zwilling zu betrachten (und kann auch als solcher ausgestaltet werden), mit dem man über sogenannte konversationelle KI-Modelle kommunizieren und so an gezielte Informationen über das jeweilige Produkt gelangen kann.

Im End-of-Life- und Abfallsektor sollen DPPs als zentrale Informationsquelle für Konstruktionen und Materialzusammensetzungen („Materialpass“) dienen, die die Grundlage für die Demontage und das

Recycling bilden. In Recyclinganlagen können diese Daten mit visuellen Analysen der Produkte auf Förderbändern kombiniert und als Eingabe für Klassifikations- und Erkennungsmodelle genutzt werden. Diese Modelle ermöglichen eine automatisierte Sortierung der Produkte in relevante Gruppen, was zu einer effizienteren Extraktion und Trennung der Materialien führt. Die so gewonnenen Stoffe können anschließend wieder in den Materialkreislauf zurückgeführt werden. Der DPP und die damit verbundenen Technologien bieten noch viele offene (Forschungs-)Fragen und Innovationspotenziale, an denen sich in den nächsten Jahren Forscher*innen, etablierte Unternehmen, Start-Ups und auch zivilgesellschaftliche Akteure beteiligen werden. Die Menge an strukturierten Daten, die durch DPP entsteht, bietet unter anderem ein breites Spektrum an Geschäftsmodellen und internen Verbesserungsmöglichkeiten für Unternehmen, die mit KI-getriebener Analytik zur Zirkularität entlang der gesamten Wertschöpfungskette beitragen können.

KI-Systeme selbst nachhaltig gestalten

Die nachhaltige Gestaltung von KI fußt auf einem so facettenreichen Forschungsgebiet, dass es den Rahmen dieses Impulspapiers übersteigt, der vor allem das Zusammenspiel von CE und KI betrachten soll. Aufgrund dessen werden im Folgenden nur die allgemeinen Stellschrauben nachhaltiger KI-Gestaltung aufgezeigt.

KI kann nur in einer Gesellschaft und Wirtschaft ein sinnvolles Instrument sein, welche bereits nachhaltig ist oder sich die Transformation zur Nachhaltigkeit zum Ziel gesetzt hat. In einer linearen, weiterhin auf der Ausbeutung von natürlichen Ressourcen und von Menschen basierenden (Wirtschafts-)Welt hat KI das Potenzial derzeitige Missstände und Fehlentwicklungen zu verstärken. Im Lebenszyklus eines KI-Systems (z. B. Planung und Design, Daten, Entwicklung und Einsatz) können an vielen Punkten Entscheidungen getroffen werden, die zu einer besseren Nachhaltigkeit des KI-Systems beitragen. Im Rahmen des sustAIIn-Projektes entwickeln AlgorithmWatch, IÖW und das DAI-Labor Berlin ein Bewertungstool, mit dem anhand von dreizehn Kriterien die Nachhaltigkeit von KI-Systemen bewertet werden kann (SustAIIn, 2023). Die Kriterien umfassen ökologische, soziale und ökonomische Aspekte. Um soziale Nachhaltigkeit zu gewährleisten, sollte die KI beispielsweise regelmäßig auf Diskriminierung hin überprüft werden, Informationen zu KI-Systemen sollten offengelegt werden (dem widmet sich das Feld der Explainable AI, siehe z. B. Meske et al. (2022)) und Verantwortlichkeit für deren Ergebnisse festgelegt werden. Außerdem sollten eine hohe Datenqualität und Datenschutz sichergestellt werden. In Bezug auf ökologische Nachhaltigkeitskriterien kann auf einen nachhaltigen Energiemix und die geeignete Wahl von Zeit und Standort beim Training eines Systems geachtet werden. Weiterhin sollte die ressourcen- und energieschonende Produktion, Nutzung und Entsorgung der Hardware mitgedacht werden. Auch Konzepte wie Datenminimalismus – der gezielte Einsatz von möglichst wenigen Daten bei gleicher Leistung der KI – können sowohl im Hinblick auf ökologische (beispielsweise im Sinne der Energieeffizienz) als auch soziale Gesichtspunkte wie Datenschutz nachhaltiger sein. Zur Stärkung ökonomischer Nachhaltigkeit sollte die Zugangsbarriere zu KI-Entwicklung durch offene Datensätze, Schnittstellen und Quellcodes reduziert werden, auch um damit die Marktmacht- und Wissenskonzentration auf wenige große Anbieter von KI-Modellen entgegenzuwirken.

Klima- und Umweltauswirkungen von KI-Systemen messen und Rebound-Effekte vermeiden

Um die Potenziale von KI-Anwendungen für die CE beurteilen zu können, müssen die möglichen Ressourceneinsparungen, die erzielt werden können, den unerwünschten Nebeneffekten der Anwendung gegenübergestellt werden. Denn diese können die gewünschten Einsparungen aufzehren oder gar überkompensieren (Rebound-Effekten). Das heißt Vorteile, die durch den Einsatz von KI erzielt werden können, müssen ins Verhältnis zu dem Ressourcenverbrauch der KI-Systeme selbst gesetzt werden. Über die Umweltkosten von KI-Systemen – insbesondere in Bezug auf den gesamten Lebenszyklus der Systeme (also Entwicklung, Training, Nutzung) – gibt es derzeit jedoch kaum Zahlen (Mollen/Vieth-Ditlmann 2023). Diese fehlende Transparenz erschwert es unter anderem

politischen Entscheidungsträger*innen datenbasierte Entscheidungen zu treffen, um die die negativen Umweltauswirkungen von KI-Systemen zu mindern.

Gut zu wissen

Die Auswirkungen von KI auf die globalen Treibhausgasemissionen sind komplex zu erfassen. Kaack et al. (2022) schlagen einen systematischen Rahmen vor: rechenbezogene Auswirkungen maschinellen Lernens, unmittelbare Auswirkungen der Anwendungen von maschinellem Lernen und Auswirkungen auf Systemebene.

Wie eine Regulierung von KI aussehen könnte, zeigt der EU AI Act (Europäisches Parlament und Europa Rat, 2024). In Bezug auf ökologische Nachhaltigkeitsaspekte hat dieser zwar noch große Leerstellen, zeigt aber immerhin in Bezug auf die Stärkung von Transparenz erste Schritte auf. Denn Anbieter von general purpose KI-Modellen (KI-Modelle, die flexibel für eine Vielzahl unterschiedlicher Aufgaben eingesetzt werden können, anstatt nur für einen spezifischen Anwendungsfall optimiert zu sein) müssen im EU-Markt nach Inkrafttreten des AI Acts im Zuge einer technischen Dokumentation den bekannten oder geschätzten Energieverbrauch ihrer Modelle dokumentieren. Weiterhin müssen sie die für das Trainieren des Modells verwendeten Rechenressourcen berichten (Annex XI). Diese technische Dokumentation muss dem KI-Büro der EU sowie den nationalen Behörden auf Anfrage transparent gemacht werden. Die EU-Kommission wird die Berechnungsmethode und Messung in noch zu veröffentlichenden delegierten Rechtsakten vorgeben. Es lässt sich also eine Verknüpfung von Digitalpolitik (KI) und Umweltpolitik (Nachhaltigkeitsberichterstattung) erkennen. Darüber hinaus sollte in der Design- und Entwicklungsphase von KI-Systemen in einer Folgenanalyse auch systematisch das Risiko von Rebound-Effekten einbezogen werden.

Kurz erklärt

Rebound-Effekte treten auf, wenn Effizienzgewinne durch den Einsatz von Technologien wie KI zu Konsequenzen führen, die den erhofften positiven Effekt abschwächen oder sogar ins Gegenteil verkehren. Dies geschieht, weil Ressourcenersparnisse oft (unbeabsichtigt) zu einem gesteigerten Konsum oder einer verstärkten Nutzung führen.

Beispiele:

- **Produktionssteigerung:** Durch effizientere Produktionsprozesse sinken Kosten, was zu einer Erhöhung der Produktion und des Gesamtressourcenverbrauchs führen kann.
- **Vermehrter Konsum:** Effizienzgewinne bei langlebigen Produkten könnten zur Einführung zusätzlicher Produktlinien führen, was den Konsum insgesamt erhöht.
- **Erhöhte Ressourcennutzung:** Günstigere und effizientere Gewinnung von Primärressourcen könnte eine Übernutzung von Rohstoffen begünstigen, da die Kosten sinken.

Rebound-Effekte zeigen, dass reine Effizienzsteigerungen ohne begleitende Maßnahmen nicht zwangsläufig zu einer Reduktion des Ressourcenverbrauchs führen. Deshalb ist die Definition von Leitplanken wie das 1,5-Grad-Ziel des Pariser Klimaabkommens und damit verbundene Emissionsbudgets sehr wichtig, an denen sich alle Akteure orientieren können.

Die Grenzen von KI-Systemen anerkennen

Das Bewusstsein und Verständnis über die Funktionsweise und auch die Grenzen von KI ist essenziell und sollte kurzfristig insbesondere bei politischen Entscheidungsträger*innen gestärkt werden, die den Einsatz von KI allgemein sowie auch im Bereich CE bzw. Nachhaltigkeit durch Anreizsetzungen und Regulierung steuern. KI sollte weder vermenschlicht noch als objektiv und unabhängig betrachtet werden, da KI-Systeme nicht im biologischen Sinne „denken“ oder „verstehen“, sondern lediglich Wahrscheinlichkeiten berechnen, die für uns dazu analoge Ergebnisse liefern.

Inwiefern eine KI überhaupt Neues schaffen kann, wird kontrovers diskutiert. Grundsätzlich können auf Basis vorhandener Daten neue Ergebnisse entwickelt werden – zum Beispiel können auf Grundlage von Daten Vorschläge für neue Materialsubstitute geliefert werden. Dennoch ist ausschlaggebend, welche Daten wie kombiniert und für welche Fragestellung verwendet werden. Wenn über die Potenziale von KI für die CE nachgedacht wird, wird dieses grundsätzliche Problem deutlich.

Wir leben derzeit in einem linearen Wirtschaftsmodell. So zirkulär wie möglich zu wirtschaften und zu leben ist noch eine Vision. Die Trainingsdaten für KI-Modelle basieren auf Quellen aus der Vergangenheit und weisen somit zwangsläufig bestimmte temporale Grenzen auf. Für visionäre Ansätze im Bereich der CE ergibt sich daraus eine Einschränkung bei der Nutzung generativer KI-Systeme: Wenn diese hauptsächlich mit Daten zu linearen Wirtschaftsansätzen trainiert wurden und somit ein Bias bezüglich linearen Wirtschaftens vorliegt, können sie aktuell nur begrenzt innovative Ideen liefern, die über die in den Datensätzen enthaltenen Informationen hinausgehen (Roberts et al., 2024; Yin et al., 2023). Dies zeigt auch erneut, dass der Impuls für eine Transformation zur CE aus Gesellschaft, Politik und Wirtschaft kommen muss. KI kann uns diese Transformation nicht abnehmen. KI und ihre Potenziale für die CE dürfen in keinem Fall dazu führen, dass die gesellschaftlich-politische Debatte und Anstrengung darum, wie die Transformation gestaltet und vorangebracht werden kann und muss, verschleppt oder gar negiert werden. Neu generierte Forschungsergebnisse müssen deshalb kontinuierlich in den Input-Daten miteinbezogen und Verzerrungen durch Datenlücken und -missstände beachtet werden. Darüber hinaus spiegeln sich Interessen und Wissensstände der Entwickler*innen auch im Algorithmus und Training eines KI-Systems. In einem Pilotprojekt des GreenAI Hub Mittelstand mit dem Softwareunternehmen INTEX wird beispielsweise ein Empfehlungssystem für das ressourcenschonende Design von Textilprodukten entwickelt. Der Erfolg steht und fällt bei solchen Systemen mit dem Set, Indikatoren und Kriterien, nach welchen der Algorithmus das Produkt A zirkulärer als Produkt B einstuft. Bei der Erarbeitung dieses Sets ist es wichtig, dass sich linear-ökonomische Paradigmen nicht fortpflanzen. Zudem sind die Ziele mit Bedacht zu wählen und auf etwaige Zielkonflikte hinzuweisen. In dem Beispiel der Textilbranche könnte in einem Negativbeispiel eine einseitige Erhöhung der Lebensdauer angestrebt werden, womit es zu einer Empfehlung zum Mehreinsatz von Primärmaterialien kommen könnte.

KI-Literacy und CE-Literacy miteinander verschränken

Damit KI sinnvoll für die CE genutzt werden kann, müssen Akteure aus beiden Bereichen Kompetenzen aufbauen. CE-Akteure müssen die Datenqualität (beispielsweise Verzerrungen) erkennen und die zugehörigen Ergebnisse der KI-Systeme kritisch bewerten und einordnen (Bias). Andersherum müssen KI-Entwickler*innen die Prinzipien und Hierarchien der CE (siehe Einleitung) verstehen und ggf. auch wünschenswerte politische und gesellschaftliche Werte und Veränderungen in das Training einbeziehen. Das wird insbesondere deutlich, wenn KI-Systeme Empfehlungen zum zirkulären Produktdesign (*Think*-Phase) liefern sollen. Soll z. B. die KI eine Empfehlung dazu liefern, ob das Smartphone wasserfest und dafür verklebt oder reparierbar und dafür modular aufgebaut sein soll, müssen beim Training des KI-Systems und der Ergebnisauswertung die Datenlage und Annahmen miteinbezogen werden. Sowohl KI-Entwickler*innen als auch Produktdesigner*innen müssen sich fragen: Ändert eine verbesserte Reparaturkultur in Zukunft das Ergebnis (zum Beispiel durch die Einführung eines Reparaturbonus, der Reparatur incentiviert)? Hatte der überproportionale Daten-Input zu linearen Designs einen Einfluss auf die Empfehlungen?

Gut zu wissen

Diese beiden beispielhaften Projekte widmen sich dem Kompetenzaufbau für digitale CE, inklusive KI:

- Projekt DACE: <https://wupperinst.org/p/wi/p/s/pd/2308>
- Projekt digital.zirkulär.ruhr: <https://digital.zirkulär.ruhr/>

Gesellschaftliche Normen und Verhaltensweisen bei KI-Entwicklung mitdenken

Das Potenzial neuer Technologien wie KI zur Stärkung einer CE hängt nicht nur von ihrer technischen Ausgestaltung ab, sondern auch von ihrer Akzeptanz, Annahme und Integration durch die Gesellschaft (Büttner/Hermandi, 2022). Nur bei Übereinstimmung mit den Werten, Bedürfnissen und Bestrebungen der Gemeinschaften, denen Technologien dienen sollen, werden sie angenommen und können entsprechend auch transformativ wirken (Sánchez-García et al., 2024). Konsument*innen-Verhalten wird aktuell beispielsweise häufig durch Preispolitik oder gesellschaftliche Trends mitbestimmt. Wenn es gesellschaftliche Norm ist, sich jedes Jahr ein neues Smartphone zu kaufen und wiederaufbereitete Modelle trotz ihrer deutlich geringeren Umweltkosten fast genauso teuer sind wie ein Neue, dann hilft es kaum, ein KI-Empfehlungssystem auf einer Online-Handelsplattform einzuführen, das prioritär ein wiederaufbereitetes Smartphone oder den Weg zum Reparaturbetrieb um die Ecke anzeigt.

Datenverfügbarkeit und -Austausch sicherstellen

Viele KI-Projekte scheitern daran, dass notwendige Daten nicht zur Verfügung stehen: Seien es präzise Informationen über Abfallmengen in Kliniken, Stoffströme in der chemischen Industrie über Ländergrenzen hinweg oder Informationen darüber, wie Menschen Produkte nutzen. Vordergründig liegen viele Daten vor. Bei genauerem Hinsehen wird jedoch klar: sie sind oft nicht vergleichbar, die Qualität ist ungenügend oder sie sind nicht zugänglich. Die Datenlandschaft der Industrie ist stark fragmentiert.

KI-Systeme sind jedoch auf präzise und einheitliche Daten angewiesen, um verlässliche Ergebnisse zu liefern. Ein automatisiertes Analysesystem für klinische Abfälle, das Stoffströme identifiziert, Verursacher zuordnet und Entsorgungskosten verrechnet, erfordert eine einheitliche Nutzung von Abfallschlüsseln – was derzeit nicht gewährleistet ist.

Die in diesem Papier vorgestellten Anwendungen nutzen Daten entlang der gesamten Wertschöpfungskette auf unterschiedliche Weise. In komplexen zirkulären Ökosystemen sind Daten aus verschiedenen Unternehmensbereichen und Wertschöpfungsstufen erforderlich, wie Nutzungsdaten, Vertriebsdaten, Materialinformationen oder Rohstoffquellen. Entscheidend ist nicht nur der Zugang zu diesen Daten, sondern auch ein sicherer und einfacher Austausch, etwa über Datenräume.

Wie ein Datenraum aussehen kann, zeigen Projekte wie Catena-X, ein offenes Ökosystem speziell für die Automobilindustrie. Das System ermöglicht Herstellern und Zulieferern einen standardisierten und sicheren Datenaustausch entlang der Lieferkette innerhalb Europas. Ziel ist es nach Darstellung des Vereins Catena-X Automotive Network „eine datengesteuerte Wertschöpfungskette“ zu schaffen, die Grundlage für effizientere Prozesse und Automatisierung.

Wenn einfacher Datenaustausch möglich ist, können auch die Vorteile maschinellen Lernens oder generativer KI intensiver genutzt werden. Wenn also der physische Kreislauf von Produkten geschlossen werden soll, kann die Durchlässigkeit der Daten die Voraussetzung sein, um mit KI einen Vorteil zu schaffen (siehe Abb. 1).

Fazit

Die CE gewinnt politisch, gesellschaftlich und wirtschaftlich immer mehr an Bedeutung. Wenn digitale Technologien wie KI richtig eingesetzt werden, können sie die Transformation zur CE sinnvoll unterstützen. Einerseits haben die Fallbeispiele in diesem Papier gezeigt, dass der Einsatz von KI Potenziale bietet, um Ressourcen effizienter zu nutzen, Abfall zu minimieren und Geschäftsmodelle anzupassen. Andererseits müssen die ökologischen und sozialen Risiken von KI berücksichtigt und gegenüber dem potenziellen Nutzen für die CE abgewogen werden. Insbesondere muss der Energie- und Ressourcenverbrauch von KI-Systemen selbst bilanziert und Rebound-Effekte mitgedacht werden, um sicherzustellen, dass der Einsatz von KI in der Gesamtbilanz Ressourcen schont. Auch der Schutz von Menschen in Datenverarbeitungsprozessen und IT-Sicherheit müssen gewährleistet sein. Hierzu liefern aktuelle nationale und transnationale Gesetzgebungen wie der EU AI Act, die DSGVO, der Digital Services Act im Zusammenspiel mit dem CEAP und der NKWS erste Ansätze.

Politisch wurden bzw. werden unter anderem im Rahmen des European Green Deal und NKWS wichtige Grundlagen für die CE gelegt. Sie setzen regulatorische Rahmenbedingungen und Anreize für die CE und geben Ziele dafür vor. Dabei werden explizit auch Technologien wie der Digitale Produktpass und KI mitgedacht. Damit KI-Systeme sinnvoll zu einer Ressourcenschonung beitragen können, müssen Unternehmen und Politik ihre Anwendung für die CE in eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsstrategie integrieren. Grundlegende Veränderungen der politischen und wirtschaftlichen Rahmenbedingungen sind notwendig, sodass zirkuläre Geschäftsmodelle sich gegenüber linearen Geschäftsmodellen durchsetzen können. „Zirkuläre“ Produkte und Services müssen von der Gesellschaft akzeptiert und genutzt werden, damit die Transformation zur Nachhaltigkeit gelingt – KI kann hierbei als unterstützende Technologie fungieren.

Bevor KI für CE eingesetzt wird, muss klar sein, ob KI tatsächlich die beste Lösung für das spezifische Problem ist. Die Daten, mit denen KI-Systeme trainiert werden, müssen zu der Aufgabenstellung passen, verfügbar und zugänglich sein. Dafür muss der einfache Austausch von Daten zwischen den Akteuren des Wertschöpfungskreislaufes möglich sein. Die Ergebnisse von KI-Systemen müssen kritisch hinterfragt werden, um Fehlinterpretationen zu vermeiden. Dafür ist es notwendig, dass Akteure der CE bei Nutzung von KI über grundlegende KI-Kompetenzen verfügen, um Verzerrungen zu erkennen und fundierte Entscheidungen zu treffen und Fehlinterpretationen zu vermeiden. Ebenso sollten KI-Entwickler*innen die Prinzipien der CE verstehen und entsprechend in ihre KI-Trainings einfließen lassen.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: KI-Einsatzgebiete entlang des Wertschöpfungskreislaufs.....	5
Abbildung 2 Der Wertschöpfungskreislauf: Kreislaufwirtschaft.....	6
Abbildung 3 Hauptmerkmale von KI (Brandolisio et al., 2021).....	8
Abbildung 4 Ansätze der CE in den verschiedenen Abschnitten des Wertschöpfungskreislaufs	11

Über die Autor*innen

Michael Leitl

Michael Leitl begleitet Unternehmen bei der Transformation zur CE und dem Einsatz von Künstlicher Intelligenz. Er ist Executive Director von INDEED Innovation, einem Innovations- und Design-Unternehmen. Schwerpunkte seiner Arbeit sind Strategien für das Schließen von Kreisläufen und die Entwicklung von KI-Konzepten. Dazu analysiert er regelmäßig die zirkulären Ambitionen von Unternehmen und vergleicht sie im von ihm entwickelten Circularity Index. Gemeinsam mit seinen Kollegen beschrieb er im „The AI Toolbook“ ein Framework, um KI-Systeme nachhaltig im Unternehmen zu implementieren.

Jan Quaing

Jan Quaing ist Experte bei der Deutschen Bundesstiftung Umwelt für die Themen KI, Nachhaltigkeit und Digitalisierung. Er ist ausgebildeter KI- und Innovationsmanager und dadurch aktiver Impulsgeber für zukunftsrelevante Themen in Organisationen. Als studierter Ökonom liegt sein wissenschaftliches Interesse besonders auf alternativen Wirtschaftsansätzen wie der CE. Im beruflichen Alltag, als auch in seinen Publikationen beschäftigt er sich viel mit der Frage, wie die Lücke zwischen Wissen und Handeln geschlossen werden kann und somit der ökologische Wandel mithilfe von digitalen Technologien befördert und beschleunigt werden kann. Außerdem entzaubert er als Podcast-Host der KI Mythbusters regelmäßig Mythen rund um das Thema KI.

Birgitt Helms

Birgitt Helms ist seit 2011 Expertin bei der Effizienz Agentur NRW für die Themen Kreislaufwirtschaft, Nachhaltigkeit, Ressourceneffizienz und -schonung auch unter Einsatz von KI, Treibhausgasbilanzierung, sowie Geschäftsmodellentwicklung insbesondere im Sinne einer CE. Seit den frühen 90ern liegt das berufliche Streben der Wirtschaftsingenieurin und Produktionsmanagerin nach umweltschonenden und nachhaltigeren Alternativen in der industriellen Fertigung. Als international tätige Unternehmensberaterin unterstützte sie die Digitalisierung in Unternehmen mit den Schwerpunkten Organisation, Fertigung und Kundenbeziehung.

Kay Langhammer

Kay Langhammer ist Researcher im Fachbereich Kreislaufwirtschaft: Digitale Transformation des Wuppertal Institutes. Zuvor war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Produktionstechnik der Universität Siegen und absolvierte eine Weiterbildung zum Data Scientist. Aktuell arbeitet er unter anderem für das Förderprojekt Green-AI Hub Mittelstand des BMUV, in welchem die Potentiale des Einsatzes von KI für Ressourceneffizienz anhand von Pilotprojekten in mittelständischen Unternehmen aufgezeigt werden.

Johanna Graf

Johanna Graf ist seit März 2022 Referentin für Digitalisierung und Klimaschutz bei der Umwelt- und Entwicklungsorganisation Germanwatch e. V.. Im Rahmen ihrer Tätigkeit setzt sie sich damit auseinander, inwiefern digitale Technologien und Infrastrukturen im Sinne des Klima- und Umweltschutzes gestaltet und eingesetzt werden können. Johannas aktueller Schwerpunkt liegt auf dem Nexus Kreislaufwirtschaft und Digitalisierung. Dabei befasst sie sich u. a. mit dem Digitalen Produktpass. Johanna vertritt Germanwatch e. V. im Trägerkreis des Bündnisses „Bits & Bäume“ und hat einen Studienhintergrund in Politikwissenschaften sowie Friedens- und Konfliktforschung.

David Rohrschneider

David Rohrschneider ist wissenschaftlicher Mitarbeiter und Doktorand an der Hochschule Ruhr West, spezialisiert auf KI und Data Science. Er hat einen Bachelor of Science in Wirtschaftsinformatik und einen Master of Science in Informatik. Seine Forschung konzentriert sich auf Computer Vision, multimodale tiefe neuronale Netzwerke, digitale Produktpässe und Transferlernen, mit wissenschaftlichen Veröffentlichungen im letzteren Bereich. Seine derzeitige Arbeit widmet sich der Weiterentwicklung von KI-Technologien in diesen Bereichen und der Unterstützung lokaler Unternehmen aus unterschiedlichen Sektoren bei der Überführung in eine digitale Kreislaufwirtschaft. Im Projekt „Circular Performer Emscher Lippe“ geht es dabei insbesondere um lösungsorientierte Wissensvermittlung und -erarbeitung rund um den digitalen Produktpass.

Paul Szabó-Müller

Paul Szabó-Müller ist seit Ende 2019 wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut Informatik der Hochschule Ruhr West (HRW) in Bottrop. Paul leitete bis Anfang 2024 unter anderem die Projekte Prosperkolleg und reWIR sowie aktuell das Projekt digital.zirkulär.ruhr. Zuvor war er wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Wirtschaftsgeographie der RWTH Aachen, wo er auch seinen Magisterabschluss gemacht hat. Dort arbeitete er zuletzt als externer Referent am Hauptgutachten „Unsere gemeinsame digitale Zukunft“ des Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderung (WBGU) mit. In diesem hat er sich unter anderem intensiv mit den Themen digitale Kreislaufwirtschaft und Elektroschrott beschäftigt. Sein aktueller Arbeitsschwerpunkt ist die Unterstützung des nachhaltigen Strukturwandels im Ruhrgebiet durch die gezielte Verknüpfung von CE und Digitalisierung (doppelte Transformation / Twin Transition) durch diverse Forschungs-, Qualifizierungs-, Netzwerk- und Transferaktivitäten.

Literaturverzeichnis

- Acatech (2021):** Urban Mining, Acatech Horizonte [online]. Verfügbar unter: <https://www.acatech.de/publikation/acatech-horizonte-urban-mining/> [Zugriff am 22.01.2025].
- Amrhein-Bläse, C. (2020):** Demontage 4.0 – künstliche Intelligenz macht Recycling effizienter [online]. Verfügbar unter: <https://www.wissenhochn.de/de/themen/auswahl-und-uebersicht/einzelansicht/demontage-40-kuenstliche-intelligenz-macht-recycling-effizienter> [Zugriff am 07.10.2024].
- Baker, N.A. & Handmann, U. (2024):** KI-basierte Unterstützung beim automatisierten Elektroschrott-Recycling. In: Büttner, S., Handmann, U. & Irrek, W. (Hrsg.): *Transformation zur Circular Economy. Sustainable Development Goals (SDG) – Umsetzung in Praxis, Lehre und Entscheidungsprozessen*. Springer, Wiesbaden, S.135-148. https://doi.org/10.1007/978-3-658-43338-3_10.
- Böckel, A., Quaing, J., Weißbrod, I. & Böhm, J. (Hrsg.) (2022):** Mythen der Circular Economy [online]. Verfügbar unter: <https://www.mythencirculareconomy.com/> [Zugriff am 22.01.2025].
- Brandolisio, A., Leitl, M. & Golta, K. (2021):** *The AI-Toolbook*. Murmann Publishers.
- Büttner, S. & Hermandi, C. (2022):** Konsum in der Circular Economy. Zur Rolle von Verbraucher:innen und nutzerzentriertem Design. *Prospektiven – Neues zur zirkulären Wertschöpfung 2022/05*. Bottrop: Prosperkolleg e.V. Verfügbar unter: https://prospektkolleg.ruhr/wp-content/uploads/2022/08/prospektiven_2022-05_konsum-und-nutzerzentriertes-design.pdf [Zugriff am 22.01.2025].
- Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (2024):** Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie [online]. Verfügbar unter: <https://www.bmu.de/download/nationale-kreislaufwirtschaftsstrategie-nkws> [Zugriff am 22.01.2025].
- Coretechnologie (2024):** Führende CAD Interoperability Software - CoreTechnologie [online]. Verfügbar unter: <https://coretechnologie.com/> [Zugriff am 22.01.2025].
- Deutsche Bundesstiftung Umwelt (2023):** Ausgezeichnet: Aluminium-Sortieranlage ermöglicht wegweisendes Metallrecycling. *DBU Aktuell 8/2023* [online]. Verfügbar unter: <https://www.dbu.de/newsletter/dbuaktuell-nr-8-2023/aluminium-sortieranlage/> [Zugriff am 22.01.2025].
- Denter, L. (2023):** Wertvoll für die Kreislaufwirtschaft, aber zu gut geschützt. Geistige Eigentumsrechte im Konflikt mit zirkulärem Wirtschaften – Herausforderungen und Lösungsansätze. Germanwatch [online]. Verfügbar unter: <https://www.germanwatch.org/de/node/90354> [Zugriff am 22.01.2025].
- Denter, L. & Heinz, R. (2023):** Güter teilen, Ressourcen schonen? Potenziale und Risiken der digitalen Sharing Economy im Kontext von Kreislaufwirtschaft und Ressourcenreduktion. Germanwatch [online]. Verfügbar unter: <https://www.germanwatch.org/de/87850> [Zugriff am 22.01.2025].
- Detact (2022):** Material-Recycling reduziert CO₂-Fußabdruck. *Pressemitteilung vom 06.07.2022* [online]. Verfügbar unter: <https://www.detact.com/news/gerhardi-kunststofftechnik-optimiert-produktion-mit-manufacturing-execution-system/> [Zugriff am 22.01.2025].
- Duddek, M., Drüen, B. & Freitas Seabra da Rocha, S.H. (2024):** Robotisierte Verfahrenstechnik in der Circular Economy. In: Büttner, S., Handmann, U. & Irrek, W. (Hrsg.): *Transformation zur Circular Economy*. Springer, Wiesbaden, S. 119-134. https://doi.org/10.1007/978-3-658-43338-3_9.
- Europäische Kommission (2024):** Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 establishing a framework for the setting of ecodesign requirements for sustainable products. *Official Journal L*. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=CELEX:32024R1781> [Zugriff am 21.11.2024].

Europäisches Parlament & Europa Rat (2024): Harmonised rules on artificial intelligence and amending Regulations (EC) No 300/2008, (EU) No 167/2013, (EU) No 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1139 and (EU) 2019/2144 and Directives 2014/90/EU, (EU) 2016/797 and (EU) 2020/1828 (Artificial Intelligence Act) [online]. Verfügbar unter: <https://eur-lex.europa.eu/eli/reg/2024/1689> [Zugriff am 29.01.2025].

Europäische Union (2024): Accelerated Metallurgy - the accelerated discovery of alloy formulations using combinatorial principles. *Cordis - Forschungsergebnisse* [online]. Verfügbar unter: <https://cordis.europa.eu/project/id/263206/reporting/de> [Zugriff am 22.01.2025].

Friedrich, R., Ploner, F., Schäfer, C.T., Disselhoff, T., Petkau, A., Hennemann, C., Moecke, J., Wätzig, T., Zimmert, O., Waltersmann, L., Kiemerl, S., Miehe, R. & Sauer, A. (2021): Potenziale der schwachen künstlichen Intelligenz für die betriebliche Ressourceneffizienz. *VDI Zentrum Ressourceneffizienz* [online]. Verfügbar unter: https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/user_upload/1_Themen/h_Publikationen/Studien/VDI-ZRE_Studie_KI-betriebliche-Ressourceneffizienz_Web_bf.pdf [Zugriff am 22.01.2025].

Handmann, U., Freitas Seabra da Rocha, S.H. & Büttner, S. (2024): Circular Digital Economy Lab. In: Büttner, S., Handmann, U. & Irrek, W. (Hrsg.): *Transformation zur Circular Economy*. Springer, Wiesbaden, S. 113-117. https://doi.org/10.1007/978-3-658-43338-3_8.

Hayashi, A.M. (2013): Thriving in a Big Data World. *MIT Sloan Review* [online]. Verfügbar unter: <https://sloanreview.mit.edu/article/thriving-in-a-big-data-world/> [Zugriff am 22.01.2025].

Bolt Technology OÜ (2025): Bolt [online]. Verfügbar unter: <https://bolt.eu/> [Zugriff am 22.01.2025].

Hügler, J. & Lehr, J. (2024): Themenblatt Automatische Anomaliedetektion. *Fraunhofer IPK* [online]. Verfügbar unter: https://www.ipk.fraunhofer.de/content/dam/ipk/IPK_Hauptseite/dokumente/themenblaetter/aut-themenblatt-anomaliedetektion-web.pdf [Zugriff am 07.11.2024].

Indeed Innovation (2022): Circular Screwdriver Case Study: Redefining Small Electronics with Sustainable Design [online]. Verfügbar unter: <https://www.indeed-innovation.com/work/circular-screwdriver/> [Zugriff am 27.11.2024].

Isler, K. (2024): Die Zukunft der Produktentwicklung: Wie Unternehmen KI nutzen, um innovative Lösungen zu schaffen. *Hagel-IT* [online]. Verfügbar unter: <https://www.hagel-it.de/it-insights/die-zukunft-der-produktentwicklung-wie-unternehmen-ki-nutzen-um-innovative-loesungen-zu-schaffen.html> [Zugriff am 25.11.2024].

Kaack, L.H., Donti, P.L., Strubell, E., Kamiya, G., Creutzig, F. & Rolnick, D. (2022): Aligning artificial intelligence with climate change mitigation. *Nature Climate Change* 12, S. 518–527 [online]. <https://doi.org/10.1038/s41558-022-01377-7>.

Li, D., Zhao, Y., Wang, Z., Jung, C. & Zhang, Z. (2024): Large Language Model-Driven Structured Output: A Comprehensive Benchmark and Spatial Data Generation Framework. *ISPRS International Journal of Geo-Information* 13(11), S. 405 [online]. <https://doi.org/10.3390/ijgi13110405>.

Meske, C., Abedin, B., Klier, M., Rabhi, F. (2022): Explainable and responsible artificial intelligence. In: *Electronic Markets*, 32, S. 2103–2106. [online]. <https://doi.org/10.1007/s12525-022-00607-2>

Mollen, A. & Vieth-Ditlmann, K. (2023): Fangt einfach an zu messen: Wie KI sich auf die Umwelt auswirkt. In: *SustAIn, Magazin 3* [online]. Verfügbar unter: <https://sustain.algorithmwatch.org/fangt-einfach-an-zu-messen/> [Zugriff am 22.01.2025].

Neligan, A., Baumgartner, R.J., Geissdoerfer, M. & Schöggel, J.P. (2023): Circular disruption: Digitalisation as a driver of circular economy business models. *Business Strategy and the Environment* 32(3), S. 1175-1188. <https://doi.org/10.1002/bse.3100>.

Oncsak, R. (2024): Wissen, was morgen gekauft wird: Wie OTTO Künstliche Intelligenz zur Absatzprognose einsetzt. *Otto.de* [online]. Verfügbar unter:

<https://www.otto.de/unternehmen/de/technologie/wissen-was-morgen-gekauft-wird-wie-otto-kuenstliche-intelligenz-zur-absatzprognose-einsetzt> [Zugriff am 21.11.2024].

Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E. & Hanemaaijer, A. (2017): Circular economy: Measuring innovation in the product chain. *PBL – Netherlands Environmental Assessment Agency* [online]. Verfügbar unter: <https://www.pbl.nl/sites/default/files/downloads/pbl-2016-circular-economy-measuring-innovation-in-product-chains-2544.pdf> [Zugriff am 22.01.2025].

Prosperkolleg (2024 a): Einführung. Was ist Circular Economy? [online]. Verfügbar unter: <https://www.prosperkolleg.de/wissen-publikationen/einfuehrung> [Zugriff am 22.11.2024].

Prosperkolleg (2024 b): Circular Digital Economy Lab [online]. Verfügbar unter: <https://www.prosperkolleg.de/circular-digital-economy-lab/> [Zugriff am 22.01.2025].

Quaing, J., Fink, J., Bilfinger, J., Vorländer, F. (2023). Doppelte Transformation gestalten – Praxisleitfaden Nachhaltigkeit und Digitalisierung. *Deutsche Bundesstiftung Umwelt. oekom verlag* [online]. Verfügbar: <https://www.oekom.de/buch/doppelte-transformation-gestalten-9783962381295>

Roberts, J., Baker, M. & Andrew, J. (2024): Artificial intelligence and qualitative research: The promise and perils of large language model (LLM) ‘assistance.’ *Critical Perspectives on Accounting* 99, 102722 [online]. <https://doi.org/10.1016/j.cpa.2024.102722>.

Sánchez-García, E., Martínez-Falcó, J., Marco-Lajara, B. & Manresa-Marhuenda, E. (2024): Revolutionizing the circular economy through new technologies: A new era of sustainable progress. *Environmental Technology & Innovation* 33 [online]. Verfügbar unter: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2352186423005059> [Zugriff am 22.01.2025].

Schwahlen, D., Fey, J., Nieß, C., Reimann, M. & Handmann, U. (2017): Increasing economic viability and safety through structural health monitoring of wind turbines. *2017 IEEE Conference on Technologies for Sustainability (SusTech)*, Phoenix, AZ, USA, S. 1–5. <https://doi.org/10.1109/SusTech.2017.8333511>.

Sharma, A. (2016): How Predictive AI Will Change Shopping. *Harvard Business Review* [online]. Verfügbar unter: <https://hbr.org/2016/11/how-predictive-ai-will-change-shopping> [Zugriff am 22.01.2025].

Stefanie Kroth (2024): ZERO WASTE | PATTERN CUTTING | 3D FASHION DESIGN [online]. Verfügbar unter: <https://www.stefaniekroth.de/zerowaste/> [Zugriff am 25.11.2024].

SustAln (2023): Selbstbewertungstool zur Nachhaltigkeit von KI [online]. Verfügbar unter: <https://sustain.algorithmwatch.org/bewertungstool/> [Zugriff am 22.01.2025].

United Nations (2015): Sustainable Development Goals. [online]. Verfügbar unter: <https://sdgs.un.org/goals> [Zugriff am 29.01.2025].

Vinnova (2024): AI for resource-efficient circular fashion [online]. Verfügbar unter: <https://www.vinnova.se/en/p/ai-for-resource-efficient-circular-fashion/> [Zugriff am 22.01.2025].

Wang, P., Zhang, L.-Y., Tzachor, A. & Wei-Qiang, C. (2024): E-waste challenges of generative artificial intelligence. *Nature Computational Science* 4, S. 818–823 [online]. <https://doi.org/10.1038/s43588-024-00712-6>.

Will Henshall (2024): How One CEO Is Using AI to Develop New Plant-Based Foods. *Time* [online]. Verfügbar unter: <https://time.com/collection/next-generation-leaders/6973256/matias-muchnick/> [Zugriff am 22.01.2025].

tink GmbH (2024): „Wir sind immer für Dich da“ [online]. Verfügbar unter: <https://www.tink.de/services/immer-fuer-dich-da> [Zugriff am 22.01.2025].



Yin, Z., Sun, Q., Guo, Q., Wu, J., Qiu, X. & Huang, X. (2023): Do Large Language Models Know What They Don't Know? *Findings of the Association for Computational Linguistics (ACL)*, S. 8653–8665, Toronto, Kanada [online]. <http://dx.doi.org/10.18653/v1/2023.findings-acl.551>.

Abstract

Künstliche Intelligenz (KI) kann die Transformation zu einer Circular Economy (CE) in allen Wertschöpfungsstufen unterstützen. KI kann so dazu beitragen, Ressourcen zu sparen, die Produktlebensdauer zu erhöhen und Stoffkreisläufe möglichst zu schließen. Dies gelingt jedoch nur, wenn Ressourceneinsparungen nicht durch den eigenen Ressourcenverbrauch der KI aufgezehrt und Rebound-Effekte vermieden werden, wie zum Beispiel ein durch neue Angebote auf dem Markt ausgelöster Mehrkonsum.

Das Impulspapier illustriert Anwendungsmöglichkeiten durch praktische Beispiele und liefert Empfehlungen für eine gesellschaftlich, wirtschaftlich und ökologisch verträgliche Anwendung von KI in sieben Kernbereichen der CE.

Alle Publikationen der Reihe Prospektiven finden Sie hier:

<https://prospekterkolleg.ruhr/publikationen/>



ISSN (Print) 2750-4840

ISSN (Online) 2750-4859

1. Auflage, 20.02.2025