



Das Gewicht der Machine Economy

Eine ressourcenpolitische Analyse am Beispiel der Industrie 4.0

Forschungslinie: Systemdesign nachhaltige Digitalisierung

Autor*innen

Rebecca Heinz

Kurz gesagt

Die vorliegende Kurzstudie wertet den bisherigen Forschungsstand über die ressourcenpolitischen Implikationen der *Machine Economy* am Beispiel der Industrie 4.0 (I4.0) aus. I4.0 birgt sowohl Chancen als auch Risiken für den Ressourcenverbrauch. Es werden Empfehlungen gegeben, damit die Implementierung von I4.0 komplementär zu der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft erfolgt.



Diese Studie wurde für CO:DINA als Auftragsarbeit von Germanwatch e.V. erstellt und im Rahmen des Forschungsberichts „Wege in eine ökologische Machine Economy“ im Juni 2022 veröffentlicht.

Zusammenfassung

Herausforderung:

Laut Politik und Unternehmensverbänden wird die Digitalisierung einen entscheidenden Beitrag zur Ressourceneffizienz der Industrie leisten. Unklar ist jedoch, unter welchen Voraussetzungen sie die absolute Reduktion des Ressourcenverbrauchs befähigen kann und welche potentiellen Risiken mit dem Ressourcenverbrauch der digitalen Infrastruktur in Zusammenhang stehen. Um sich dem Ressourcenverbrauch der *Machine Economy* zu nähern, fokussiert die Studie auf Entwicklungen der Industrie 4.0 (I4.0), welche hier als Vorstufe der *Machine Economy* verstanden wird.

Zielsetzung:

Die Studie liefert im Rahmen einer qualitativen Literaturanalyse Antworten auf folgende Fragen: Was ist über den Ressourcenverbrauch der I4.0 bekannt und wo liegen Wissenslücken? Welchen Beitrag kann I4.0 zur Ressourcenreduktion leisten? Was sind aktuelle Treiber von Industrie 4.0 und wo liegen politische Stellschrauben für die Gestaltung von I4.0 zum Ziele der Ressourcenreduktion?

Ergebnisse:

Die unzureichende Datenlage erlaubt nur unbefriedigende Rückschlüsse über die Auswirkungen von I4.0 auf die unterschiedlichen ökologischen Nachhaltigkeitsbelange. Die aktuelle Transition ist unzureichend an den Zielen der Kreislaufwirtschaft und den hierfür dringend notwendigen neuen Geschäftsmodellen ausgerichtet. Dabei bietet die I4.0 hierfür massives Potential.

Handlungsempfehlung:

Um Informationslücken über den Ressourcenverbrauch der digitalen Infrastruktur von I4.0 zu schließen, sollten Forschungsvorhaben initiiert werden – eine wichtige Voraussetzung, um politische Steuerungsinstrumente für eine ressourcenschonende I4.0 zielgerichtet entwickeln und auf den Weg bringen zu können. Damit Investitionen in I4.0 in zukunftsfähige Geschäftsmodelle fließen, sollte die Bundesregierung Maßnahmen und Instrumente zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft schnell auf den Weg bringen (z.B. digitaler Produktpass, Ausweitung der Ökodesign-Richtlinie).

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung	5
2. Der Rohstoffbedarf der Digitalisierung als blinder Fleck der sozial- ökologischen Transformationsforschung	7
3. Das Gewicht der Machine Economy am Beispiel der Industrie 4.0	13
4. Schlussfolgerungen und politische Empfehlungen	23
Literaturverzeichnis	32
Über die Autor*innen	40
Über CO:DINA	41
Impressum	41

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Szenario für Rohstoffbedarfe einzelner digitaler Technologien nach DERA (2021)12

1. Einleitung

Die Digitalisierung ist ein transformativer Prozess, der zu einer tiefgreifenden Umstrukturierung gesellschaftlicher und ökonomischer Verhältnisse führt. Hierbei wird die Digitalisierung auch den maschinellen Dialog durch Technologien und Anwendungen im Bereich Distributed Ledger Technologies (DLT), Internet of things (IoT), Big Data und Künstliche Intelligenz (KI) revolutionieren und damit das Verhältnis von industrieller Produktion und Konsum neu strukturieren, z.B. durch neue Geschäftsmodelle und Konsumweisen. In diesem Kontext setzt sich aktuell auch der Begriff der Machine Economy durch. Hierunter wird ein Wirtschaftssystem verstanden, in der Maschinen wesentliche Prozesse und Funktionen übernehmen sowie nahezu autonom am Marktgeschehen teilnehmen. Digitale Technologien befähigen schon heute Maschinen ihre Umgebung und Umwelt wahrzunehmen, zu verstehen und Entscheidungen zu treffen. Die Machine Economy ist zwar noch weitestgehend eine Zukunftsvision, im Kontext von Industrie 4.0 (I4.0) und den aufstrebenden Technologien KI, IoT, DLT existieren entsprechende Systeme jedoch bereits heute auf der Produktionsebene. I4.0 ist damit eine mögliche Vorstufe einer Machine Economy. Daher wird im weiteren Verlauf die ressourcenpolitische Analyse am Beispiel der I4.0 umgesetzt.

Diskurse und Narrative über die digitale Transformation beinhalten zumeist das Versprechen, dass sich die Digitalisierung positiv auf die ökologische Nachhaltigkeit auswirkt. Hierunter fallen Annahmen über eine tiefgreifende Dematerialisierung und die Reduktion des Ressourceneinsatzes in unterschiedlichen gesellschaftlichen Bedürfnisfeldern. Auch den aktuellen Emissions-Reduktions-Szenarien liegt die Annahme zu Grunde, dass die Digitalisierung durch intelligente Energiesteuerung zu einer Reduktion der globalen Energienachfrage beitragen wird (Grubler et al., 2018; Purr et al., 2019). Digitalisierung gilt daher als zentraler Baustein und Voraussetzung für ein nachhaltiges und treibhausgasneutrales Wirtschaftssystem.

Wissenschaftler:innen aus der Nachhaltigkeitsforschung kritisieren jedoch, dass die Umweltaufwendungen der digitalen Infrastruktur selbst, d.h. Energie- und Rohstoffaufwendungen für Betrieb und Bau sowie nicht-intendierte Rebound-Effekte¹, in aktuellen Bewertungen und politischen Zielsetzungen nur unzu-

¹ Der Rebound-Effekt beschreibt das Phänomen, wenn erwartete Einsparpotentiale durch Effizienzsteigerungen nicht erreicht werden.

reichend Beachtung finden. Insbesondere mit Blick auf die Verbreitung und Anwendung der Kommunikationstechnologien (IKT) befasste man sich in den letzten Jahren sowohl aus wissenschaftlicher wie zivilgesellschaftlicher Sicht vermehrt mit den negativen Umweltauswirkungen der Digitalisierung (Santarius & Lange, 2021). Im Fokus der Debatte standen besonders die Energieaufwendungen digitaler Dienstleistungen (z.B. im Bereich von Streamingdiensten, vgl. Sühlmann-Faul & Rammler, 2018) und die negativen menschenrechtlichen und umweltbezogenen Auswirkungen, die bei der Förderung der Rohstoffe für die digitalen Endgeräte sowie bei der Entsorgung letzterer entstehen (Pilgrim et al. 2017).

Dennoch mangelt es sowohl im wissenschaftlichen wie öffentlichen Diskurs weiterhin an einer Auseinandersetzung mit den Auswirkungen auf Ressourcen und hierbei insbesondere mit der metallischen Rohstoffintensität als Folge der fortschreitenden Digitalisierung. Kapitel zwei bietet daher eine erste Einordnung über den Wissens- und Forschungsstand zur Rohstoffintensität der Digitalisierung im Allgemeinen, bevor sich Kapitel drei den daraus ableitenden und spezifischen Rohstoff- und Ressourcenanforderungen der I4.0 widmet. Dieses Vorgehen ist relevant, da die bisherige Studienlage zu Ressourcen- und Rohstofffragen im Kontext der I4.0 zu unausgereift und undifferenziert ist, um konkrete Rückschlüsse für diesen Teilbereich der Digitalisierung zu zulassen. Kapitel 2 zeigt daher die allgemeinen blinden Flecken der Transformationsforschung im Bereich der Digitalisierung auf, auf denen im weiteren Schritt Forderungen für Forschung und politische Rahmensetzung der I4.0 folgen.

Mit Blick auf die I4.0 spielen Ressourcenfragen in öffentlichen Strategie- und Positionspapieren über I4.0 vor allem mit Blick auf ressourceneffiziente Produktionsweisen und die Verbesserung des Stoffstrommanagements eine Rolle. Es mangelt jedoch, wie die vorliegende Kurzstudie zeigt, an einer Auseinandersetzung mit den Ressourcenaufwendungen, welche a priori für die Bereitstellung und Instandhaltung digitaler Infrastrukturen aufgewandt werden müssen.

Dennoch gilt in industrienahen Berichten und politischen Strategien der positive Umwelteffekt der I4.0 als gesetzt. So spricht die Plattform Industrie 4.0 (eine gemeinsame Initiative der Bundesregierung und Industrieunternehmen) von „einer natürlichen Überschneidung von Effizienz und Ressourcenschonung, die mit Digitalisierung erstmals umfänglich möglich ist“ (Plattform Industrie 4.0, 2021, S. 4).

Die vorliegende Kurzstudie möchte vor diesem Hintergrund eine Einordnung der I4.0 zu folgenden Fragen geben:

- Was ist bekannt über den Ressourcen- und Rohstoffverbrauch der Digitalisierung im Allgemeinen und der I4.0 im konkreten, wo liegen derzeitige Forschungslücken? (Kapitel 2 und 3.1)
- Inwieweit und unter welchen Bedingungen kann I4.0 einen Beitrag zur absoluten Reduktion des primären Ressourcen- und Rohstoffverbrauchs leisten? (Kapitel 3.2)
- Was sind aktuelle Treiber für die Umsetzung von I4.0 und inwieweit spielen ökologische Nachhaltigkeitsaspekte hierbei eine Rolle? (Kapitel 3.3)
- Welche politischen Leitplanken braucht es, damit I4.0 einen effektiven Beitrag zur Ressourcenreduktion leisten kann? (Kapitel 4)

Zur Beantwortung der Fragen wurde eine qualitative Literaturanalyse von wissenschaftlichen Artikeln und grauer Literatur (insbesondere von Industrieinitiativen, also Zusammenschlüssen von Industrieakteur:innen zur Setzung gemeinsamer Standards und Entwicklung politischer Forderungen) durchgeführt. Die Studie ist in vier Kapitel unterteilt. Auf die Einleitung folgt in Kapitel 2 eine allgemeine Einordnung der Digitalisierung vor dem Hintergrund der Transformationsforschung unter besonderer Berücksichtigung des Verbrauchs metallischer Rohstoffe. In Kapitel 3 erfolgt eine differenzierte Auseinandersetzung mit dem umwelt- und ressourcenpolitischen Potentialen und Risiken der I4.0 und ihrer aktuellen Treiber. Kapitel 4 fasst die Kernaussagen zusammen und leitet politische Empfehlungen und Maßnahmen ab.

2. Der Rohstoffbedarf der Digitalisierung als blinder Fleck der sozial-ökologischen Transformationsforschung

2.1. Digitalisierung steigert Bedarf an umweltkritischen Technologiemetallen

Die Digitalisierung ist einer der aktuellen Megatrends für den Verbrauchsanstieg metallischer und mineralischer Rohstoffe. Die digitale Infrastruktur umfasst Endgeräte, Datenübertragungsnetze sowie Datenspeicher- und Verarbeitungszentren (Rechenzentren) (Hilbert & López, 2011). Während der direkte und massenmäßige Anteil digitaler Technologien am Gesamtverbrauch einzelner Metalle – insbesondere bei den Massenmetallen – relativ bescheiden ist (z.B. Kupfer, Platin, Gold), ist die Digitalisierung bereits heute Haupttreiber für den Verbrauch kritischer Technologiemetalle darunter Gallium, Indium, Tantal, Ruthenium und

Germanium (Ferreboeuf et al., 2019). In einem Smartphone beispielsweise sind mindestens vierzig Metalle enthalten, jedes in Mengen von einigen Milligramm bis zu mehreren zehn Gramm. Trotz dieser vergleichsweise geringen mengenmäßigen Konzentrationen bezogen auf die einzelnen Endgeräte, summieren sich die für die gesamte digitale Infrastruktur benötigten Metalle und Mineralien auf eine ökologisch kritische Masse. Denn digitale Geräte sind insbesondere auf Metalle angewiesen, die selten und/oder kritisch sind, da ihre zugänglichen Reserven sowohl unter ökologischen wie ökonomischen Gesichtspunkten begrenzt sind (Dehoust et al., 2020). Die ökologischen Grenzen ihrer Verfügbarkeit hängen auch damit zusammen, dass diese Rohstoffe in besonders niedriger Konzentration in den Erzen gebunden und die Umweltkosten der Förderung daher aufgrund des proportional zur Rohstoffmenge hohen Chemie- und Wassereinsatzes sowie der zu bewegendenden Gesteinsmenge besonders hoch sind (vgl. auch Pilgrim et al., 2017). Die ökologische Kritikalität der Rohstoffe führt auch zu Menschenrechtsverletzungen, u. a. da im Rahmen des Abbaus Wasserressourcen übernutzt oder chemisch stark belastet werden. Zudem ist bei vielen dieser Metalle in den kommenden Jahrzehnten mit Produktionsspitzen zu rechnen, die unterhalb derzeitiger Nachfrageszenarien liegen.

Basierend auf derzeitigen Annahmen zu Technologie- und Marktentwicklungen hat die deutsche Rohstoffagentur (DERA) 2016 und 2021 Szenarien für den Rohstoffbedarf einzelner Zukunftstechnologien veröffentlicht. Der Fokus liegt hierbei insbesondere auf kritischen Rohstoffen, d.h. Rohstoffen, bei denen ein hohes Versorgungsrisiko für Deutschland besteht. Im Vergleich zu 2016 stehen 2021 digitale Technologien verstärkt im Fokus der Studie. Hierbei ist insbesondere für Technologien der I4.0 (Robotik und IoT) auffällig, dass sowohl die Datengrundlage für künftige Rohstoffbedarfe als auch Annahmen zur Technologie- und Marktdurchsetzung im Vergleich zu anderen in der Studie behandelten Zukunftstechnologien wenig ausgereift sind, weswegen Szenarien für künftige Rohstoffbedarfe dieser Technologien nicht erarbeitet werden konnten (ausgenommen additive Druckverfahren, siehe Kapitel 3). Für Technologien im Bereich der Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) konnten Verbrauchsszenarien für einzelne, besonders kritische Rohstoffe ermittelt werden. Tabelle 1 zeigt, dass die geschätzten Rohstoffbedarfe für einzelne digitale Technologien 2040 teils über den derzeitigen weltweiten Produktionskapazitäten liegen könnten. Dies ist insbesondere für Tantal (auch bekannt als Coltan) der Fall, während Indium und Gallium in 2040 bereits nur für die Bereitstellung einzelner Technologiekomponenten einen beträchtlichen Anteil der 2018 global produzierten Rohstoffmenge einnehmen könnten.

2.2. Mangelnde Berücksichtigung der Digitalisierung in Szenarien zur zukünftigen und globalen Entwicklung der Ressourcen- und Rohstoffnutzung

Die DERA (2021) verweist in ihrer Studie darauf, dass die Erarbeitung übergreifender Rohstoffszenarien für 2040 insbesondere durch die fehlende oder unzureichende Integration künftiger Digitalisierungseffekte in den für die Studie verwendeten Basis-Szenarien des IPCC und des *World Energy Outlooks* erschwert wurde (DERA, 2021; Riahi et al., 2017).

Auch die Ende 2019 vom Umweltbundesamt vorgestellte RESCUE-Studie, in der erstmals ein Szenario für die Reduktion des Ressourcenverbrauchs unter Berücksichtigung des 1,5°C-Limits für Deutschland erarbeitet wurde, vernachlässigt die Digitalisierung als Größe in ihren Modellen zum Ressourcen- und Rohstoffverbrauch weitestgehend (außer im Kontext der Energieaufwendungen) (Purr et al., 2019). Auch der *Material Outlook 2060* der OECD (2019) bildet die Materialintensität der Digitalisierung unzureichend ab. Die Digitalisierung wird hier als zentraler Treiber für einen zukünftig wachsenden Dienstleistungssektor bewertet, der im Modell zu einem relativen Bedeutungsverlust der rohstoff- und ressourcenintensiveren Industrie- und Landwirtschaftssektoren und, dieser Logik folgend, so zu einer relativen Abnahme des Ressourcenverbrauchs führt. Ob die Digitalisierung durch die Befähigung der Sharing Economy (Geschäftsmodelle die das Teilen von Gütern ermöglichen) tatsächlich zu einem reduzierten Rohstoffverbrauch einzelner Bedürfnisfelder beitragen kann, wird aktuell jedoch noch kontrovers diskutiert (Acquier et al., 2017; Santarius et al., 2020; Warming-ton-Lundström & Laurenti, 2020; Wruk et al., 2019). Eine zentrale Herausforderung ist hierbei die große Unsicherheit bezüglich des Umfangs und der Art der sich durchsetzenden Technologien (und damit einhergehende Rohstoffzusammensetzungen und Potentiale für Substitutionen) sowie Rückkopplungen mit Energieverbräuchen und dem Verbrauch weiterer Ressourcen, die durch mögliche Rebound-Effekte ausgelöst werden könnten.

Darüber hinaus fokussieren bisherige Studien über die Umweltwirkungen der Digitalisierung zum einen meist auf die Potentiale, die die Digitalisierung für die Energie- und Mobilitätswende mit Blick auf eine smarte Energiesteuerung und dadurch verbesserte Energieeffizienz hat. Die Chancen und Risiken werden hierbei jedoch wissenschaftlich durchaus kontrovers diskutiert (Malmodin & Coromama, 2017). Zum anderen wurden in den letzten Jahren vermehrt Studien über die negativen Umweltfolgen der Informations- und Kommunikationstechnolo-

gien durchgeführt (Pohl & Finkbeiner, 2017). Hierbei stehen zumeist die Auswirkungen des Energieverbrauchs und das damit einhergehende Treibhausgaspotential im Vordergrund, weniger jedoch Schätzungen zum Verbrauch abiotischer Ressourcen und dem damit assoziierten metallischen Rohstoffaufwand (Gensch et al., 2017). Dabei kommt eine jüngst von den EU-Parlamentsabgeordneten Kim van Sparrentak und David Cormand in Auftrag gegebene Studie zu dem Schluss, dass die Rohstoffnutzung von Mineralien und Metallen für die Geräte der IKT die mit Abstand bedeutendste Größe bei den Umweltauswirkungen der IKT einnimmt – weit vor den in der Studie ebenfalls untersuchten Kriterien „Klimawandel“ und „fossile Ressourcennutzung“ (Benqassem et al., 2021). Die Autor:innen der EU-Studie plädieren dafür, dass Fragen der Rohstoffinanspruchnahme im speziellen und Umweltauswirkungen der Digitalisierung und digitaler Dienstleistungen im Allgemeinen besser im Rahmen von Lebenszyklusanalysen erfasst werden sollten, um eine differenzierte Aussage über das tatsächliche Nachhaltigkeitspotential der Digitalisierung treffen und den politischen Rahmen dahingehend anpassen zu können. Auch Castorani et al. (2018) haben im Rahmen einer Lebenszyklusanalyse von Dunstabzugshauben dargelegt, dass der Nachhaltigkeitseffekt durch die digitalisierte Nutzungssteuerung von Gebrauchsgegenständen im Rahmen des IoT zu unterschiedlichen Umwelteffekten je nach untersuchter Umweltkategorie führt. Während der gesamte Energieverbrauch durch die digitale Schnittstelle verbessert werden konnte, stiegen der Metallverbrauch und Parameter der humanen Toxizität in der Produktion an.

Eine Digitalisierung, die sich nicht an Nachhaltigkeitskriterien orientiert, könnte sich aufgrund der Begrenztheit einzelner Rohstoffe langfristig selbst im Wege stehen oder aber einen Rohstoffabbau befeuern, der besonders negative Auswirkungen auf den Schutz von Menschenrechten und die Biodiversität hätte. Von besonderer Bedeutung ist dabei auch, dass ein unregulierter Rohstoffhunger der Digitalisierung gravierende Folgen für die dringend nötige Energie- und Mobilitätswende haben könnte. Denn auch der Wandel weg von einem fossilen hinzu einem erneuerbaren Energie- und Mobilitätssystem geht mit einem starken Verbrauchsanstieg metallischer und mineralischer Rohstoffe einher (IPIS 2021). So könnte die Digitalisierung ohne einen geeigneten politischen Steuerungsrahmen mit der Energie- und Mobilitätswende in Konkurrenz um wertvolle Rohstoffe treten (Ferreboeuf & et al., 2019) oder aber der ausgelöste Verbrauchsanstieg zu einer massiven Ausbreitung von Bergbauprojekten in sensible Ökosysteme führen (Sonter et al., 2020). Ein weiteres Risiko stellt zudem ein möglicher steigender Energieverbrauch durch die Digitalisierung selbst dar, wie er derzeit im Bereich der IKT zu beobachten ist. Hieraus folgen sich gegenseitig

verstärkende Wechselwirkungen zwischen dem Energie- und Digitalisierungssektor (steigende Anzahl digitaler Infrastruktur und Energieanlagen führt zu höherer Rohstoffnutzung), der den Druck auf die primäre Rohstoffförderung weiter verstärkt.

2.3. Unzureichende Recycling-Strategien für Technologiemetalle

Die fortschreitende Digitalisierung setzt auch den Miniaturisierungstrend von Elektronikkomponenten fort, d.h., dass diese bei gleichbleibender oder höherer Leistung kleiner und hierdurch rohstoffeffizienter werden. Dies wiederum hat nachteilige Effekte für das Rohstoffrecycling, da die Miniaturisierung die Zerlegung von Geräten in ihre einzelnen Bestandteile und Rohstoffe erschwert und hierdurch die Energieaufwendung in Relation zur Menge recycelter Rohstoffe überproportional steigt (Behrendt, 2018). Dabei haben von den 60 Metallen, die derzeit in digitalen Geräten eingesetzt werden, 34 Rohstoffe eine Rückgewinnungsquote von unter einem Prozent – hierunter auch die kritischen Rohstoffe Indium, Gallium, Lithium, Germanium und Tantal, die Seltenen Erden Scandium, Dysprosium/Terbium und Neodym/Praseodym und die gesamte Gruppe der Lanthanoide (EU-Recycling, 2016). Eine zentrale Herausforderung stellt hierbei aktuell die fehlende Wirtschaftlichkeit des Recyclingprozesses dar, welche Investitionen in und den Ausbau von Rückgewinnungsanlagen derzeit behindert. Das Umweltbundesamt rät dazu, dass staatliche Recyclingstrategien stärker die vermiedenen ökologischen Kosten der primären Rohstoffförderung sowie prospektive Versorgungssicherheit in den Fokus rücken und durch entsprechende Politikinstrumente flankieren sollten (Sander et al., 2017).

Denn heimische Rohstofflager in Form von Elektroschrottbergen bieten hierfür bereits heute ein gutes Potential. Aktuell fallen in Europa jährlich 12 Millionen Tonnen Elektroschrott an, Tendenz steigend (Adrian et al., 2020). Diese steigenden Schrottmengen haben in Deutschland jüngst dazu beigetragen, dass die anteilige Sammelrate von Elektro- und Elektronikgeräten für das Recycling zuletzt wieder von 45% auf 43% sank (Umweltbundesamt, 2020). Dies bedeutet, dass aktuell 57% aller Elektro- und Elektronikgeräte erst gar nicht vom Recycling erfasst werden. Hierbei ist zu beachten, dass die in der WEEE-Richtlinie definierte Sammelquote den für die Industrie 4.0 relevanten Bereich des Maschinen- und Anlagenbaus (ortsfest installierte industrielle Großwerkzeuge und Großanlagen, bewegliche Maschinen) sowie elektronische Fahrzeuge ausklammert – d.h. die tatsächliche Menge und Recyclingrate metallintensiver digitaler Geräte und Infrastrukturen lässt sich hieraus nicht ableiten, da die Sammelraten den Industrie-

und Automobilssektor nicht erfassen – und damit auch nicht die Wiederverwertungspotentiale der I4.0 berücksichtigt werden.

Technologie/ Hardware	Rohstoff	Weltweite Produktion in 2018 in t	Bedarf 2018 für Technologie in t	Bedarf 2040 für Technologie in t
LCD/OLED-Displays	Indium	808	185	214-297
Mikroelektronische Kondensatoren	Tantal	1.832	740	1.716-2.013
Optoelektronische Bauelemente im Telekommunikationsbereich	Gallium	413	1	2
	Arsen	32.783	1	2
	Indium	808	5	35
RadiofrequenzMikrochips	Gallium	413	38	60-90
	Lithium	95.170	8	15-22
	Niob	68.200	5	22-18
	Tantal	1.832	194	356-531

Tabelle 1: Szenario für Rohstoffbedarfe einzelner digitaler Technologien nach DERA (2021)

Auf den Punkt:

- Die Digitalisierung ist insbesondere bei Industriemetallen der zentrale Treiber für eine steigende Nachfrage. Zugleich fehlt – trotz existenter Verfahren – eine geeignete Recyclinginfrastruktur für diese kritischen Metalle. Der mit dem IoT weiter einhergehende Miniaturisierungstrend von Elektronik wird das Recycling dabei zusätzlich erschweren.
- Trotz der wachsenden Rohstoffnachfrage durch die digitalen Technologien, ist die Rohstoffinanspruchnahme der Digitalisierung ein blinder Fleck in aktuellen wissenschaftlichen Szenarien bezüglich der globalen

Ressourcenentnahme und dem Klimawandel. Dabei läuft eine unregulierte Digitalisierung Gefahr, mit der Energie- und Mobilitätswende in Konkurrenz um wertvolle metallische und mineralische Rohstoffe zu treten.

- Aktuelle Studien über die Umweltauswirkungen der Digitalisierung fokussieren sich insbesondere auf IKT Anwendungen und deren Energieverbrauch. Erste Studienergebnisse legen jedoch nahe, dass die größten Umweltauswirkungen mit dem Rohstoffeinsatz in der digitalen Infrastruktur in Zusammenhang stehen. Die Auswirkungen des Rohstoffverbrauchs auf die Nachhaltigkeit derzeitiger Digitalisierungstrends ist daher ein blinder Fleck. Dies gilt insbesondere für die Betrachtung und ökologische Bewertung einzelner digitaler Entwicklungstrends, wie der I4.0, wie im nächsten Kapitel dargelegt.

3. Das Gewicht der Machine Economy am Beispiel der Industrie 4.0

3.1. Mangelnde Transparenz über Ressourcenverbrauch und Umweltwirkung von I4.0 Anwendungen

Unzureichende Integration von ökologischen Nachhaltigkeitsaspekten in die Bewertung von I4.0 Anwendungen

Der Begriff Industrie 4.0 (I4.0) wurde erstmalig 2011 in einer deutschen Regierungsinitiative erwähnt und hat sich seither international durchgesetzt. Unter I4.0 wird die Vernetzung des Produktionsprozesses verstanden, sowohl entlang des Lieferkettennetzwerkes als auch entlang der internen Betriebs- und Produktionsstrukturen. Die I4.0 umfasst das Zusammenspiel einer Reihe von Technologien, darunter IoT, cyber-physische Systeme (CPS)², KI, DLT, Big Data, Cloud-Computing und additive Fertigung (3-D-Druckverfahren).

Auch wenn Nachhaltigkeitsaspekte in Industrie-Debatten und wissenschaftlichen Diskursen um Industrie 4.0 eine immer wichtigere Rolle spielen (Plattform Industrie 4.0, 2020a), hat eine für diese Kurzstudie durchgeführte Literaturrecherche ergeben, dass kaum holistische Nachhaltigkeitsbewertungen für die

² Cyber-physische Systeme sind über eine Dateninfrastruktur vernetzte softwaretechnische Komponenten mit mechanischen und elektronischen Teilen.

Anwendungen und Auswirkungen der Technologien der Industrie 4.0 vorliegen (Bai et al., 2020; Beier et al., 2017; Bonilla et al., 2018; Chen et al., 2020; Esposito, 2018; Feroz et al., 2021; Gebler et al., 2014; Khan et al., 2021a; Raihanian Mashhadi & Behdad, 2018; Stock et al., 2018). So wurden keine aussagekräftigen Studien oder Publikationen gefunden, die Aufschluss über aktuelle oder zu erwartende metallische und mineralische Rohstoffbedarfe rund um die Infrastruktur der Industrie 4.0 und den damit einhergehenden Umweltauswirkungen zulassen. Fokus der ausgewerteten Studien liegt vielmehr auf der Analyse einzelner Umweltparameter des Produktionsprozesses, insbesondere im Bereich der Ressourcen- und Energieeffizienz. So finden in den analysierten Studien Nachhaltigkeitsbewertungen meist auf Fabrikebene statt, konzentrieren sich entweder auf den Fluss der In- und Output-Ressourcen im Produktionsprozess, rücken einzelne Ressourcen oder Umweltparameter in den Vordergrund oder fokussieren auf einzelne Technologien der I4.0 (Chen et al., 2020; Gebler et al., 2014; Junge & Straube, 2020).

Das Potential von I4.0 im Nachhaltigkeitskontext wird in der grauen Literatur insbesondere im besseren Energiemanagement und folglich im Potential zur Reduktion von Treibhausgasemissionen sowie in der Ressourceneffizienz verortet (Plattform Industrie 4.0, 2020a). Fritzsche et al. (2018) hingegen kommen in einer Analyse zum Schluss, dass eine Validierung entsprechender Annahmen um Energieeinsparpotentiale der Industrie 4.0 derzeit nicht möglich ist, da Analysen fehlen, die ein umfassenderes Bild der potentiellen Energieeinsparungen, einschließlich möglicher negativer Auswirkungen und Rückkopplungen, vermitteln. Bai et al. (2020) haben in einem Review Nachhaltigkeitsbewertungen für die jeweiligen Kerntechnologien der I4.0 zusammengetragen und plädieren für eine differenzierte Bewertung der jeweiligen Technologien mit Blick auf ihre Nachhaltigkeitsbelange und Potentiale. In ihrer Analyse wird deutlich, dass das Potential von I4.0 für die ökologische Nachhaltigkeit nicht nur von der angewandten Technologie, sondern auch von dem wirtschaftlichen Sektor abhängt, in welchem die Technologie eingesetzt wird. So erzielen IoT-Lösungen im Lebensmittel und Landwirtschaftssektor hohe Nachhaltigkeitswerte, während in der Automobil- und Elektronikindustrie kobotische Systeme (autonome Industrieroboter) die höchste Wirksamkeit für ökologische Nachhaltigkeit entfalten.

Die Analyse von Bai et al. (2020) fußt auf den Daten des 2018 veröffentlichten White Paper des World Economic Forums über das Nachhaltigkeitspotential der Industrie 4.0 (Esposito, 2018). Die Daten und Ergebnisse der Studie basieren auf

einer Expert:innen Befragung und sind daher qualitativer, nicht jedoch quantitativer Art. Dieses Vorgehen ließ sich auch in einer Vielzahl der für diese Kurzstudie analysierten Studien wiederfinden, denn oftmals basiert die Bewertung von Nachhaltigkeitsbelangen digitaler Transformationsprozesse in der Industrie auf einer qualitativen Befragung von Industrieakteur:innen. D.h. die Bewertungen über den Einfluss von I4.0 auf Umweltparameter und Ressourceneinsparungen in der Produktion gehen nicht selten auf die Selbsteinschätzung von Unternehmen zurück, die entsprechende Technologien anwenden. Begründet wird dieses Vorgehen mit einer mangelnden quantitativen Datenbasis (vgl. Beier et al., 2017; Junge & Straube, 2020; Kayikci, 2018; Stock et al., 2018). Diesem Problem sah sich auch das Zentrum für Ressourceneffizienz des Vereins für Ingenieure (VDI) in einer Studie über das Ressourceneinsparungspotential durch I4.0-Anwendungen für Deutschland ausgesetzt. Eine aggregierte Bewertung war nicht möglich, da Angaben über Ressourcen- und Energieeinsparungen in den untersuchten Unternehmen nur als Schätzwerte vorlagen. So konnte kein Unternehmen genaue Angaben zum jährlichen Strombedarf einzelner Maschinen und/oder Produktionslinien sowie Transportdistanzen machen. Hinsichtlich der Schätzung von Ressourcen- und Rohstoffaufwendungen für die digitale Infrastruktur hatten die Betriebe kaum Informationen über die verwendeten Hardware-Komponenten zur Verfügung, so konnten z. B. keine Angaben zu Art und Menge der für eine spezifische Praxisanwendung verwendeten/verbauten Sensoren gemacht werden (VDI, 2017). Durch I4.0 wird die Optimierung der eigenen Fabrik im Rahmen der Datenanalyse und -auswertung oftmals an Business-to-Business-Plattformen, also externe Dienstleister ausgelagert. Den untersuchten Studien zur Bewertung der betrieblichen Ressourceneffizienz konnte nicht entnommen werden, inwieweit diese durch I4.0 ausgelagerten Energieaufwendung in die Umweltbilanzierungen eingeflossen sind. Durch I4.0 verschwimmen die physischen Grenzen einer Fabrik, dies erschwert es auch Ressourcenverbräuche klar zu zuordnen.

Im Rahmen dieser Auswertung wurden nur wenige Studien gefunden, die die Umweltauswirkungen von I4.0-Technologien unter Durchführung von Lebenszyklusanalysen bewerteten. Die Lebenszyklusanalyse ist ein systematischer und methodischer Ansatz zur Erfassung der potentiellen Umweltwirkungen und der Energiebilanzen, die entlang des gesamten Lebenszyklus eines Produktes oder einer technologischen Anwendung, einschließlich der Produktionsphase, anfallen und hierbei auch Ressourcenverbräuche explizit erfassen. Chen et al. (2020) haben die bisherige Studienlage zur ökologischen Nachhaltigkeit der digitalen Transformation der Industrie im Rahmen eines Lebenszyklusmodells analysiert

und ausgewertet. Die Autor:innen unterteilten die verfügbaren Umweltbewertungen für digitale Technologien in Produktlebenszyklus (Umwelteffekte der unter I4.0 produzierten Produkte) und Technologielebenszyklus (Umwelteffekte der Hardware und digitalen Infrastruktur). Sie kommen zu dem Schluss, dass während der Einsatz von I4.0 zumeist eine positive Umweltbilanz auf den Produktlebenszyklus entfaltet, die Umwelteffekte des Technologielebenszyklus negativ zu bewerten sind. Stock et al. (2018) identifizierten im Rahmen einer qualitativen Studie, z.B. dass potentielle negative Umweltauswirkungen insbesondere aus dem massiven Material- und Energieverbrauch resultieren, die für die Bereitstellung und den Betrieb der digitalen Infrastruktur in der I4.0 anfällt. Vor allem Ausstattung von Maschinen und Anlagen mit zusätzlicher IKT, insbesondere Sensoren, trägt zu einem massiven Verbrauch metallischer Rohstoffe bei (hierbei verweisen die Autor:innen auf die bereits im vorangegangenen Kapitel vorgestellte DERA-Studie von 2016).

3.2. Implementierung von Industrie 4.0 im Kontext umweltpolitischer Ziele

Umweltwirkung der I4.0 hängt vom Anwendungsfall und ihren Spill-Over-Effekten ab

Oláh et al. (2020) schlussfolgern in einem Review über den Beitrag der I4.0 zur Erfüllung der nachhaltigen Entwicklungsziele (SDGs), dass eine Lücke zwischen der aktuellen und gewünschten Situation besteht, da die Implementierung von I4.0-Technologien nicht ausreichend an Nachhaltigkeitskriterien ausgerichtet sei. Insbesondere die ökologischen Auswirkungen der I4.0 seien unter aktuellen Geschäftspraktiken negativ zu bewerten (Oláh et al., 2020). Auch Bonilla et al. (2018) empfehlen in einer szenariobasierten Analyse, die Umsetzung von I4.0 und der sich hieraus ergebenden Geschäftsmodelle stärker an den SDGs auszurichten und einen dahingehend geeigneten politischen Rahmen zu setzen, da die derzeitigen Anwendungsfälle von I4.0 sowohl das Potential für positive wie negative Umweltauswirkungen besitzen.

Ob die Anwendung von I4.0-Technologien eine positive Umweltauswirkung auf den Produktlebenszyklus hat, ist jedoch sehr stark davon abhängig, wie die dahinterliegenden Geschäftsmodelle ausgestaltet sind. So können IoT-Anwendungen das Ökodesign von z.B. Elektronikgeräten verbessern und zu einem effizienteren Ressourceneinsatz im Produktlebenszyklus beitragen (vgl. z.B. Zhang et al., 2019). Hingegen trägt die Individualisierung von Produktdesign und

Vermarktungsstrategien durch das technologische Zusammenspiel von u. a. IoT, Big Data und additiven Druckverfahren zu einem erhöhten Transportaufwand zwischen Lieferant:innen und Kund:innen bei, da für die Beschaffung kleinerer Chargen und personalisierter Module häufigere Transporte anfallen und auch die „just-in-time“-Lieferungen an Kund:innen mit einem höheren Transportaufwand verbunden sind (Zhang et al., 2019). Insbesondere additive Druckverfahren eröffnen dabei Möglichkeiten für hochgradig individuelles Produktdesign, belasten aber mehreren Studien zufolge deutlich die Umwelt, da diese Druckverfahren besonders energieintensiv sind (Annibaldi & Rotilio, 2019; Bonilla et al., 2018; Ford & Despeisse, 2016; Oláh et al., 2020). Auch Druckfehler, die bei 3-D-Druckern derzeit noch häufig auftreten, können sich ungünstig auf den Material- und Energieverbrauch auswirken (Annibaldi & Rotilio, 2019). Nicht nur der Energieverbrauch ist bei additiven Fertigungsprozessen verglichen mit konventionellen Methoden deutlich höher, auch die kumulierte Rohstoffanspruchnahme ist laut einer Vergleichsstudie des Zentrums für Ressourceneffizienz des VDI deutlich höher (Bierdel et al., 2019).

Zugleich könnte der Einsatz von 3D-Druckern global einen wertvollen Beitrag zur Reduktion der absoluten Energienachfrage leisten, wenn sie für die lokale und bedarfsgerechte Produktion von Modulen, Halbleitern und/oder Ersatzteilen eingesetzt werden. Nach Einschätzungen von Verhoef et al. (2018) könnten sich 5-27% der globalen Energienachfrage bis 2050 senken lassen, wenn durch lokale, bedarfsgerechte Produktionsweise und die Förderung des Remanufacturing und der Reparatur die Energieintensität der Transport- und Produktionssektoren gesenkt werden würde. Das Szenario verdeutlicht, dass eine Umweltbewertung von I4.0 auch im Kontext ihrer Spill-Over Effekte auf Ressourcen- und Energieeinsparpotentiale in anderen Sektoren erfolgen und sich nicht nur auf die Fabrik- und Produktebene beschränken sollte.

Potentiale von I4.0 für die Kreislaufwirtschaft ungenutzt

Politische Maßnahmen zur Rahmensetzung einer nachhaltigen I4.0 sollten daher andere Sektoren wirksam adressieren. Youssef (2020) hat in einer qualitativen Analyse vier Bedingungen identifiziert, die Industrie 4.0 erfüllen muss, um einen Beitrag zur klimaneutralen Industrie zu leisten. Demnach muss sie 1) nicht nur an Zielen der Energieeffizienz ausgerichtet sein, sondern wesentliche Energiegewinne erzielen, 2) die Kreislaufwirtschaft durch Maßnahmen zur Schließung von Stoffströmen befähigen, um die Ressourcennutzung zu verbessern, 3) Öko-In-

novationen für eine nachhaltige Entwicklung begünstigen und 4) ein bedeutender Technologietransfer in die am wenigsten entwickelten Länder gewährleistet werden. Insbesondere die hier identifizierten Bedingungen 1-3 machen deutlich, dass Regulierungsmaßnahmen für eine nachhaltige I4.0 besonders in den Bereichen Energie, Kreislaufwirtschaft und Innovation eine hohe Wirkung entfalten können.

Aus ressourcenpolitischer Sicht ist der Wandel hin zu einer Kreislaufwirtschaft mit geschlossenen Stoffkreisläufen und einem gesenkten Verbrauch primärer Rohstoffe von besonderer Relevanz. Die Kreislaufwirtschaft verfolgt u. a. die Prinzipien Reduce, Reuse, Remanufacture and Recycle (Reduzieren, Wiederverwenden, Wiederaufbereiten und Wiederverwerten). Entsprechende Strategien sind beispielsweise verlängerte Nutzungszeiten von Produkten, deren Instandhaltung durch Reparatur, Nutzungskonzepte mit verstärkter Nutzungsintensität, bspw. über Sharing-Ansätze, sowie die Verwendung wiederverwendbarer und recyclingfähiger Materialien. Übergeordnetes Ziel ist es, den Verbrauch von primären Rohstoffen und Energie auf ein Minimum zu reduzieren.

Leider befassen sich aktuell nur wenige Studien mit dem Zusammenspiel und den Wechselwirkungen der Umsetzung von I4.0 und Kreislaufwirtschaft, obwohl Industrie 4.0 eine zentrale Rolle in der Umsetzung aktueller Kreislaufwirtschaftsmodelle spielt (Sahu et al., 2021). Auch Piscitelli et al. (2020) kamen in einem Review zu dem Schluss, dass sich das Forschungsthema noch in einem frühen Stadium der Aufmerksamkeit befindet. Tatsächlich ist die Anzahl der gefundenen Studien immer noch begrenzt und deutet darauf hin, dass das Potential der und die notwendigen Rahmenbedingungen für die Umsetzung der I4.0 zur Verwirklichung der Kreislaufwirtschaft noch nicht ausreichend erfasst wurden. Dabei diskutiert ein Großteil der I4.0-Studien im Kontext der Kreislaufwirtschaft vor allem die Frage, wie sich zirkuläre Ansätze auf Fabrikebene umsetzen lassen, um den Ressourcenbedarf zu reduzieren und Abfälle zu vermeiden (ebd.). Seltener hingegen wird der Frage nachgegangen, inwieweit I4.0 gezielt zur Implementierung zirkulärer Geschäftsmodelle genutzt werden könnte (Khan et al., 2021b). Auch ein systematisches Review von Furstenau et al. (2020) stützt diese Einschätzung. In Rahmen einer bibliometrischen Datenanalyse der zwischen 2010 und 2019 in englischer Sprache veröffentlichten wissenschaftlichen Artikel zum Thema Nachhaltigkeit und I4.0, fanden die Autor:innen heraus, dass der zentrale Fokus der veröffentlichten Studien auf Datenflussanalysen zum verbesserten betrieblichen Energie- und Ressourcenmanagement lag. Ein Randthema hingegen

stellen Fragen zur Verankerung von Kreislaufwirtschaftsmaßnahmen und Lebenszyklusanalysen zur holistischen Optimierung der Ressourcenaufwendungen entlang des gesamten Produktlebenszyklus inklusive der Produktionsphase dar.

Zugleich wird den Technologien der I4.0 ein großes Potential zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft beigemessen. Yang et al. (2018) beispielsweise sehen hierin große Chancen für den Wiederaufbereitungssektor (Remanufacturing), da die digitale Informationsübertragung entlang der gesamten Wertschöpfungskette, additive Druckverfahren und die cyber-physische Intelligenz die wichtigsten Herausforderungen des Sektors wirksam adressieren könnten und daher großes Potential für die Kostenreduktion von Produkten und Dienstleistungen in diesem Kontext hat. Zugleich gibt es derzeit kaum praktische Anwendungsfälle von I4.0 Technologien im Wiederverwendungssektor und auch ist derzeit unklar, ob additive Druckverfahren wirklich kosteneffizient für die Wiederaufbereitung von Maschinenteilen eingesetzt werden können (Kerin & Pham, 2019).

3.3. Treiber für I4.0 Umsetzung: Ökologische Nachhaltigkeitsbelange und Kreislaufwirtschaftsprinzipien kaum von Bedeutung

Ökologische Nachhaltigkeit ist für Unternehmen derzeit ein unzureichendes Motiv bei der Implementierung von I4.0 Technologien. Feroz et al. (2021) berichten, dass die digitale Transformation ein wichtiges Diskussionsthema auf der obersten Führungsebene ist, während ökologische Nachhaltigkeitsziele und -praktiken nur unzureichend in strategische Entscheidungsprozesse einfließen. Unternehmen neigen eher dazu, I4.0 als Mittel zur Verbesserung des Produktionsprozesses, anstelle eines Hebels zur Transformation des eigenen Geschäftsmodells in Richtung ökologische Nachhaltigkeit zu verstehen (ebd.). Ghobakhloo (2020) identifizierte die ökonomische Nachhaltigkeitsdimension als relevantesten Treiber für die Integration von I4.0 Technologien.

Stentoft et al. (2020) verweisen darauf, dass die wissenschaftliche Studienlage über die Treiber der I4.0 unzureichend ist und entsprechende Erkenntnisse bisher vor allem unsystematisch in der grauen Literatur aufbereitet wurden. In ihrem Review greifen sie daher auf Studien über die Treiber für die Implementierung von IKT in Unternehmen zurück. Dabei wurden keine ökologischen Nachhaltigkeitsbelange als Treiber identifiziert. Die Plattform Industrie 4.0 hat 2020 insgesamt 60 Unternehmensbeispiele der I4.0 auf ihre Nachhaltigkeitschwerpunkte hin ausgewertet. Der Großteil der eingegangenen Beispiele setzt I4.0 Technologien zur ressourcen- und energieeffizienten Produktion (28) ein

sowie im Rahmen der Nutzung smarter Produktionsverfahren und Datenauswertung (29, Mehrfachnennungen möglich). Ein deutlich geringerer Anteil nutzt I4.0 für die Umsetzung innovativer Geschäftsmodelle im Bereich Sharing Economy (4) oder zur Anpassung des Produktdesigns (10) nach ökologischen Kriterien (Plattform Industrie 4.0, 2020b). Diese (nicht repräsentative) Umfrage spiegelt auch den im Rahmen der hier ausgewerteten Literatur gewonnen Eindruck wieder, dass I4.0-Technologien vor allem vor dem Hintergrund von Effizienzgewinnen und Produktivitätssteigerungen eingesetzt werden. Hierbei sind zwar potentiell auch positive Umweltauswirkungen möglich, dafür müsste sich der Effizienzgewinn jedoch in eine absolute Reduktion des Ressourcen- und Rohstoffbedarfs übersetzen, was nach aktuellem Forschungsstand für I4.0 unzureichend validiert ist. Weniger relevant scheint für die derzeitige I4.0-Umsetzung bislang die Erschließung neuer Geschäftsmodelle zu sein.

Im Folgenden sind exemplarisch drei derzeitige wie mögliche zukünftige Treiber für die Implementierung von I4.0 aufgelistet, die im Rahmen der durchgeführten Literaturanalyse und in der Auswertung von Positionspapieren und Untersuchungen von Industrieakteur:innen identifiziert wurden. Hierbei wurden im Bereich der Erschließung neuer Geschäftsmodelle auch Umsetzungsbeispiele aufgenommen, die potentielle künftige Geschäftsmodelle darstellen und aktuell von Industrie und Forschungsinstituten noch erprobt werden.

Effizienzgewinne und Produktivitätssteigerung als aktuelle Treiber für die Implementierung von I4.0 in Unternehmen:

- Effizienterer Ressourceneinsatz: Kostenreduktion und Effizienzsteigerung waren 2015 einer Umfrage des BDI unter den Manager:innen deutscher Unternehmen folgend der größte Treiber für die Digitalisierung eines Unternehmens (Bloching et al., 2015). Auch für serbische Industrieunternehmen identifizierten Herceg et al. 2020 Effizienzgewinne, die zu Kostenvorteilen für Unternehmen führen, als größten Treiber zur Implementierung von I4.0.
- Beschleunigte Innovationszyklen: Produktions- und Innovationszyklen können durch I4.0-Anwendungen beschleunigt werden, da sie eine schnellere und effizientere Kommunikation zwischen den an der Herstellung und Produktion beteiligten Akteur:innen (Ingenieur:innen, Planer:innen) und eine beschleunigte Anpassung von Produktionsverfahren

ermöglicht. Damit können die Produktionskosten durch verkürzte Entwicklungszeiten gesenkt werden und immer schneller „Innovationen“ auf den Markt gebracht werden (Milošević et al. 2020).

- Optimierung der Produktentwicklung über industrielle IoT-Plattformen: Die Vernetzung von Konsumgegenständen mit dem IoT ermöglicht es Herstellern, über industrie-eigene IoT-Plattformen entlang des gesamten Lebensweges Informationen über die Nutzung des Produkts zu erhalten, um so neue Hinweise für Produktverbesserungen zu erhalten (Plattform Industrie 4.0, 2019).
- Reduzierte Kosten für Maschinenwartung: Die Vernetzung von Maschinen über das IoT sowie die Datensammlung und -auswertung über Big Data ermöglicht eine genauere Einschätzung über Wartungsbedarfe von Industriemaschinen und Anlagen. Hieraus lässt sich der beste Zeitpunkt für eine gezielte Wartung ermitteln. Wartungs- und weitere Kosten (z.B. aufgrund von Produktionsausfällen) können hierdurch verhindert werden.

Versorgungs- und Planungssicherheit als Anreiz für künftige Implementierung:

Durch additive Fertigungsverfahren könnten wichtige Halbleiterkomponenten zukünftig lokal selber hergestellt werden. Hierdurch würde sich die Lieferkette verkürzen und die Versorgungssicherheit erhöhen.

Potentiale von I4.0 für die Erschließung neuer Geschäftsmodelle und dadurch mögliche zukünftige Treiber:

- Individualisierte Produkte aus serieller Massenfertigung: Technologien der I4.0 ermöglichen eine an den Bedürfnissen und Wünschen der Kund:innen individuell ausgerichteten Produktionsprozess, an dessen Ende ein individualisiertes Produkt steht. Durch die Datensammlung und Auswertung (Big Data) können auf die Interessen der Endkonsument:innen abgestimmte Produkte entwickelt, durch die Vernetzung und Rückkopplung in Social Media können Produkte zielgruppenspezifisch beworben und Optionen zur Individualisierung des Produktes angeboten werden (Li & Yang, 2021; Setia et al., 2013).). Additive Druckverfahren werden zudem künftig in der Lage sein, die Produktion individueller Konsumgüter im Massenfertigungsverfahren zu ermöglichen. Das Fraunhofer Institut forscht hierzu an entsprechenden Laser- und 3-D-

Druckverfahren zur Differenzierung und Effizienzsteigerung der Produktion individualisierter Produkte in der seriellen Massenfertigung des Fahrzeugbaus (Fraunhofer Institut, n.d.).

- Product as a Service: Mit dem Geschäftsmodell „Product as a Service“ werden Hersteller:innen zu Dienstleister:innen. Ein Produkt wird nicht mehr besessen, sondern die damit verbundene Dienstleistung verkauft (Beispiel Waschmaschine, Dienstleistung Waschen). Der/Die Hersteller:in bleibt Eigentümer:in und kommt für Reparatur und Wartung auf. Durch das IoT ermittelt der/die Hersteller:in den Wartungsbedarf und die Nutzungsintensität. Hierdurch verschwimmt die physische Grenze zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase.

Mit Blick auf die Treiber der I4.0 lässt sich festhalten, dass neben ihren Nachhaltigkeitspotentialen auch das Risiko besteht, dass I4.0 zur Entwicklung neuer Geschäftsmodelle beiträgt, die neue ressourcenintensive Bedürfnisfelder erschließen (individuelle Anpassung von Produkten, schnellere Innovationszyklen, Vermarktungsstrategien über Social Media, Digitalisierung von Alltagsgegenständen). Beschleunigte Produktions- und Innovationszyklen verschärfen den Trend, dass sich Abstände zwischen dem Markteintritt neuer Produkte weiterhin verkürzen (Milošević et al., 2020). Dies begünstigt insbesondere im IKT-Bereich kürzere Nutzungszeiten von Elektronikgeräten mit massiven negativen Umweltauswirkungen. Zugleich ermöglicht die Integration von Social-Media-Anwendungen in das Marketing sowie die Vernetzung mit den Kund:innen, über bspw. Einbindung in den Produktionsprozess via automatisierter Statusmeldungen zum Herstellungsprozess, eine gezielte Werbeansprache und bessere Absatzstrategien. Diese Aspekte können das Auftreten von Rebound-Effekten begünstigen, das heißt, dass die im Produktionsprozess potentiell erzielten Ressourceneffizienzgewinne durch einen angekurbelten Konsum konterkariert werden könnten.

Auf den Punkt:

- Die mit der Umsetzung der I4.0 assoziierten metallischen und mineralischen Rohstoffaufwendungen sind nicht bekannt. Nur wenige Studien beziehen die Umweltauswirkungen mit ein, die durch die Bereitstellung

der materiellen Infrastruktur a priori anfallen. Erste Verbrauchsschätzungen und Bedarfsszenarien für einzelne Rohstoffe im Kontext von I4.0-Technologien geben die Studien der DERA (2016, 2021).

- Allgemein mangelt es jedoch an quantitativen Daten für eine Bilanzierung der Umweltauswirkungen von I4.0-Technologien. Insbesondere Lebenszyklusanalysen, welche die Umweltauswirkungen der technologischen Infrastruktur erfassen, fehlen weitestgehend. Der Großteil der Studien stützt sich auf qualitative Methoden, darunter Expert:innen Befragungen.
- Die These, dass sich I4.0 „auf natürliche Weise“ (vgl. Plattform Industrie 4.0, 2021) auf den Ressourcenschutz auswirkt ist mit Blick auf die derzeitige Studienlage daher eher abzulehnen. Vielmehr hängt das Nachhaltigkeitspotential von I4.0 davon ab, wie die Implementierung erfolgt und ob sie zur Befähigung von Geschäftsmodellen im Sinne einer Kreislaufwirtschaft genutzt wird.
- Auf der einen Seite, wird den I4.0-Technologien in übergeordneten und/oder szenariobasierten Studien ein großes Potential für die Verwirklichung der Nachhaltigkeitsziele beigemessen. Auf der anderen Seite spielen Nachhaltigkeitskriterien und Kreislaufwirtschaftsprinzipien als Umsetzungstreiber eine nur untergeordnete Rolle. Damit Investitionen zur Umsetzung der I4.0 verstärkt in zirkuläre Geschäftsmodelle gelenkt werden, sollte die Politik geeignete Rahmenbedingungen für zirkuläre Geschäftsmodelle mit einer nachweislich positiven Wirkung auf reduzierten Ressourcenverbrauch und Treibhausgasneutralität setzen. Hierzu werden in Kapitel 4 erste politische Empfehlungen vorgestellt.

4. Schlussfolgerungen und politische Empfehlungen

4.1. Das Gewicht der Machine Economy systematisch erfassen, Ressourcenverbräuche ermitteln, Wiederverwertbarkeit gewährleisten

Die Rohstoffbedarfe und konkreten Anforderungen im Kontext der I4.0 lassen sich, wie die vorliegende Auswertung gezeigt hat, kaum von anderen Entwicklungen der digitalen Transformation abgrenzen. So stellen Sensoren sowie Rechenzentren eine zentrale Infrastrukturkomponente der I4.0 dar, zugleich spielen diese Technologien auch im Bereich der Informationstechnologien eine immer bedeutsamere Rolle.

Die DERA (2021) verweist in ihrer aktuellen Studie über den Rohstoffbedarf von Zukunftstechnologien, insbesondere im Kontext der I4.0 darauf, dass die Datenlage zur Bewertung der zukünftigen Rohstoffinanspruchnahme – sowohl mit Blick auf Menge wie auch Art der genutzten Rohstoffe – z.B. für die Industrierobotik und das IoT derzeit unzureichend sind und sich keine belastbaren Szenarien ableiten lassen. Zum einen da kaum Daten über die stoffliche Zusammensetzung und das Materialverhältnis entsprechender Maschinen (im Falle von Industrierobotern) öffentlich verfügbar sind, zum anderen da die Datenlage für potentielle zukünftige Marktentwicklungen von digitalen Technologien und damit einhergehende Nachfrageszenarien für einzelne Rohstoffe unzureichend vorhanden sind. Es war daher in dieser Kurzstudie nicht möglich die Rohstoffbedarfe der I4.0 zu ausreichend zu ermitteln, da eine entsprechende Datengrundlage fehlt.

Die Digitalisierung und ihre technologische Infrastruktur wird insbesondere die Nachfrage nach Technologiemetallen um ein Vielfaches erhöhen und durch IoT-Anwendungen und -Entwicklungen den Trend der Miniaturisierung verschärfen.

Für deren Verarbeitung ist eine große und heterogene Palette von Technologiemetallen bzw. Materialkombinationen notwendig (Behrendt 2018). Die Zunahme immer komplexerer Konstruktionsweisen und Materialzusammensetzungen erschwert die Zirkularität digitaler Infrastrukturen und die Rezyklierbarkeit von Technologiemetallen im Besonderen.

Anders als für Massenmetalle wie Kupfer, Eisen und Aluminium, existieren Recyclingverfahren für Rohstoffe wie Seltene Erden und Gallium zwar teils in der Theorie, aber nicht in ausreichendem Maße in der Praxis. Neben Herausforderungen im Bereich Konstruktion und Zerlegbarkeit, trägt auch eine mangelnde Investitionsbereitschaft in die Entwicklung und Umsetzung entsprechender Recyclingsysteme zur derzeitigen katastrophalen Rückgewinnungsquote von unter 1% der Technologiemetalle auf EU-Ebene bei. Volatile Rohstoffpreise dämpfen den finanziellen Anreiz für entsprechende Investitionen.

Demgegenüber steht das Narrativ, dass die digitale Transformation der Industrie einen wesentlichen Beitrag sowohl zur Dematerialisierung als auch zur Reduktion des Ressourcenverbrauchs leisten kann. Jedoch wird die Ressourcenintensität bzw. -effizienz der Industrie 4.0 in Studien fast ausschließlich für den Produktionsprozess selbst ermittelt, d.h. Vergleich der Input- und Output-Größen zwischen digitalen und nicht-digitalen Produktionssystemen und -prozessen. Die im Rahmen der bisherigen Arbeit ausgewerteten Studien setzen methodisch

meist auf die Selbstauskunft von Industrieakteur:innen oder anderen Expert:innen zur Bewertung des ökologischen Mehrwerts entsprechender Technologien, d.h. viele derzeitige Bewertungen beruhen auf qualitativen, weniger auf quantitativen Datengrundlagen.

Insbesondere werden in derzeitigen Studien und Analysen die Ressourcen außer Acht gelassen, die für die Bereitstellung der digitalen Infrastruktur selbst aufgewandt werden müssen. Ferner kann der bisherigen Studienlage nicht klar entnommen werden, inwieweit der eigene Ressourcenverbrauch (Energie, Rohstoffe) möglicherweise durch die Inanspruchnahme von Dienstleistungen von B2B-Plattformen im Bereich Datenverarbeitung und Maschinenvernetzung ausgelagert wird. Fertigungsprozesse werden hierdurch vernetzter und komplexer, dies erschwert die Zuweisung von Ressourcenaufwendungen, da Systemgrenzen durch die Vernetzung und vielfältigere Nutzungsweisen verschwimmen. Die Definition von Systemgrenzen ist jedoch Voraussetzung für die Zuweisung von Ressourcenaufwendungen, was zur Erfassung von Umweltwirkungen in klassischen Ansätzen, darunter die Lebenszyklusanalyse (LCA, von life cycle assessment), Voraussetzung ist.

Eine systematische und ganzheitliche Bewertung der Strategien zur Umsetzung von Industrie 4.0 ist Voraussetzung dafür, gezielte Maßnahmen zur Vermeidung negativer sowie zur Förderung positiver Auswirkungen zu entwickeln und politisch umzusetzen (Chen et al. 2020). Raihanian Mashhadi und Behdad (2018) haben Vorschläge entwickelt, wie die Lebenszyklusanalyse im Kontext der I4.0 weiterentwickelt werden könnte. Hierfür sollten die Vorteile digitaler Technologien selbst genutzt werden, um die Datenlage zu verbessern. Die Fähigkeit von Maschinen ihren eigenen Zustand erfassen und bewerten zu können (self assessment), um Reparatur- und Wartungsbedarfe frühzeitig zu erkennen bzw. Produktionsprozesse zu optimieren, sollte auch im Rahmen von LCA genutzt werden, indem das Konzept der maschinellen Selbsterkenntnis um Faktoren zur Bewertung und Optimierung der Umweltauswirkungen, Ressourcenverbräuche und Emissionen entlang des gesamten Systems erweitert wird. Anstatt physische Grenzen zu definieren und die Ergebnisse linear zu skalieren, ermöglicht die intensive Vernetzung durch das Internet der Dinge mit Cyberspace-Avataren von Maschinen, jegliche Inputs oder Outputs zu markieren, zu überwachen und im System nachzuverfolgen (siehe hierzu auch Ferrari et al. 2021). Bai et al. (2020) argumentieren darüber hinaus, dass eine Nachhaltigkeitsbewertung sowohl für die einzelnen Technologien der I4.0, als auch für ihr Zusammenspiel erfolgen sollte, um Synergien aber auch Risiken adäquat zu identifizieren und zu

adressieren. Hierdurch wäre es möglich eine differenzierte Bewertung der unterschiedlichen technischen Entwicklungen der Industrie 4.0 auch mit Blick auf ihre potentiellen Anwendungsfelder in den Geschäftsmodellen (siehe nächsten Punkt) durchzuführen und politische Steuerungsinstrumente dahingehend gezielter auszugestalten.

Hieraus ergeben sich folgende politische Handlungsempfehlungen:

Methoden zur Ermittlung der Ressourcenaufwendungen entwickeln, Datengrundlagen schaffen

- Die Umweltauswirkungen der digitalen Infrastruktur müssen in der politischen und gesellschaftlichen Debatte sowie in den mit der Digitalisierung in Zusammenhang stehenden Nachhaltigkeitsnarrativen endlich mehr Gewicht erlangen. Hierfür ist die Wissensgenerierung und Einspeisung in entsprechende politische und gesellschaftliche Foren von besonderer Bedeutung. Ein entsprechendes Forum stellt die Initiative Plattform I4.0 dar, welche besonders die umweltpolitisch positiven Aspekte des Transformationsprozesses hervorhebt.
- Die Politik sollte die Weiterentwicklung von dynamischen LCA zur systematischen Erfassung der Ressourcenverbräuche, Umwelt- und Klimaauswirkungen der digitalen Transformationen fördern, z.B. im Rahmen von Forschungsförderungen, Auftragsstudien oder Multi-Stakeholder-Initiativen, wie der Plattform Industrie 4.0. Wichtig ist bei letzterem jedoch, dass die Aufgabe nicht alleine den Industrieakteur:innen überlassen wird, sondern unabhängige Forschungsinstitute sowie Zivilgesellschaft in den Prozess einbezogen werden, um einen transparenten Prozess zu gewährleisten, als Grundlage für einen demokratischen Entwicklungsprozess umweltpolitischer Steuerungsinstrumente für die digitale Transformation.
- Die Politik sollte Anreize schaffen, um Unternehmen, die aktuell eine Transformation im Kontext der I4.0 durchlaufen, in die Erfassung entsprechender Datenströme in Rahmen von Open-Data-Pilotprojekten in unterschiedlichen Branchen einzubinden. Wichtig ist hierbei, dass bereits Daten miterfasst werden, die Aufschluss über die Umweltauswirkungen und Ressourcenaufwendungen der digitalen Infrastruktur selbst geben. Durch eine aggregierte Auswertung der Daten über einen längeren Zeitraum kann somit Transparenz über die Umweltauswirkungen und Potentiale die I4.0 besser getroffen werden.

- Bei diesen Vorhaben sollte, in Anlehnung an Bai et al. (2020), auch eine differenzierte Betrachtung der unterschiedlichen I4.0-Technologien mit Blick auf ihre Potentiale und Risiken für den Ressourcenverbrauch und die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft erfolgen.

Zivilgesellschaftliches Agenda-Setting befähigen und politische Dialogräume öffnen

- Aktuell ist die Zivilgesellschaft im Kontext der politischen Rahmensetzung zur Ausgestaltung der digitalen Transformation unterrepräsentiert. Es besteht ein gravierendes Ungleichgewicht zwischen der Teilhabe von Industrieakteur:innen an politischen Entscheidungsprozessen und der Einbeziehung zivilgesellschaftlicher Organisationen in diese (z.B. im Rahmen der Initiative Plattform I4.0 auf nationaler und GaiaX auf europäischer Ebene). Die Gründe hierfür sind vielfältig, neben der mangelnden Offenheit entsprechender Initiativen gegenüber der Zivilgesellschaft und dem dadurch resultierenden Ausschluss, mangelt es zivilgesellschaftlichen Akteur:innen an fachlicher Expertise und Kapazitäten, um sich aktiv in entsprechende Prozesse einzubringen. Wie in dieser Studie zu anfangs dargestellt, ist die Digitalisierung ein transformativer Prozess, der einen Umbruch gesellschaftlicher, politischer und ökonomischer Systeme zur Folge hat. Es ist daher von hoher demokratischer Relevanz ein breites Akteur:innenspektrum in die Rahmensetzung und Standardisierung digitaler Entwicklungen einzubinden und entsprechende Prozesse durch eine kritische Öffentlichkeit begleiten zu lassen. Neben der Förderung von Forschungsinitiativen und Vorhaben, sollte die Politik daher auch Maßnahmen ergreifen, um 1) die Zivilgesellschaft beim Aufbau von Kapazitäten zu digitalen Themen zu befähigen (z.B. im Rahmen von Förderungen), sodass sich Organisationen aktiv in politische Prozesse mit kritischer Expertise einbringen können; 2) die Zivilgesellschaft als zentrale Akteurin aktiv in Stakeholder-Foren zur Aushandlung politischer Rahmensetzungen einzubinden.

Politische Steuerungsinstrumente auf den Weg bringen

- Einführung einer an den Anforderungen der Digitalisierung ausgerichteten primären Ressourcensteuer: Um der Preisvolatilität von Rohstoffen

entgegenzuwirken, die Investitionen in Recycling-Infrastruktur erschweren, sollte in Erwägung gezogen werden, eine Ressourcensteuer auf primäre Rohstoffe einzuführen. Diese würde den Rohstoffpreis insofern stabilisieren, als dass sie die externen Kosten des primären Rohstoffabbaus einpreist. Hierdurch könnten recycelte Technologiemetalle als sekundäre Rohstoffe dauerhaft konkurrenzfähig auf den Markt gelangen. Eine Ressourcensteuer könnte auch dazu beitragen, dass die Umweltauswirkungen des Rohstoffabbaus durch die Einpreisung indirekter Ressourcenaufwendungen, die bei der Primärgewinnung anfallen, mit in die Investitionsentscheidungen für digitale Technologien einfließen – hierdurch werden potentielle Kosteneinsparungen durch Ressourcenreduktionen im Produktionsprozess zumindest in Ansätzen den Ressourcenaufwendungen, die für die Bereitstellung der Infrastruktur anfallen, entgegengestellt. Das Konzept einer primären Ressourcensteuer wurde bereits mehrfach und von unterschiedlichen Akteur:innen diskutiert und sollte im Kontext der Digitalisierung neuverhandelt und auf die Anforderungen der Digitalisierung neu ausgerichtet werden (z.B. DNR 2018). Hierbei empfiehlt es sich insbesondere, dass der Ansatz der Input-Steuer diskutiert wird. Die Bundesregierung hat sich in ihrem Koalitionsvertrag die absolute Reduktion des Ressourcenverbrauchs zum Ziel gesetzt, noch fehlen ihr hierzu entscheidende Politikhebel. Da Deutschland im europaweiten Vergleich einen sehr niedrigen Satz für Umweltsteuern erhebt (im europaweiten Vergleich lag Deutschland 2017 mit einem Anteil von 4,7% am Gesamtsteueraufkommen auf Platz 27 von 28, siehe Mahler et al. 2017) und damit unter der für 2020 geforderten EU-Quote für Umweltsteuern liegt, wäre die Ressourcensteuer ein geeignetes Instrument den Anteil zu erhöhen. Bei der Konzeption einer entsprechenden Steuer sollten jedoch mögliche negative Auswirkungen auf den Ausbau Erneuerbarer Energien antizipiert und vermieden werden.

- Ausdehnung der Ökodesign-Richtlinie und setzen von zirkulären Standards für digitale Infrastrukturen (u. a. im Maschinenbau): Ein möglicher Weg, den Aufbau der I4.0 im Sinne der Kreislaufwirtschaft voranzutreiben und die Zirkularität von technologiemetallhaltigen Geräten zu gewährleisten, ist eine Ausweitung der Ökodesign-Richtlinie auf digitale Infrastrukturen der Industrie 4.0. I4.0-Anlagen müssen von Anfang an systemisch gedacht und demontagegerecht gebaut werden. Dem sollte eine Standardisierung recyclinggerechter Konstruktionen spezifisch für den Maschinen- und Anlagenbau (z.B. im Bereich Robotik, 3D-Druck) zur

Konstruktion zirkulärer Anlagen und ihrer digitalen Schnittstellen vorangehen. Die Ökodesign-Richtlinie sollte neben dem Energieverbrauch um Umwelt- und Ressourcenaspekte bezüglich der Technologiemetalle erweitert werden.

- Verbesserung der Investitionssicherheit von Recyclingbetrieben: Langfristige Investitionen in die Entwicklung von Recyclingverfahren und den Aufbau von Verwertungsanlagen sowie die Unsicherheit der künftigen Preisentwicklung bei Technologiemetallen bedeuten ein hohes Risiko für Investoren (Bleher, Schüler 2011). Hinzu kommen die im Bereich der Abfallverbrennung niedrigen Entsorgungspreise, so dass der Kostendruck für die Recyclingbetriebe deutlich zunimmt. Die Investitionsbanken (KfW, Europäische Investitionsbank) könnten dazu beitragen, die Risiken für die Investoren zu reduzieren.

4.2. Potenziale von I4.0 für die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft nutzen

Wie in Kapitel 3 dargelegt, bietet die Industrie 4.0 enorme Potentiale für eine konsequente Umsetzung der Kreislaufwirtschaft, da sie neue Möglichkeiten für das Remanufacturing, die Reparatur, das Recycling und die Nachverfolgbarkeit von Produkten und Stoffströmen schafft. Zwar werden diese Potentiale in wissenschaftlichen Studien und Industriepositionen stets betont, dennoch zeigt eine Umfrage der Plattform I4.0, dass zirkuläres Wirtschaften (hierunter Beispiele aus der Recyclingindustrie bereits eingeschlossen) nur in 27% der eingegangenen Unternehmensbeispiele bei der Umstellung auf digitale Anwendungen in der Industrie eine Rolle spielt (Plattform Industrie 4.0, 2020b). Noch seltener wird I4.0 für die gezielte Umsetzung innovativer zirkulärer Geschäftsmodelle genutzt (z.B. im Rahmen der Sharing Economy, 6% der Beispiele).

In den ausgewerteten Studien ließen sich unterschiedliche Treiber für die digitale Transformation der Industrie identifizieren, dabei wurde deutlich, dass Nachhaltigkeitsaspekte im Vergleich zu ökonomischen Anreizen eine stark untergeordnete Rolle spielen (Feroz et al., 2021). Zugleich weisen aktuelle Entwicklungen in der Umsetzung von I4.0 darauf hin, dass sich unter I4.0 ausbildende Geschäftsmodelle auch nachteilig auf die ökologische Nachhaltigkeit der Industrie auswirken könnten.

Verpasst es die Politik geeignete Leitplanken für die Kreislaufwirtschaft im Kontext der I4.0 zu definieren, besteht das Risiko, dass wichtige Chancen für ein zirkuläres Wirtschaftssystem verpasst werden. Die Politik sollte daher einen

steuerungspolitischen Rahmen schaffen, um Geschäftsmodelle der Industrie 4.0 mit einer positiven Umweltwirkung gezielt zu fördern und Regeln zur Setzung von Mindestanforderungen für eine nachhaltige Produktpolitik zu schaffen.

- Standards für modulares Design durch Ausweitung der Ökodesign-Richtlinie setzen: Im Sinne einer nachhaltigen Produktpolitik sollten Regularien zur standardisierten und modularen Bauweise sowie Reparierbarkeit entlang unterschiedlicher Produktgruppen definiert werden – dies würde auch einen direkten Anreiz für die Maschinen- und Anlagenbauindustrie schaffen, die Entwicklung entsprechender Anlagen und Innovationen im Kontext der I4.0 an Kriterien der Zirkularität auszurichten. Die Kommission überarbeitet derzeit die Ökodesign-Richtlinie für besonders ressourcenintensive Produktgruppen, bei der Überarbeitung sollten bisher nicht identifizierte Potentiale, die die I4.0 für die Zirkularität und Langlebigkeit von Produkten bietet, erarbeitet und mitgedacht werden.
- Digitalen Produktpass für alle transparent gestalten: Im Rahmen des Aktionsplans Kreislaufwirtschaft verweist die Kommission auf die Einführung eines digitalen Produktpasses, welcher angelehnt an das Konzept des digital twins Informationen über die technische und materielle Zusammensetzung von Produkten, über den Reparaturprozess und für den späteren Recyclingprozess enthält. Ziel einer entsprechenden Standardisierung sollte es sein, die Demontage, Zerlegung und Recyclingprozesse des Produktes zu präzisieren sowie Rohstoffe und ihre Herkunft besser nachverfolgen zu können. Außerdem können damit Daten bereitgestellt werden, die es ermöglichen in z.B. 3D-Druckverfahren einzelne Komponenten und Ersatzteile dezentral nach zu fertigen und damit Wertschöpfungsstrukturen in der Wiederverwendung und dem Remanufacturing aufzubauen. Dies hätte den Vorteil, dass Hersteller Ersatzteile nicht vorrätig auf Halde produzieren müssten, sondern dass diese bedarfsorientiert angefertigt werden könnten. Dieser Aspekt würde sich positiv auf die Ressourcenschonung auswirken und ein Argument gegen die Vorbehalte der Industrie liefern, da Kosten zur vorrätigen Produktion und Lagerung von Ersatzteilen entfallen. Hieraus könnten sich auch neue Geschäftsmodelle entwickeln, z.B. in der dezentralen und bedarfsgerechten Bereitstellung von Ersatzteilen. Zur Förderung dezentraler Wertschöpfungsstrukturen ist es daher zentral, dass im Rahmen politischer Standardisierungsprozesse der Zugang zu Informationen nicht nur systemkompatibel, sondern transparent entlang von Wertschöpfungs-

strukturen geregelt wird. Insbesondere der Zugang zu Reparaturinformationen und Konstruktionsanforderungen an Ersatzteile sollte im Sinne eines freien Rechts auf Reparatur für alle Nutzer:innen gewährleistet werden (z.B. im Sinne von Open-Source-Lösungen). In die Entwicklung des digitalen Produktpasses sollte daher auf EU-Ebene ein breites Konsortium aus unterschiedlichen Akteur:innen eingebunden werden, darunter neben wirtschaftlichen Akteur:innen aus den Sektoren Produktion und Recycling auch insbesondere wissenschaftliche und zivilgesellschaftliche Akteur:innen. Das dies nicht selbstverständlich ist und die Debatte stark von mächtigen Industrieakteur:innen geprägt ist, zeigt sich am Beispiel des Gaia-X-Konsortiums, welches mit der Standardisierung von Anforderungen an ein europäisches Digitales Ökosystem beauftragt ist. Darüber hinaus existieren bereits unterschiedliche Brancheninitiativen für die Entwicklung von Produktpässen, z.B. im Automobil- und Batterie-Bereich (Battery Passport) und in der Verpackungsindustrie (R-Cycle). In Deutschland ist derzeit das Fraunhofer Institut mit der Entwicklung exemplarischer Ansätze beauftragt.

- Ressourcenaufwendungen digitaler Geschäftsmodelle im Kontext der Kreislaufwirtschaft ermitteln: Im Rahmen einer Studie sollte ein besseres Verständnis über die makroökonomischen Wechselwirkungen und die tatsächlichen Ressourcenaufwendungen zirkulärer Geschäftsmodelle ermittelt werden. An den Erkenntnissen sollten politische Steuerungsinstrumente neu ausgerichtet werden. Hierfür bietet die EU-Taxonomie für nachhaltige Aktivitäten ein geeignetes Werkzeug, da so Investitionen gezielter in Geschäftsmodelle und I4.0 Anwendungen gelenkt werden könnten, die einen positiven Effekt auf die Reduktion des Ressourcenverbrauchs haben.

Literaturverzeichnis

- Acquier, A., Daudigeos, T., & Pinkse, J. (2017). Promises and paradoxes of the sharing economy: An organizing framework. In: *Technological Forecasting and Social Change*, 125, 1–10. <https://doi.org/10.1016/J.TECHFORE.2017.07.006>
- Adrian, S., Drisse, M. B., Cheng, Y., Devia, L., Deubzer, O., Goldizen, F., Gorman, J., Herat, S., Honda, S., Iattoni, G., Jingwei, W., Jinhui, L., Khatriwal, D. S., Linnell, J., Magalini, F., Nnororm, I. C., Onianwa, P., Ott, D., Ramola, A., Zeng, X. (2020). Quantities, flows, and the circular economy potential. *The Global E-waste Monitor 2020*.
- Annibaldi, V., & Rotilio, M. (2019). Energy consumption consideration of 3D printing. *2019 IEEE International Workshop on Metrology for Industry 4.0 and IoT, MetroInd 4.0 and IoT 2019 - Proceedings*, 243–248. <https://doi.org/10.1109/METROI4.2019.8792856>
- Bai, C., Dallasega, P., Orzes, G., & Sarkis, J. (2020). Industry 4.0 technologies assessment: A sustainability perspective. *International Journal of Production Economics*, 229. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2020.107776>
- Behrendt, S. (2018). Recycling von Technologiemetallen Fallstudie.
- Beier, G., Niehoff, S., Ziems, T., & Xue, B. (2017). Sustainability aspects of a digitalized industry – A comparative study from China and Germany. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing – Green Technology*, 4(2), 227–234. <https://doi.org/10.1007/s40684-017-0028-8>
- Benqassem, S., Bordage, F., de Montenay, L., Delmas-Orgelet, J., Domon, F., Lees Perasso, E., Prunel, D., & Vateau, C. (2021). *DIGITAL TECHNOLOGIES IN EUROPE: an environmental life cycle approach*.
- Bierdel, M., Köhler, A. R., & Ulrike Lange, D.-I. (2019). Ökologische und ökonomische Bewertung des Ressourcenaufwands – Additive Fertigungsverfahren in der industriellen Produktion Autorinnen und Autoren. www.ressource-deutschland.de

- Bloching, B., Leutiger, P., Oltmanns, T., Rossbach, C., Schlick, T., Remane, G., Quick, P., & Shafranyuk, O. (2015). Die Digitale Transformation der Industrie. Was sie bedeutet. Wer gewinnt. Was jetzt zu tun ist. https://bdi.eu/media/presse/publikationen/information-und-telekommunikation/Digitale_Transformation.pdf
- Bonilla, S., Silva, H., Terra da Silva, M., Franco Gonçalves, R., & Sacomano, J. (2018). Industry 4.0 and Sustainability Implications: A Scenario-Based Analysis of the Impacts and Challenges. *Sustainability*, 10(10), 3740. <https://doi.org/10.3390/su10103740>
- Castorani, V., Rossi, M., Germani, M., Mandolini, M., & Vita, A. (2018). Life Cycle Assessment of Home Smart Objects: Kitchen Hood Cases. *Procedia CIRP*, 69, 499–504. <https://doi.org/10.1016/J.PROCIR.2017.11.113>
- Chen, X., Despeisse, M., & Johansson, B. (2020). Environmental Sustainability of Digitalization in Manufacturing: A Review. *Sustainability*, 12(24), 10298. <https://doi.org/10.3390/su122410298>
- Dehoust, G., Manhart, A., Dolega, P., Vogt, R., Auberger, A., Kämper, C., von Ackern, P., Rüttinger, L., Rechlin, A., & Priester, M. (2020). Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik - Öko-Ress II. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>
- DERA. (2016). Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2016. www.deutsche-rohstoffagentur.de
- DERA. (2021). Rohstoffe für Zukunftstechnologien 2021. DERA Rohstoffinformationen. www.deutsche-rohstoffagentur.de
- DNR (Deutscher Naturschutzring) (2018): Ressourcenschonung: Steuern rauf, Verbrauch runter?! Steckbrief. Abrufbar unter: https://backend.dnr.de/sites/default/files/Publikationen/Steckbriefe_Factsheets/18_02_R2-0_Steckbrief_Ressourcensteuern.pdf (letzter Abruf: 23.03.2022).
- Esposito, M. (2018). World Economic Forum White Paper: Driving the Sustainability of Production Systems with Fourth Industrial Revolution Innovation Global Business Systems View project Artificial Intelligence View project Driving the Sustainability of Production Systems with Fourth Industrial

- Revolution Innovation In collaboration with Accenture.
<https://www.researchgate.net/publication/322071988>
- EU-Recycling. (2016). Edelmetallrecycling: Eine Zwischenbilanz – EU-Recycling.
<https://eu-recycling.com/Archive/13932>
- Feroz, A. K., Zo, H., & Chiravuri, A. (2021). Digital transformation and environmental sustainability: A review and research agenda. *Sustainability (Switzerland)*, 13(3), 1–20. <https://doi.org/10.3390/su13031530>
- Ferreboeuf, H., & et al. (2019). LEAN ICT-TOWARDS DIGITAL SOBRIETY. REPORT OF THE WORKING GROUP DIRECTED BY HUGUES FERREBOEUF FOR THE THINK TANK THE SHIFT PROJECT.
- Ford, S., & Despeisse, M. (2016). Additive manufacturing and sustainability: an exploratory study of the advantages and challenges. *Journal of Cleaner Production*, 137, 1573–1587. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2016.04.150>
- Fraunhofer Institut. (n.d.). Digital Fertigung in der Massenproduktion. Retrieved March 4, 2022, from <https://www.go-beyond-four-point-zero.de/>
- Fritzsche, K., Niehoff, S., & Beier, G. (2018). Industry 4.0 and Climate Change—Exploring the Science–Policy Gap. *Sustainability* 2018, Vol. 10, Page 4511, 10(12), 4511. <https://doi.org/10.3390/SU10124511>
- Furstenau, L. B., Sott, M. K., Kipper, L. M., MacHado, E. L., Lopez-Robles, J. R., Dohan, M. S., Cobo, M. J., Zahid, A., Abbasi, Q. H., & Imran, M. A. (2020). Link between Sustainability and Industry 4.0: Trends, Challenges and New Perspectives. *IEEE Access*, 8, 140079–140096. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3012812>
- Gebler, M., Schoot Uiterkamp, A. J. M., & Visser, C. (2014). A global sustainability perspective on 3D printing technologies. *Energy Policy*, 74, 158–167. <https://doi.org/10.1016/j.enpol.2014.08.033>
- Gensch, C.-O., Prakash, S., & Hilbert, I. (2017). Is Digitalisation a Driver for Sustainability? 117–129. https://doi.org/10.1007/978-3-319-54603-2_10
- Ghobakhloo, M. (2020). Industry 4.0, digitization, and opportunities for sustainability. *Journal of Cleaner Production*, 252, 119869. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.119869>

- Grubler, A., Wilson, C., Bento, N., Boza-Kiss, B., Krey, V., McCollum, D. L., Rao, N. D., Riahi, K., Rogelj, J., de Stercke, S., Cullen, J., Frank, S., Fricko, O., Guo, F., Gidden, M., Havlík, P., Huppmann, D., Kiesewetter, G., Rafaj, P., ... Valin, H. (2018). A low energy demand scenario for meeting the 1.5 °C target and sustainable development goals without negative emission technologies. *Nature Energy* 2018 3:6, 3(6), 515–527. <https://doi.org/10.1038/s41560-018-0172-6>
- Herceg, I. V., Kuč, V., Mijušković, V. M., & Herceg, T. (2020). Challenges and Driving Forces for Industry 4.0 Implementation. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 4208, 12(10), 4208. <https://doi.org/10.3390/SU12104208>
- Hilbert, M., & López, P. (2011). The world's technological capacity to store, communicate, and compute information. *Science*, 332(6025), 60–65. <https://doi.org/10.1126/SCIENCE.1200970>
- Junge, A. L., & Straube, F. (2020). Sustainable supply chains - Digital transformation technologies' impact on the social and environmental dimension. *Procedia Manufacturing*, 43, 736–742. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.02.110>
- Kayikci, Y. (2018). Sustainability impact of digitization in logistics. *Procedia Manufacturing*, 21, 782–789. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2018.02.184>
- Kerin, M., & Pham, D. T. (2019). A review of emerging industry 4.0 technologies in remanufacturing. *Journal of Cleaner Production*, 237, 117805. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2019.117805>
- Khan, I. S., Ahmad, M. O., & Majava, J. (2021a). Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives. In *Journal of Cleaner Production* (Vol. 297). Elsevier Ltd. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126655>
- Khan, I. S., Ahmad, M. O., & Majava, J. (2021b). Industry 4.0 and sustainable development: A systematic mapping of triple bottom line, Circular Economy and Sustainable Business Models perspectives. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126655. <https://doi.org/10.1016/J.JCLEPRO.2021.126655>

- Li, H., & Yang, C. (2021). Digital Transformation of Manufacturing Enterprises. *Procedia Computer Science*, 187, 24–29.
<https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.04.029>
- Malmodin, J., & Coroama, V. (2017). Assessing ICT's enabling effect through case study extrapolation-The example of smart metering. *2016 Electronics Goes Green 2016+, EGG 2016*.
<https://doi.org/10.1109/EGG.2016.7829814>
- Milošević, M., Lukić, D., Đurđev, M., & Vukman, J. (2020). Digital Transformation of Manufacturing Towards Industry 4.0 Concept. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 749(1), 012019.
<https://doi.org/10.1088/1757-899X/749/1/012019>
- Oláh, J., Aburumman, N., Popp, J., Khan, M. A., Haddad, H., & Kitukutha, N. (2020). Impact of Industry 4.0 on Environmental Sustainability. *Sustainability* 2020, Vol. 12, Page 4674, 12(11), 4674.
<https://doi.org/10.3390/SU12114674>
- Pilgrim, H., Groneweg, M., & Reckordt, M. (2017). *Ressourcenfluch 4.0*.
<http://power-shift.de>
- Piscitelli, G., Ferazzoli, A., Petrillo, A., Cioffi, R., Parmentola, A., & Travagliani, M. (2020). CIRCULAR ECONOMY MODELS IN THE INDUSTRY 4.0 ERA: A REVIEW OF THE LAST DECADE. *Procedia Manufacturing*, 42, 227–234.
<https://doi.org/10.1016/J.PROMFG.2020.02.074>
- Plattform Industrie 4.0. (2019). *Digitale Geschäftsmodelle für die Industrie 4.0*.
www.bmwi.de
- Plattform Industrie 4.0. (2020a). *Nachhaltige Produktion: Mit Industrie 4.0 die Ökologische Transformation aktiv gestalten*. www.bmwi.de
- Plattform Industrie 4.0. (2020b). *Nachhaltige Produktion: Mit Industrie 4.0 die Ökologische Transformation aktiv gestalten*. Impulspapier der Task Force Nachhaltigkeit. <https://www.bmwi.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/industrie-4-0-nachhaltige-produktion.html>

- Plattform Industrie 4.0. (2021). Zehn Thesen, wie digitale Geschäftsmodelle Nachhaltigkeit in der Industrie 4.0 fördern. In 2021. https://www.plattform-i40.de/IP/Redaktion/DE/Downloads/Publikation/Thesen-Nachhaltigkeit-Geschaeftsmodelle.pdf?__blob=publicationFile&v=5
- Pohl, J., & Finkbeiner, M. (2017). Digitalisation for sustainability? Challenges in environmental assessment of digital services. *Lecture Notes in Informatics (LNI), Proceedings - Series of the Gesellschaft Fur Informatik (GI)*, 275, 1995–2000. https://doi.org/10.18420/IN2017_199
- Purr, K., Günther, J., Lehmann, H., & Nuss, P. (2019). Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität RESCUE-Studie. *CLIMATE CHANGE* 36/2019.
- Raihanian Mashhadi, A., & Behdad, S. (2018). Ubiquitous Life Cycle Assessment (U-LCA): A Proposed Concept for Environmental and Social Impact Assessment of Industry 4.0. *Manufacturing Letters*, 15, 93–96. <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2017.12.012>
- Riahi, K., van Vuuren, D. P., Kriegler, E., Edmonds, J., O'Neill, B. C., Fujimori, S., Bauer, N., Calvin, K., Dellink, R., Fricko, O., Lutz, W., Popp, A., Cuaresma, J. C., KC, S., Leimbach, M., Jiang, L., Kram, T., Rao, S., Emmerling, J., ... Tavoni, M. (2017). The Shared Socioeconomic Pathways and their energy, land use, and greenhouse gas emissions implications: An overview. *Global Environmental Change*, 42, 153–168. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2016.05.009>
- Sahu, A., Agrawal, S., & Kumar, G. (2021). Integrating Industry 4.0 and circular economy: a review. *Journal of Enterprise Information Management*, ahead-of-print(ahead-of-print). <https://doi.org/10.1108/JEIM-11-2020-0465>
- Sander, K., Göbbling-Reisemann, S., Zimmermann, T., Marscheider-Weidemann, F., Wilts, H., Schebeck, L., Wagner, J., Heegn, H., & Pehlken, A. (2017). Recyclingpotenzial strategischer Metalle (ReStra) Zusammenfassung Recyclingpotenzial strategischer Metalle (ReStra). https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-21_texte_68-2017_restra_zusamm_0.pdf

- Santarius, T., & Lange, S. (2021). Chancen und Grenzen einer ‚3-D-Ökonomie‘: Sustainability Management Forum | NachhaltigkeitsManagementForum 2021 29:1, 29(1), 31–39. <https://doi.org/10.1007/S00550-021-00510-Y>
- Santarius, T., Pohl, J., & Lange, S. (2020). Digitalization and the Decoupling Debate: Can ICT Help to Reduce Environmental Impacts While the Economy Keeps Growing? Sustainability 2020, Vol. 12, Page 7496, 12(18), 7496. <https://doi.org/10.3390/SU12187496>
- Setia, P., Venkatesh, V., & Joglekar, S. (2013). Leveraging Digital Technologies: How Information Quality Leads to Localized Capabilities and Customer Service Performance. MIS Quarterly, 37(2), 565–590. <https://doi.org/10.25300/MISQ/2013/37.2.11>
- Sonter, L. J., Dade, M. C., Watson, J. E. M., & Valenta, R. K. (2020). Renewable energy production will exacerbate mining threats to biodiversity. Nature Communications 2020 11:1, 11(1), 1–6. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-17928-5>
- Stentoft, J., Adsbøll Wickstrøm, K., Philipsen, K., & Haug, A. (2020). Drivers and barriers for Industry 4.0 readiness and practice: empirical evidence from small and medium-sized manufacturers. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768318>, 32(10), 811–828. <https://doi.org/10.1080/09537287.2020.1768318>
- Stock, T., Obenaus, M., Kunz, S., & Kohl, H. (2018). Industry 4.0 as enabler for a sustainable development: A qualitative assessment of its ecological and social potential. Process Safety and Environmental Protection, 118, 254–267. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2018.06.026>
- Sühlmann-Faul, F., & Rammler, S. (2018). Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Nachhaltigkeitsdefizite der Digitalisierung auf ökologischer, ökonomischer, politischer und sozialer Ebene. Handlungsempfehlungen und Wege einer erhöhten Nachhaltigkeit durch Werkzeuge der Digitalisierung. https://www.wwf.de/fileadmin/user_upload/Studie_Suehlmann-Faul_Rammler_180406_final_pdf_protected.pdf

- Umweltbundesamt. (2020). Elektroschrott: Deutschland verfehlt EU-Sammelquote von 45 Prozent knapp | Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/elektroschrott-deutschland-verfehlt-eu-sammelquote>
- VDI. (2017). Ressourceneffizienz durch Industrie 4.0 - Potenziale für KMU des verarbeitenden Gewerbes. www.ressource-deutschland.de
- Verhoef, L. A., Budde, B. W., Chockalingam, C., García Nodar, B., & van Wijk, A. J. M. (2018). The effect of additive manufacturing on global energy demand: An assessment using a bottom-up approach. *Energy Policy*, 112, 349–360. <https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2017.10.034>
- Warmington-Lundström, J., & Laurenti, R. (2020). Reviewing circular economy rebound effects: The case of online peer-to-peer boat sharing. *Resources, Conservation & Recycling*: X, 5, 100028. <https://doi.org/10.1016/J.RCRX.2019.100028>
- Wruk, D., Oberg, A., & Friedrich-Schieback, M. (2019). Quantifying the sharing economy. *GAIA*, 28(SUPPL.1), 184–189. <https://doi.org/10.14512/GAIA.28.S1.3>
- Yang, S., Raghavendra, M. R. A., Kaminski, J., & Pepin, H. (2018). Opportunities for Industry 4.0 to Support Remanufacturing. *Applied Sciences* 2018, Vol. 8, Page 1177, 8(7), 1177. <https://doi.org/10.3390/APP8071177>
- Youssef, A. ben. (2020). How can industry 4.0 contribute to combatting climate change? *Revue d'Economie Industrielle*, 169(1), 161–193. <https://doi.org/10.4000/REI.8911>
- Zhang, W., Gu, F., & Guo, J. (2019). Can Smart Factories Bring Environmental Benefits to Their Products? A Case Study of Household Refrigerators. *Journal of Industrial Ecology*, 23(6), 1381–1395. <https://doi.org/10.1111/JIEC.12928>

Über die Autorin

Rebecca Heinz

Rebecca Heinz ist Referentin für Ressourcenpolitik und zirkuläres Wirtschaften. Sie arbeitet bei Germanwatch e.V. zu ressourcenpolitischen Fragestellungen an der Schnittstelle der digitalen Transformation und der Umsetzung einer Kreislaufwirtschaft. Ein besonderer Fokus ihrer Arbeit liegt derzeit auf den Chancen und Risiken digitaler Geschäftsmodelle für den Ressourcen- und Rohstoffverbrauch sowie auf der Umsetzung des Rechts auf Reparatur.

Über CO:DINA

Das Verbundvorhaben CO:DINA – Transformationsroadmap Digitalisierung und Nachhaltigkeit vernetzt Wissenschaft, Politik, Zivilgesellschaft und Wirtschaft, um neue strategische Stoßrichtungen für eine sozial-ökologische Digitalisierung zu identifizieren. Vielfalt in Denkweisen, Perspektiven und Erfahrungen ist die Voraussetzung, um die Komplexität der Digitalisierung besser zu verstehen und grundlegenden Fragen insbesondere zur Künstlichen Intelligenz mit tragfähigen Lösungsansätzen zu begegnen. Dabei entstehen Netzwerke zwischen Akteursgruppen, die bislang unzureichend verbunden waren. So wird die politische und gesellschaftliche Handlungsfähigkeit für einen sozial-ökologisch-digitalen Wandel gestärkt.

Das Vorhaben wird vom Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU) im Rahmen der KI-Leuchtturminitiative gefördert und gemeinsam vom IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung und dem Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie umgesetzt.

Impressum



IZT – Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung gemeinnützige GmbH
Schopenhauerstr. 2614129 Berlin
Tel.: +49 (0) 30 803088-0
Fax: +49 (0) 30 803088-88
Email: info@izt.de
Internet: www.izt.de



Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie GmbH
Döppersberg 19, 42103 Wuppertal
Tel.: +49 (0) 202-2492-101
Fax: +49 (0) 202-2492-108
E-Mail: info@wupperinst.org
Internet: www.wupperinst.org



Weitere Veröffentlichungen unter www.codina-transformation.de

Gefördert durch:



Bundesministerium
für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit
und Verbraucherschutz

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages