

Digitalisierung und natürliche Ressourcen

Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland (DigitalRessourcen)

Für Mensch & Umwelt

Umwelt 
Bundesamt

Impressum

Herausgeber:

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

 /umweltbundesamt.de

Durchführung der Studie:

Ramboll Deutschland GmbH
Jürgen-Töpfer-Straße 48
22763 Hamburg

Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse-
und Informationssysteme IAIS
Schloss Birlinghoven 1
53757 Sankt Augustin

GWS Gesellschaft für Wirtschaftliche
Strukturforschung mbH
Heinrichstraße 30
49080 Osnabrück

Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN)
Burggrafenstraße 6
12623 Berlin

Autorinnen und Autoren:

Katharina Milde, Anna Klose, Mareike Böbel, Daniel Lück-
erath (Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und
Informationssysteme IAIS, Sankt Augustin)
Veronika Abraham, Roman Kirchdorfer, Joachim Aigner, Nina
Albus (Ramboll Deutschland GmbH, München und Hamburg)
Mark Meyer, Alice Philippi (GWS Gesellschaft für Wirtschaft-
liche Strukturforschung mbH, Osnabrück)
Daniel Haack (Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN),
Berlin)
Christopher Manstein (Umweltbundesamt)

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

Redaktion:

Fachgebiet I 1.1 Grundsatzfragen, Nachhaltigkeits-
strategien und -szenarien, Ressourcenschonung
Christopher Manstein

Satz und Layout:

Eva Jüssen, Achim Kapusta (Fraunhofer-Institut für
Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS,
Sankt Augustin)

Publikationen als pdf:

<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>
<http://www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen>

Bildquelle Titelbild:

Connect world – stock.adobe.com

Abschlussdatum:

Dezember 2023

ISSN 1862-4804



DIGITALISIERUNG UND NATÜRLICHE RESSOURCEN

**Analyse der Ressourcenintensität des
digitalen Wandels in Deutschland**

Inhalt

1	1 Das Forschungsvorhaben „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“ ...	6
2	2 Digitalisierung und natürliche Ressourcen – eine Bestandsaufnahme	7
3	3 Systemgrenzen der Digitalisierung.....	8
4	4 Die Mikroebene: zehn Fallstudien zu Lebenszyklusdaten digitaler Anwendungsfälle.....	10
	Die Ergebnisse der Fallstudien	11
	Das Beispiel der Fallstudie „Videokonferenz im Homeoffice“	13
	Diskussion der Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Fallstudien.....	14
5	5 Die Makroebene: Ressourcenintensität und CO₂-Emissionen des digitalen Wandels in den Jahren 2000 – 2020	16
	Methodik zur Analyse auf der Makroebene.....	16
	Die Ergebnisse der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung über die Jahre 2000 – 2020 ..	18
	Analyse nach Rohstoffgruppen, geografischem Ursprung und Verwendungen	20
	Einordnung der Ergebnisse der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung	22
6	6 Ressourcenintensität und CO₂-Emissionen: Modellierung des digitalen Wandels bis zum Jahr 2050.....	23
	Das Trendszenario bis 2050.....	23
	Sechs alternative Zukunftsszenarien bis zum Jahr 2050	24
	Zusammenfassung – Modellierung des digitalen Wandels bis zum Jahr 2050	28
7	7 Gestaltungsfelder für eine nachhaltigere Digitalisierung	29
8	8 Weiterer Forschungsbedarf.....	33
9	9 Quellenverzeichnis	35

Abbildungen

Abbildung 1	
Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie in Deutschland	6
Abbildung 2	
Systemverständnis der Digitalisierung im Forschungsvorhaben	8
Abbildung 3	
Indikatorenset für die Analyse im Rahmen der Fallstudien	11
Abbildung 4	
Untersuchungseinheit der Fallstudie „Videokonferenz im Homeoffice“	13
Abbildung 5	
Ressourcen- und LCA-Indikatoren im Vergleich nach Herstellungs- und Nutzungsphase für eine einstündige Videokonferenz	14
Abbildung 6	
Analyse des Rohstoffkonsums ($RMC_{Dig.}$) der Digitalisierung in Deutschland	18
Abbildung 7	
Analyse des Rohstoffeinsatzes ($RMI_{Dig.}$) der Digitalisierung in Deutschland	19
Abbildung 8	
Nachfrageseitige Analyse des $CO_{2, Dig.}$-Fußabdrucks der Digitalisierung in Deutschland	20
Abbildung 9	
Rohstoffkonsum des digitalen Wandels in Deutschland im Jahr 2020 ($RMC_{Dig.}$) nach Rohstoffgruppen, geografischem Ursprung und Verwendungen	21
Abbildung 10	
Entwicklung ausgewählter gesamtwirtschaftlicher Schlüsselindikatoren für Deutschland im Trendszenario über die Jahre 2020 bis 2050	24
Abbildung 11	
Entwicklung des Rohstoffkonsums ($RMC_{Dig.}$) der Digitalisierung in Deutschland für unterschiedlich ambitionierte Szenarien im Zeitraum 2020 bis 2050	25
Abbildung 12	
$CO_{2, Dig.}$-Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland, Unterschiede der Szenarienergebnisse im Vergleich zum Trendszenario für das Jahr 2050	26
Abbildung 13	
Rohstoffkonsum ($RMC_{Dig.}$) der Digitalisierung in Deutschland – Unterschiede der Szenarien gegenüber dem Trendszenario nach Produktgruppen	27
Abbildung 14	
Übersicht über mögliche Gestaltungsfelder einer nachhaltigen Digitalisierung	29

Tabellen

Tabelle 1	
Übersicht über die betrachteten zehn Fallstudien	12
Tabelle 2	
Abgrenzung des Digitalisierungssektors in den gesamtwirtschaftlichen Bewertungen	17

1 Das Forschungsvorhaben „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“

Der digitale Wandel als Megatrend zeigt sich in vielen aktuellen Entwicklungen: zum Beispiel in der digitalen Transformation der industriellen Produktion, im zunehmenden Onlinehandel, in der wachsenden Dynamik bei *Sharing*-Plattformen und *Internet of Things* (IoT), in Entwicklungen der Bereiche autonomer Verkehr, *Big Data*, IKT, KI oder in Anwendungen wie Kryptowährungen. Dabei verändert die Digitalisierung auf grundlegende Art und Weise, wie wir Menschen leben, wohnen, lernen, arbeiten und miteinander kommunizieren, wie wir produzieren und konsumieren und wie wir uns als Gesellschaft organisieren. Sie stellt uns damit vor neue politische, ökonomische, soziale, ökologische, kulturelle und ethische Herausforderungen, die in der breiten Gesellschaft diskutiert werden müssen.

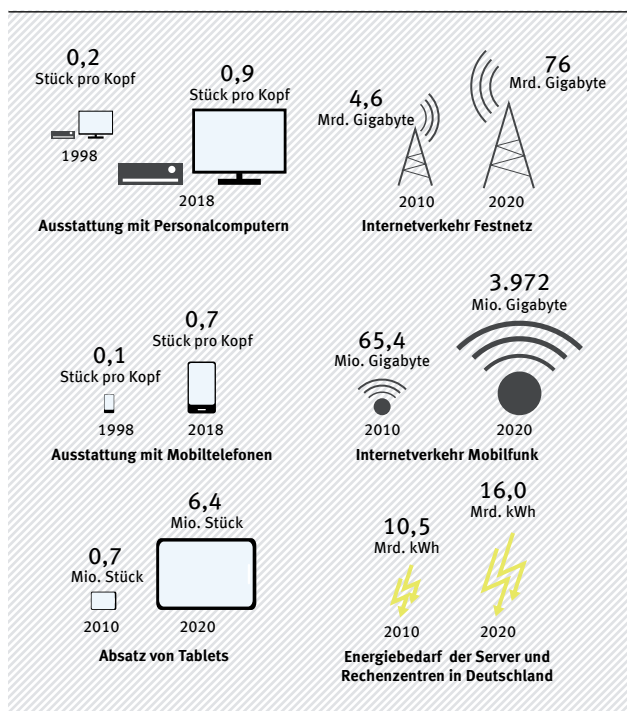
Die **ökologischen Auswirkungen** der immer rasanter voranschreitenden Digitalisierung nehmen derzeit noch zu wenig Raum in der Debatte ein. Der Digitalisierung wird einerseits ein enormes Potenzial bei der Entlastung der Umwelt zugetraut, etwa im Bereich

der „Industrie 4.0“. Dort können digitale Anwendungen schon heute zu Effizienzgewinnen und geringerem Energie- und Rohstoffbedarf führen. Umgekehrt beanspruchen digitale Produkte und Techniken selbst immer auch natürliche Ressourcen und haben entsprechende Umweltwirkungen. Der Wissenschaftliche Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU) erwartet beispielsweise, dass im Jahr 2050 dreimal so viel Kupfer nachgefragt wird wie im Jahr 2010 (WBGU 2019). Die Gewinnung von Metallen und seltenen Erden verursacht einen beträchtlichen Energieaufwand, es werden Chemikalien eingesetzt und es herrschen meist schlechte Arbeitsbedingungen (Buchert et al. 2019).

Die Ressourcenintensität des digitalen Wandels ist bisher noch nicht ausreichend erforscht – insbesondere angesichts der derzeitigen und zukünftigen Entwicklungen (Bsp. derzeitige Entwicklungen: Abb. 1). Das Umweltbundesamt beauftragte daher im Jahr 2020 ein Forschungsvorhaben (Abraham et al. 2023a; Abraham et al. 2023b), das die **Ressourcenintensität des digitalen Wandels** in Deutschland sowohl auf der Mikro- als auch auf der Makroebene untersuchen sollte.

Abbildung 1

Entwicklung der Informations- und Kommunikationstechnologie in Deutschland



Quelle: Lutter et al. 2022 (S. 50)

Ziel des Vorhabens „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“ (kurz: **DigitalRessourcen**) war es, das Wissen über die Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland zu verbessern. Außerdem sollte es Handlungsoptionen im Hinblick auf eine nachhaltige, umwelt- und ressourcenschonende Gestaltung der Digitalisierung und ihrer zukünftigen Entwicklung ableiten.

Das Vorhaben wurde im Zeitraum 2020 bis 2023 von einem Konsortium der Ramboll Management Consulting GmbH (Ramboll), der Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung (GWS), des Fraunhofer-Instituts für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS und des Deutschen Instituts für Normung (DIN) bearbeitet. Die vorliegende Broschüre stellt die Kernergebnisse des Forschungsvorhabens kurz vor. **Die ausführlichen Ergebnisse des Forschungsvorhabens finden sich in dem abschließenden Bericht (Abraham et al. 2023a) und dem Anhang (Abraham et al. 2023b)** (vgl. auch www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen).

2 Digitalisierung und natürliche Ressourcen – eine Bestandsaufnahme

Zu Beginn der Arbeiten im Forschungsvorhaben wurden aktuelle wissenschaftliche Arbeiten recherchiert und ausgewertet, die einen engen Bezug zur Schnittstelle der Themen Digitalisierung und Ressourcenschonung aufweisen. Ergänzend wurde ein Überblick zur aktuellen umwelt- bzw. ressourcenpolitischen Diskussion des Themas Digitalisierung erarbeitet.

Bei der **Analyse der wissenschaftlichen Arbeiten** waren Beiträge von besonderem Interesse, die sich mit dem Thema Ressourcennutzung und Digitalisierung bereits beschäftigt und dabei quantitative Ergebnisse im Hinblick auf die Ressourcenfrage erzielt hatten. Im Forschungsvorhaben wurden Ergebnisse von annähernd 100 Studien auf Mikro- und Meso-/Makroebene recherchiert und ausgewertet.

Die **Mikroebene** wird in den meisten Studien in Form von Ökobilanzierungen (engl. *life cycle assessment*, LCA) mit Fokus auf dem Energieverbrauch bzw. klimarelevanten Emissionen behandelt. Dabei ist die Verwendung von Ökobilanzdaten häufig mit Unsicherheiten behaftet, da sie mit dem hohen Tempo der technologischen Digitalisierung nicht Schritt halten können. Auch aufgrund der jeweils spezifischen Erhebungsmethodik waren Daten aus Ökobilanzierungen selten nutzbar. Einige Arbeiten untersuchen bereits die Ressourceneffizienz digitaler Produkte und Technologien, wobei der Schwerpunkt auf dem Potenzial für Ressourceneinsparungen liegt, weniger auf der Ressourcenintensität. Nur wenige aktuelle Forschungsprojekte beschäftigen sich dezidiert mit der Berechnung und Vorhersage der Ressourcenintensität des digitalen Wandels.

Auf der Mikroebene wurden nicht nur wissenschaftliche Publikationen ausgewertet, sondern ein breites Spektrum an Daten und Informationsquellen, wie beispielsweise Berichte von Bundesbehörden, Datenbankeinträge und Daten von privaten Interessengruppen. Die so gewonnenen Erkenntnisse wurden genutzt, um valide Aussagen über die Verfügbarkeit von Daten zu bestimmten Produkten und Elementen der Digitalisierung treffen zu können. Außerdem wurde untersucht, welche Software, Berechnungsmethoden und Datenbanken sich am besten für die Analyse auf der Mikroebene eignen.

Auf der **Meso- und Makroebene** wurden wissenschaftliche Studien ausgewertet, die sich aus sektoraler oder gesamtwirtschaftlicher Perspektive mit dem Nexus aus Digitalisierung und Ressourceninanspruchnahme auseinandersetzen. Bisherige Studien analysierten meist die Ressourceneinsparpotentiale durch digitale Technologien, so auch beispielsweise das Gutachten von Neligan et al. (2021). Es wurden insbesondere zwei für das Forschungsvorhaben relevante Vorarbeiten identifiziert: eine Analyse vergangener Trends bei der Nutzung von Informations- und Kommunikationsprodukten in der Schweiz von Cabernard (2019) sowie ein Gutachten des wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung, das die zukünftige Entwicklung von Ressourceninanspruchnahmen durch die Nutzung digitaler Anwendungen beschreibt (WBGU 2019). Die Analyse verfügbarer Datenbanken führte zur Auswahl der Datenbank GLORIA („*Global Resource Input-Output Assessment*“, Lenzen et al. 2022) als Grundlage der makroökonomischen Berechnungen in diesem Vorhaben.

Die Digitalisierung hat in Deutschland seit vielen Jahren hohe politische Priorität. Die **umwelt- bzw. ressourcenpolitische Diskussion** des Themas zeigt sich beispielsweise in der 2022 beschlossenen „Digitalstrategie Deutschland – Gemeinsam digitale Werte schöpfen“, die unter anderem eine nachhaltige und ressourcenschonende Digitalisierung anstrebt. Im Jahr 2020 entwickelte das BMUV die „Umweltpolitische Digitalagenda“, mit dem Ziel, die Chancen der Digitalisierung zu nutzen und sie gleichzeitig umweltfreundlich zu gestalten. Das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) enthält Maßnahmen für mehr Ressourceneffizienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette. Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS, derzeit in Erarbeitung) soll Ziele und Maßnahmen für zirkuläres Wirtschaften und für Ressourcenschonung definieren. Auch auf europäischer und internationaler Ebene bestehen bereits zahlreiche politische Programme und Aktionspläne in Bezug auf Digitalisierung und Ressourcen, darunter der *European Green Deal*, der den Rahmen für eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung setzt. Zudem beeinflussen Initiativen wie der digitale Produktpass oder das Recht auf Reparatur die weitere Ausgestaltung der Digitalisierung.

3 Systemgrenzen der Digitalisierung

Für die in diesem Vorhaben durchgeführten Berechnungen auf Mikro- und Makroebene (s. im Folgenden) war es besonders wichtig, zunächst die **System- und Betrachtungsgrenzen** des Themas Digitalisierung zu erörtern und festzulegen. Laut Projektauftrag sollte analysiert, diskutiert und definiert werden, was in diesem Vorhaben ganz genau unter Digitalisierung zu verstehen ist und welche System- und Betrachtungsgrenzen gelten.

Auf rein technischer Ebene steht Digitalisierung für die Umwandlung von analogen Informationen in digitale Signale. Digitalisierung im Sinne von digitaler Transformation beschreibt darüber hinaus einen umfassenden Prozess, der die Automatisierung bestehender industrieller Abläufe und sogar deren Obsoleszenz einschließt. Ferner steht Digitalisierung im Sinne des digitalen Wandels für tiefgreifende Veränderungen in der Industrie sowie weitreichende und strukturelle Auswirkungen auf die Gesellschaft.

Für das Forschungsvorhaben wurde ein **konzeptionelles Betrachtungsmodell** entwickelt. Es besteht aus verschiedenen, sich gegenseitig beeinflussenden Teilsystemen und berücksichtigt so die Vielfalt digitaler Lösungen und Anwendungsbereiche, deren

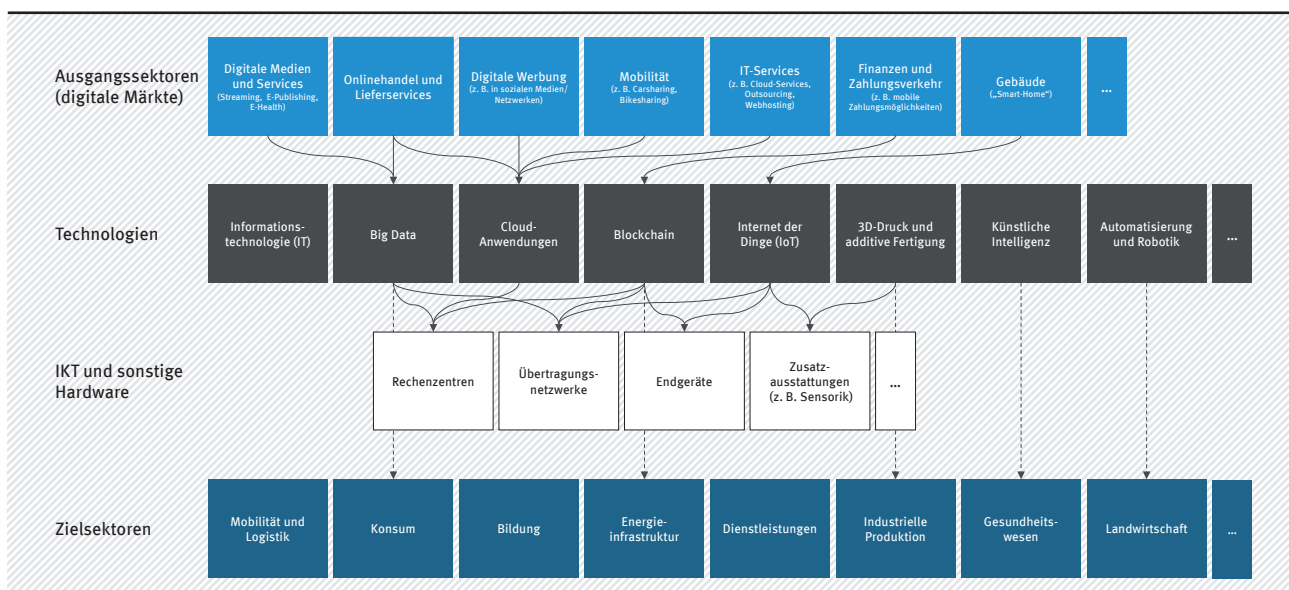
dynamische Wechselwirkungen und die Komplexität des Systems Digitalisierung (Abb. 2). Die Ausgangs- und Zielsektoren bilden den Rahmen des Betrachtungsmodells, erweitert um die notwendigen Technologien sowie die benötigte Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) und Hardware (direkte Effekte).

Auf der **Mikroebene** lassen sich einzelne Beziehungen des komplexen Systems Digitalisierung nur innerhalb eines bestimmten Anwendungsfalls genauer untersuchen. Die dafür entwickelten Fallstudien (Kap. 4) wurden so gewählt, dass sie ein weites Spektrum der Digitalisierung (Ausgangs- oder Zielsektoren) abbilden. Der Fokus lag dabei auf spezifischen digitalen Anwendungen, die ihrerseits digitale Produkte, Technologien etc. benötigen.

In den **makroökonomischen Input-Output-Modellierungen** wurden sämtliche Verwendungen von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland als direkte Effekte der Digitalisierung erfasst (Kap. 5). Dazu wurde eine **funktionale Abgrenzung** des gesamtwirtschaftlichen Digitalisierungssystems vorgenommen. Die Schwierigkeit lag darin, dass die Umsätze digitalisierungsrelevanter

Abbildung 2

Systemverständnis der Digitalisierung im Forschungsvorhaben



Quelle: Eigene Darstellung



Quelle: mh – stock.adobe.com

Wirtschaftszweige normalerweise aggregiert ausgewiesen sind. Daher wurden im Forschungsvorhaben individuelle Anteilswerte für IKT-Güter und IKT-Dienstleistungen berechnet. Das komplexe Zusammenspiel der Digitalisierung sollte über unterschiedliche Ausgangs- und Zielsektoren möglichst

umfassend abgebildet werden. Zu diesem Zweck wurden sowohl die Endnachfrage als auch die Vorleistungsnachfrage nach IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen als Zielsektoren im Sinne von Abb. 2 gesamtwirtschaftlich vollständig erfasst und strukturiert bewertet.

4 Die Mikroebene: zehn Fallstudien zu Lebenszyklusdaten digitaler Anwendungsfälle

Für die Arbeiten des Vorhabens DigitalRessourcen auf Mikroebene sollten insgesamt zehn Fallstudien beispielhaft behandelt werden. Die jeweilige Ressourcenintensität (verschiedene Indikatoren) und das Treibhausgaspotenzial (CO₂-Äquivalente) waren konkret zu berechnen.

Die **Auswahl der Fallstudien** erfolgte anhand verschiedener Kriterien. Die Fallstudien sollten repräsentativ sein und die Breite des Themas Digitalisierung abbilden. Sie sollten relevante Produkte und Technologien behandeln, die direkt durch Endverbraucher*innen genutzt werden. Die Verfügbarkeit von Informationen und Daten zu Produktherstellung und -nutzung war ein weiteres wichtiges Auswahlkriterium. Für jede Fallstudie wurde ein konkreter Anwendungsfall definiert. Dann wurde jeweils erhoben, welche Technologien, Hardware und Software beim konkreten Service für Endverbraucher*innen zum Einsatz kommen (Tab. 1).

Die Ressourcenintensität wurde in allen Fallstudien für vorher einheitlich festgelegte **Indikatoren berechnet**. Ergänzend wurden die Anwendungsfälle hinsichtlich ihrer aktuellen und zukünftigen **gesellschaftlichen Bedeutung** sowie ihres **theoretischen Umweltentlastungspotenzials** qualitativ eingeordnet.

Die **Vorgehensweise bei der Berechnung** der Ressourcenintensität und weiterer Indikatoren orientierte sich grundsätzlich an der Erstellung einer Ökobilanzierung (engl. *life cycle assessment*, LCA) nach DIN EN ISO 14040/44 (DIN EN ISO 14040:2021-02). Allerdings lag bei der Auswertung der Berechnungsergebnisse in diesem Vorhaben das Augenmerk auf der Sachbilanzebene und entsprechenden ein- und ausgehenden Ressourcen (Schwerpunkt) und Emissionen (am Beispiel CO₂-Äq.). Für die Berechnung der festgelegten Ressourcen-Indikatoren in der Analyse der Fallstudien kam die **Software OpenLCA**¹ in Kombination mit der **Ecoinvent Datenbank** (Version 3.8)² für Lebenszyklusdaten zum Einsatz (Wernet et al. 2016).

Die in allen Fallstudien betrachteten Indikatoren sind der **Primärrohstoffeinsatz** (RMI, engl. *raw material input*)³, der **Gesamtprimärmaterialaufwand** (TMR, engl. *total material requirement*)³, der kumulierte **Energiebedarf** (CED, engl. *cumulative energy demand*), der **Wasserfußabdruck** (WDP, engl. *water depletion potential*), das **Landnutzungspotenzial** (LOP, engl. *land occupation potential*) und ergänzend das **Treibhausgaspotenzial** (GWP, engl. *global warming potential*) (Abb. 3). Im Falle des RMI wurden zudem in jeder Fallstudie die jeweils verwendeten **Massenrohstoffe** (z. B. Ganggestein, Stein- und Braunkohle, Rohöl, Schiefer) diskutiert. Ein besonderes Augenmerk beim RMI lag außerdem auf kritischen Rohstoffen wie etwa Technologiemetallen oder seltenen Erden. Diese für die Digitalisierung relevanten Rohstoffe sind trotz ihrer meist untergeordneten Masse von besonderer strategischer Bedeutung und stehen in vielen Fällen mit schwerwiegenden Umweltwirkungen (ökologisch wie sozial) in Verbindung (Jacob et al. 2021; Kristof und Henricke 2010; Liu et al. 2019). Für die Betrachtungen der Fallstudien wurden daher im Vorhaben insgesamt 27 **digitalisierungsrelevante Rohstoffe** definiert, die in jeder Fallstudie rechnerisch zu bestimmen waren. Darunter sind Rohstoffe, die bei der Erzeugung von digitaler Technik eine besondere Rolle spielen: beispielsweise Gallium (ein Bestandteil von elektronischen Bauteilen wie Transistoren, integrierten Schaltkreisen in Mobiltelefonen oder von Leuchtdioden (LED)), Tantal (für die Herstellung von kleinen Kondensatoren wie in Mobiltelefonen) und Neodym (Teil von Permanentmagneten in Kopfhörern und Lautsprechern oder Festplatten).

Die Auswahl dieses Indikatorensets stellte sicher, dass relevante direkte Umwelteffekte im Sinne einer Sachbilanzierung betrachtet wurden. So wurde die Ressourcenintensität der Inputseite der Anwendungsfälle anhand von vier Ressourcenfußabdrücken (Material, fossile Energie, Wasser, Land) umfassend beurteilt. Auf der Outputseite wurde eine besonders relevante Umweltwirkung – die Erderwärmung durch

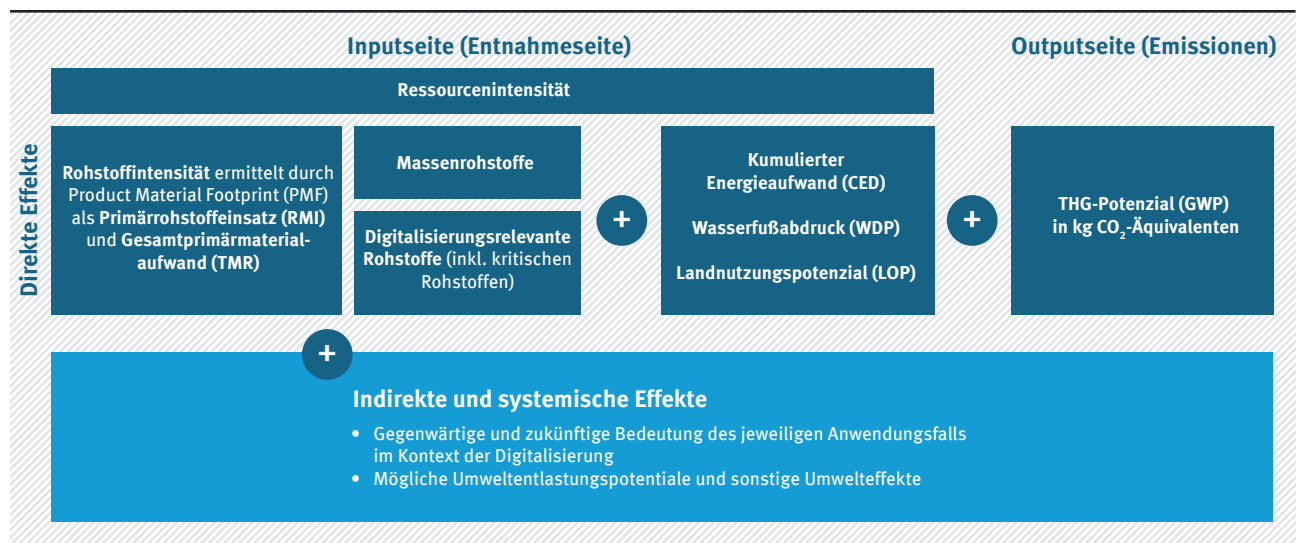
¹ <https://www.openlca.org> (Stand: 15.12.2022)

² <https://support.ecoinvent.org/ecoinvent-version-3.8> (Stand: 14.12.2023)

³ RMI und TMR werden als Indikatoren meist auf makroökonomischer Ebene verwendet. In diesem Vorhaben wurden sie in Anlehnung an die angewandte Methodik von Mostert und Bringezu (2019) auch für die Analysen auf Mikroebene verwendet.

Abbildung 3

Indikatorenset für die Analyse im Rahmen der Fallstudien



Quelle: Eigene Darstellung nach Mostert und Bringezu (2019)

Treibhausgase – betrachtet. Weitere Umwelteffekte lagen nicht im Fokus des Vorhabens oder konnten aufgrund fehlender Daten und Nachvollziehbarkeit nicht bestimmt werden.

Zusätzlich wurde jede Fallstudie durch eine qualitative Einordnung der Anwendungsfälle hinsichtlich ihrer aktuellen und zukünftigen **gesellschaftlichen Bedeutung** sowie ihres theoretischen **Umweltentlastungspotenzials** (indirekte und systemische Effekte) bewertet.

Abbildung 3 zeigt das in diesem Forschungsvorhaben angewendete Indikatorenset für die Analyse im Rahmen der zehn Fallstudien.

Darüber hinaus gingen Informationen aus weiterer Literatur (u. a. wissenschaftlichen Publikationen, einschlägigen Forschungs- und Projektberichten, grauer Literatur und Foresight-Studien) in die Berechnungen bzw. Analyse der Fallstudien ein und dienten als Referenz für die Interpretation und Diskussion der berechneten Ergebnisse. Die zu **untersuchende Einheit** und die Betrachtungsgrenzen wurden für jede Fallstudie individuell definiert.

Bei allen Fallstudien wurden Rahmenbedingungen für den Einfluss der Rechenzentren, die betrachteten Lebenszyklen und die Nutzung multifunktionaler Geräte definiert. Die Herstellung von Rechenzentren und anderer Netzinfrastruktur wurde dabei nur überschlägig und in ausgewählten Fallstudien einbezogen. Die Ressourcenbedarfe wurden, angelehnt an die LCA-Methodik, ihrem Zeitpunkt der Entstehung im Lebenszyklus – jedoch hauptsächlich nur der Herstellungs- oder Nutzungsphase – zugeordnet. Das Lebensende (engl. *end-of-life*) wurde nur dann betrachtet, wenn es eine besondere Rolle spielte. Für multifunktionale Geräte wurde außerdem eine nutzungszeitbasierte Allokation vorgenommen.

Die Ergebnisse der Fallstudien

Für jede Fallstudie wurden Informationen zur Fallstudie, zur Untersuchungseinheit sowie die Ergebnisse der analysierten Indikatoren und eine Diskussion zusammengestellt. Die zehn Fallstudien sowie die hauptsächlichsten Ergebnisse sind in dieser Broschüre lediglich als Übersicht zusammengefasst (Tab. 1). Exemplarisch werden anschließend die wesentlichen Inhalte der Fallstudie „Videokonferenz im Home-office“ detaillierter präsentiert.

Tabelle 1

Übersicht über die betrachteten zehn Fallstudien

Themengebiet der Fallstudie	Anwendungsfall	Ergebnisse für ausgewählte Indikatoren im Vorhaben DigitalRessourcen		Überblick ^a
1. Videokonferenz im Homeoffice	Teilnahme einer Person an einer einstündigen Gruppen-Video-Konferenz im beruflichen Kontext	RMI: 116 g CED: 1,03 MJ WDP: 0,85 L	TMR: 134 g GWP: 70 g CO ₂ -Äq. LOP: 0,0044 m ² a	H > N ↑
2. Smart-Home-System	Fünffährige Nutzung eines Energiemanagementsystems für Gebäude	RMI: 2.938,11 kg CED: 40.795 MJ WDP: 14,61 m ³	TMR: 3.698,8 kg GWP: 2.321,8 kg CO ₂ -Äq. LOP: 123,1 m ² a	H < N ↔ (!)
3. Digitale Medien	30-minütiges Lesen von Nachrichten auf einem digitalen Endgerät	RMI: 47,1 g CED: 0,47 MJ WDP: 0,00045 m ³	TMR: 54,8 g GWP: 0,03 kg CO ₂ -Äq. LOP: 0,0016 m ² a	H > N ↑ (!) ↻
4. E-Grocery	Durchführung, Bereitstellung und Lieferung einer Online-Lebensmittelbestellung ^c	RMI: 5,6 – 17,2 kg CED: 82,5 – 286,3 MJ WDP: 0,02 – 0,08 m ³	TMR: 7,4 – 22,9 kg GWP: 4,2 – 15,1 kg CO ₂ -Äq. LOP: 1,6 – 3,5 m ² a	↑ (!)
5. Carsharing	Fahrt im Carsharing Auto über einen Kilometer ^c	RMI: 291,4 – 436,4 g CED: 2,67 – 3,90 MJ WDP: 0,0006 – 0,0015 m ³	TMR: 363,8 – 561,4 g GWP: 76,4 – 232,2 g CO ₂ -Äq. LOP: 0,0062 – 0,0126 m ² a	H > N (exempl. Szenario) ↑ ↻
6. Kryptowährung ^b	Betrieb des Bitcoin-Netzwerks über ein Jahr ^d	RMI: 38,1 Mt CED: 641 PJ WDP: 0,16 km ³	TMR: 44,8 Mt GWP: 33,7 Mt CO ₂ -Äq. LOP: 618 km ² a	↓ (!)
7. Consumer-to-Consumer-Plattform	Verkauf eines T-Shirts über eine C2C-Plattform inkl. Versand bzw. Abholung ^c	RMI: 0,46 – 3,91 g CED: 5,77 – 50,63 MJ WDP: 0,005 – 0,008 m ³	TMR: 0,58 – 4,64 g GWP: 0,31 – 3,33 g CO ₂ -Äq. LOP: 0,12 – 0,15 m ² a	H > N (exempl. Szenario) ↑ (!) ↻
8. E-Sport	Eine Stunde Gaming und Streaming von League of Legends (LoL)	RMI: 3,07 kg CED: 45 MJ WDP: 0,02 m ³	TMR: 3,92 kg GWP: 2,54 kg CO ₂ -Äq. LOP: 0,13 m ² a	H < N ↓ (!)
9. Privater 3D-Druck	77 Stunden Nutzung eines 3D-Druckers für den Heimgebrauch	RMI: 353,74 kg CED: 2.224,6 MJ WDP: 1,06 m ³	TMR: 437,98 kg GWP: 148,09 kg CO ₂ -Äq. LOP: 9,08 m ² a	H > N ↓
10. E-Health	16 Stunden Nutzung einer Smartwatch in Kombination mit einem Smartphone	RMI: 58,6 g CED: 0,95 MJ WDP: 0,0003 m ³	TMR: 77,1 g GWP: 53 g CO ₂ -Äq. LOP: 0,0025 m ² a	H < N ↓

Abkürzungen: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO₂-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

^a Symbole: H > N zeigt, ob der Einfluss der Herstellungsphase (H) oder Nutzungsphase (N) auf die Umweltindikatoren überwiegt, ↑ Umweltentlastungspotenzial, ↔ geringes bis kein Umweltentlastungspotenzial, ↓ Umweltbelastungspotenzial, (!) die Ausgestaltung des Anwendungsfalls hat großen Einfluss, ↻ Rebound-Potenzial

^b In allen Fallstudien wird die Herstellungsphase (H) und Nutzungsphase (N) betrachtet. Wegen der mangelnden Datenlage konnte die *end-of-life*-Phase nicht berücksichtigt werden. Aufgrund der erwarteten hohen Relevanz des Lebensendes wurde diese in der Fallstudie Kryptowährung abgeschätzt. Es konnte keine Aussage über das Verhältnis der Einflüsse von H und N getroffen werden.

^c In dieser Fallstudie wurden verschiedene Szenarien betrachtet, Ergebnisse für die Indikatoren werden als Spannweite über die Szenarien angegeben.

^d In dieser Fallstudie wurden verschiedene Szenarien betrachtet. Hier sind Ergebnisse des „Standardszenarios“ gezeigt.

Quelle: Eigene Berechnungen

Das Beispiel der Fallstudie „Videokonferenz im Homeoffice“



Quelle: Wikimedia No. P060782-6183

Hintergrund: Bereits vor der COVID-19-Pandemie haben Umfragen ergeben, dass der Homeoffice-Anteil in Deutschland weiter steigen könnte. Mit dem Ausbruch der Pandemie hat sich die Arbeit im Homeoffice weiter verbreitet und fest etabliert. Die Akzeptanz für mobiles Arbeiten wird voraussichtlich weiter zunehmen, da sowohl Arbeitgeber*innen als auch Arbeitnehmer*innen die Flexibilität und Effizienz des Homeoffice schätzen. Videokonferenzen werden auch im privaten Umfeld immer stärker genutzt, da sie eine ansprechende Möglichkeit bieten, trotz weiter Entfernungen miteinander kommunizieren und dabei einander sehen zu können.

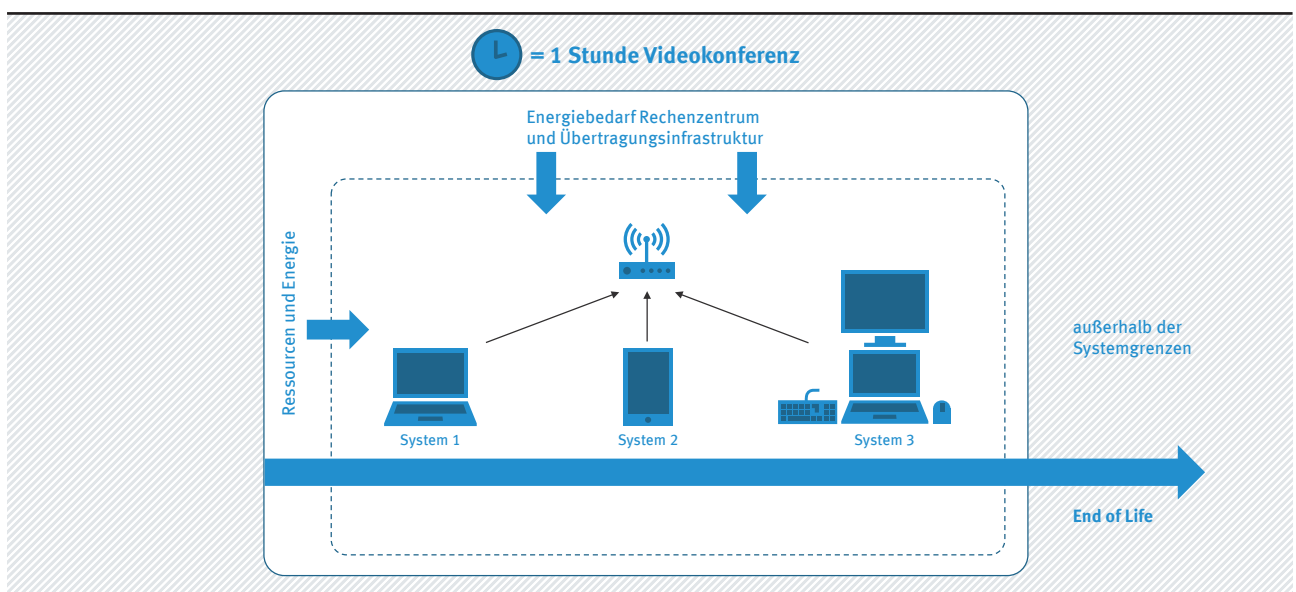
Als **Untersuchungseinheit** wurde die einstündige Teilnahme an einer Gruppen-Videokonferenz mit einem Mix aus drei gängigen Gerätekombinationen aus dem beruflichen Kontext festgelegt: System 1: Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon, System 2: Smartphone, System 3: Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon, externer Monitor, externe Tastatur, optische PC-Maus (Abb. 4).

Ergebnisse der Berechnungen: Bezogen auf die Untersuchungseinheit „1 Stunde Videokonferenz im Homeoffice“ wurde ein gesamter **Rohstoffaufwand** (RMI, engl. *raw material input*) in Höhe von **116 g/h** berechnet. Für die Herstellung der in einer Videokonferenz verwendeten Geräte werden mengenmäßig vor allem die Rohstoffe Ganggestein, Steinkohle, biotische Rohstoffe und Kies in Anspruch genommen. Bezieht man ungenutzte Entnahmen in die Berechnungen mit ein, beträgt der **Gesamtprimärmaterialaufwand** (TMR, engl. *total material requirement*) **134 g/h**.

Die übrigen Indikatoren wurden analog zu den Materialindikatoren berechnet (Abb.5). Eine Stunde Videokonferenz verursacht einen **Wasserfußabdruck** (WDP, engl. *water depletion potential*) von **0,85 L** und einen **Flächenfußabdruck** (LOP, engl. *land occupation potential*) von **44 cm²a**.

Abbildung 4

Untersuchungseinheit der Fallstudie „Videokonferenz im Homeoffice“

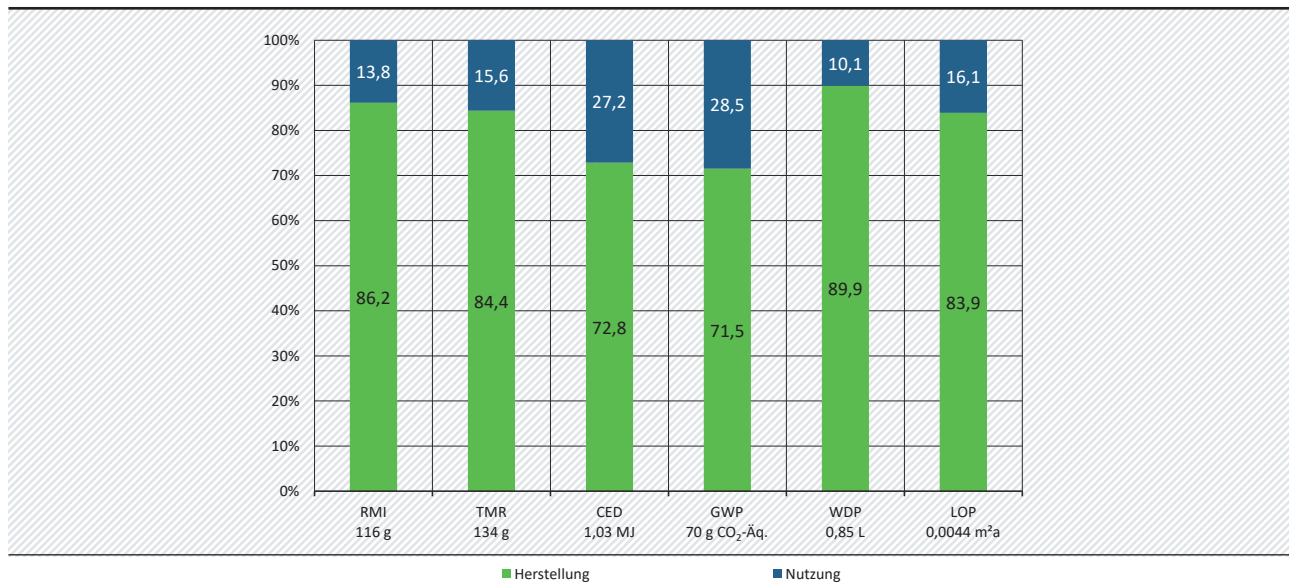


Verwendete Einflussgrößen für die Berechnung: Bandbreite Standardqualität 480 p, Download-/Upload-Geschwindigkeit 800 Kbps / 1 Mbps, Datenverbrauch 810 MB/h (Braun 2020), Energiebedarf für Server, Speicher, Netzwerk und Infrastruktur eines Rechenzentrums: 0,0041 kWh/h, Energiebedarf für Datenübertragung: 0,0016 kWh/ GB für eine VDSL-Verbindung (Gröger et al. 2021).

Quelle: Eigene Darstellung

Abbildung 5

Ressourcen- und LCA-Indikatoren im Vergleich nach Herstellungs- und Nutzungsphase für eine einstündige Videokonferenz



Anmerkung: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO₂-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

Quelle: Eigene Berechnungen

Der kumulierte Energieaufwand (CED, engl. *cumulative energy demand*) beträgt **1,03 MJ/h** und der CO₂-Fußabdruck (GWP, engl. *global warming potential*) **70 g CO₂-Äq./h**.

Die berechneten absoluten Werte der Indikatoren für eine Stunde Videokonferenz wurden nach Herstellungs- und Nutzungsphase unterteilt. Bei allen untersuchten Indikatoren **dominiert die Herstellungsphase**, jedoch mit unterschiedlichen Anteilen. Beispielsweise ergibt sich beim **RMI** ein Anteil von 86 % für die Herstellungsphase der Geräte. Der TMR verhält sich ähnlich. Beim WDP und LOP erreicht

der Anteil der Nutzungsphase fast 30 %, beim CED und GWP macht die Nutzungsphase weniger als 20 % aus.

Diskussion der Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Fallstudien

Bei der Diskussion der Ergebnisse aus den Fallstudien und bei etwaigen Schlussfolgerungen sind die gewählten System- und Betrachtungsgrenzen sowie die gewählte Untersuchungseinheit zu beachten. Die Ergebnisse zeigen je nach Fallstudie bei den Haupttreibern des Ressourcenbedarfs und des Treibhausgaspotenzials ein **diverses Bild**. Bei einigen

Digitalisierungsrelevante Rohstoffe

Diese Rohstoffe spielen allokiert auf die Untersuchungseinheit mengenmäßig mit rund **0,26 g/h Videokonferenz** kaum eine Rolle. Allerdings sind sie rohstoffstrategisch und politisch von großer Bedeutung, weil sie geologisch selten sind und von Ländern wie Deutschland zum Teil nur eingeschränkt bezogen (importiert) werden können. In der Fallstudie „Videokonferenz im Homeoffice“ macht Kupfer mit rund **0,13 g/h** die größte Menge der digitalisierungsrelevanten Rohstoffe aus. Zu den weiteren digitalisierungsrelevanten Rohstoffe gehören u. a. Zinn und Silber. Betrachtet man die Verteilung der digitalisierungsrelevanten Rohstoffe auf einzelne Komponenten des Systems Videokonferenz, fällt auf: Über 95 % des Lithiumbedarfs entfallen auf den Laptop, über 80 % des Bedarfs an Tantal auf den Monitor.

Anwendungsfällen entfällt der Großteil des Ressourcenaufwands auf die Herstellungsphase (z. B. Videokonferenz und 3D-Druck). Bei anderen Fallstudien geht der Ressourcenaufwand hauptsächlich auf die Nutzungsphase zurück (z. B. Smart-Home und E-Sport).

Die **Nutzungsphase** ist in allen Fallstudien vom Strombedarf des Anwendungsfalls geprägt. Je nach Fallstudie dominiert der **Strombedarf** der Endgeräte bei den Anwendenden oder der Strombedarf der Datenübertragung (inklusive Rechenzentren). Maßgeblich für den Ressourcenbedarf in der **Herstellungsphase** wiederum sind die verwendeten **Materialien** und die damit assoziierten Beschaffungs- und Herstellungsprozesse in den Vorketten. Je nach betrachtetem Produkt oder System schlagen sich die Ressourcenbedarfe in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen nieder. Beispielsweise sind die Ressourcenbedarfe für diverse Endgeräte eindeutig von den Phasen der Rohstoffentnahme bis zur Herstellung geprägt. Bei Rechenzentren hingegen trägt die Nutzungsphase beziehungsweise der Betrieb deutlich stärker zum abiotischen Ressourcenbedarf bei. Diese Ergebnisse decken sich mit vorangegangenen Analysen (Köhn et al. 2020).

Beim Blick auf die Aufteilung des Rohstoffbedarfs zwischen den Rohstoffgruppen zeigt sich, dass in allen Fallstudien **Metallerze** als Rohstoffinputs in der Herstellungsphase dominieren. Betrachtet man die Nutzungsphase zusätzlich oder ausschließlich, herrschen dort – aufgrund der durch fossile Energien dominierten Strommixe – meist **fossile Energieträger** vor. Unter den Massenrohstoffen ist in den meisten Fallstudien **Ganggestein** das am meisten abgebaute Material. Ganggestein fällt als Nebenprodukt beim Erzabbau zwangsläufig mit an, sodass hier im Vergleich z. B. zu Energieträgern große Mengen nicht verwundern. Andere Rohstoffe, die in den Fallstudien ihrer Masse nach zu den **wichtigsten Materialien** gehören, sind in unterschiedlicher Reihenfolge und Gewichtung: Stein- und Braunkohle, Kies, Schiefer, Sand und Rohöl.

Bei den digitalisierungsrelevanten Rohstoffen stehen in fast allen Fallstudien **Gallium, Tantal, Gold, Silber, Zinn, Nickel** und teils **Lithium** sowie

Scandium heraus. Kritisch im Sinne der EU-Klassifikation (Europäische Kommission 2020; die im März 2023 aktualisierte Liste kritischer Rohstoffe (Europäische Kommission 2023) konnte im Rahmen dieses Vorhabens nicht mehr berücksichtigt werden) sind Gallium, Tantal und Lithium. Gold, Silber, Nickel und Zinn sind jedoch zur Herstellung verschiedenster IKT-Komponenten ebenfalls essenziell. Die Haupttreiber des Bedarfs an digitalisierungsrelevanten Rohstoffen sind oft einzelne Geräte oder Komponenten des betrachteten Produktsystems. Beispiele dafür sind (Gaming-)Computer in der E-Sport-Fallstudie oder das Netzteil beim 3D-Drucker. Einzelne Rohstoffbedarfe gehen fast ausschließlich auf bestimmte Endgeräte oder Komponenten zurück. Ein Beispiel dafür ist der Lithiumbedarf zur Herstellung der Laptopbatterie in der Fallstudie zur Videokonferenz.

Alle Fallstudien analysieren sechs gleiche Indikatoren (Abb. 3). Dabei ist bemerkenswert, dass in jeder Fallstudie alle Indikatoren bei der Aufteilung zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase eine gleiche Tendenz aufweisen. Das heißt, innerhalb aller untersuchten Anwendungsfälle liegen die **Haupttreiber** der einzelnen Indikatoren in den gleichen Lebenszyklusphasen.

Unsicherheiten in der Analyse der Fallstudien ergeben sich vor allem aus der **Datenverfügbarkeit**. So kann zum Beispiel die Aktualität der Datensätze aus der LCA-Datenbank oftmals nicht mit der rasanten technischen Entwicklung bei digitalen Endgeräten mithalten.

Die Fallstudien sollten abschließend auch beleuchten, ob die jeweilige digitale Anwendung ein **Umweltentlastungspotenzial** mit sich bringt (Tab. 1). In einigen Fallstudien lässt sich das bejahen (vgl. Fallstudie Videokonferenz). Bei anderen Fallstudien dient der betrachtete Anwendungsfall lediglich der **Komfortsteigerung** (vgl. Fallstudie Smart-Home in den meisten Szenarien) oder einem zusätzlichen Konsumverhalten (vgl. Fallstudie 3D-Druck als Heimanwendung). Hier hat die digitale Anwendung in Bezug auf den Ressourcenbedarf und die Umweltwirkungen vermutlich keine Vorteile oder sogar einen negativen Einfluss. In diesen Fällen ist eine nachhaltige, ressourcen- und umweltschonende Gestaltung besonders wichtig.

5 Die Makroebene: Ressourcenintensität und CO₂-Emissionen des digitalen Wandels in den Jahren 2000 – 2020

Für die Berechnung der Umweltfolgen von Produktion und Konsum auf Meso- bzw. Makroebene sind grundsätzlich zwei unterschiedliche Vorgehensweisen denkbar: „**Bottom-up**“-Analysen beruhen auf einer – möglichst umfassenden – Liste derjenigen Güter und Dienstleistungen, die für das zu analysierende Gesamtsystem relevant sind. Für sämtliche ausgewählten Güter und Dienstleistungen werden daraufhin die jeweiligen Umweltwirkungen sehr detailliert erfasst. Auf Basis dieser individuellen Erfassung wird anschließend eine Hochrechnung auf Makro- oder Mesoebene durchgeführt. „**Top-down**“-Ansätze hingegen verzichten auf die detaillierte Betrachtung einzelner Güter und Dienstleistungen. Stattdessen erfolgt eine ausschließliche Analyse auf Makro- oder Mesoebene. Dabei werden beispielsweise die volkswirtschaftlichen Lieferketten und Nachfragestrukturen für ausgewählte Produktionssektoren und die von ihnen hergestellten Güter- und Dienstleistungsaggregate systematisch untersucht.

Sachbilanzen, wie sie in den „Fallstudien zu Lebenszyklusdaten digitaler Anwendungsfälle“ (Kap. 4) durchgeführt wurden, sind typische Beispiele für „**Bottom-up**“-Analysen. Sie zeichnen sich durch einen sehr hohen Detailgrad aus. Allerdings sind dafür äußerst viele Informationen notwendig. Daher erfolgten „**Bottom-up**“-Analysen nur für die Güter und Dienstleistungen bzw. digitalen Anwendungen, die zu einzelnen Fallbeispielen ausgewählt wurden. Für die gesamtwirtschaftliche Bewertung der umweltökonomischen Auswirkungen durch den digitalen Wandel erfolgten makroökonomische Berechnungen und Simulationen als eigenständige „**Top-down**“-Analysen (Kap. 5 und 6).

Methodik zur Analyse auf der Makroebene

Die makroökonomischen Grenzen des Systems „Digitalisierung“ wurden für die „**Top-down**“-Bewertungen im Forschungsvorhaben folgendermaßen festgelegt: Jegliche Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen (Informations- und Kommunikationstechnologien) in Deutschland wird als direkter Effekt der Digitalisierung erfasst. Diese Vorgehensweise folgt dem in Kap. 3 „Systemgrenzen der Digitalisierung“ eingeführten systemischen Verständnis.

In der Terminologie der makroökonomischen Buchungssystematiken aus den **Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen** (VGR) bedeutet dies: Als direkte Nachfrageeffekte gelten a) die Nachfrage sämtlicher volkswirtschaftlicher Wirtschaftszweige nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen als Vorleistungen in ihren jeweiligen Produktionsprozessen, b) die gesamte Endnachfrage in Deutschland nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen und c) die gesamte Exportnachfrage des Auslands nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen aus Deutschland.

Das Buchungssystem der VGR erfasst in standardisierter Weise aggregierte **Zahlungsströme** zwischen konzeptionell abgegrenzten Wirtschaftssektoren und unterschiedlichen Arten der Endnachfrage (Bruttoinvestitionen der Wirtschaft, Konsumausgaben des Staates, Konsumausgaben privater Haushalte und gemeinnütziger Institutionen, Exportnachfrage aus dem Ausland). Allerdings berichten die VGR nicht explizit über einen entsprechend abgegrenzten Digitalisierungssektor beziehungsweise über die Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen, die dieser Sektor bereitstellt. Daher wurden – angelehnt an den „Leitfaden zur Messung der Informationsgesellschaft“ (OECD 2011) – diejenigen Sektoren, die im Rahmen des Forschungsvorhabens direkt dem IKT-Bereich zuzuordnen sind, auf der Ebene individueller Gruppen der amtlichen Wirtschaftsstatistik definiert. Durch diese Auswahl lassen sich in den makroökonomischen Analysen die IKT-Dienstleistungsindustrie, der IKT-Handel, die IKT-Reparaturindustrie und die IKT-Fertigungsindustrie bewerten (Tab. 2).

Für sämtliche makroökonomischen Bewertungen im Vorhaben DigitalRessourcen wurde die globale **Multi-Regionale Input-Output(MRIO)-Datenbank GLORIA** („*Global Resource Input-Output Assessment*“) in der Version „Release 055“ vom März 2022 genutzt (Lenzen et al. 2017; 2022). Diese Datenbank wurde erst während des Forschungsvorhabens entwickelt. Sie entstand im Auftrag einer internationalen Institution (*International Resource Panel* der Vereinten Nationen) mit dem Ziel, eine frei zugängliche statistische Referenz für umweltökonomische Bewertungen zu entwickeln.

Tabelle 2

Abgrenzung des Digitalisierungssektors in den gesamtwirtschaftlichen Bewertungen

WZ 2008 Kode*	Analysierte Abteilungen und zugehörige Gruppen*
26.1	Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen: Herstellung von elektronischen Bauelementen und Leiterplatten
26.2	Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen: Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten und peripheren Geräten
26.3	Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen: Herstellung von Geräten und Einrichtungen der Telekommunikationstechnik
26.4	Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen: Herstellung von Geräten der Unterhaltungselektronik
26.8	Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen: Herstellung von magnetischen und optischen Datenträgern
46.5	Großhandel (ohne Handel mit Kraftfahrzeugen): Großhandel mit Geräten der Informations- und Kommunikationstechnik
58.2	Verlagswesen: Verlegen von Software
61	Telekommunikation
62	Erbringung von Dienstleistungen der Informationstechnologie
63.1	Informationsdienstleistungen: Datenverarbeitung, Hosting und damit verbundene Tätigkeiten; Webportale
95.1	Reparatur von Datenverarbeitungsgeräten und Gebrauchsgütern: Reparatur von Datenverarbeitungs- und Telekommunikationsgeräten

* Gruppen der Klassifikation der Wirtschaftszweige (Statistisches Bundesamt 2008), welche in den gesamtwirtschaftlichen Bewertungen der IKT-Branche zugeordnet wurden.

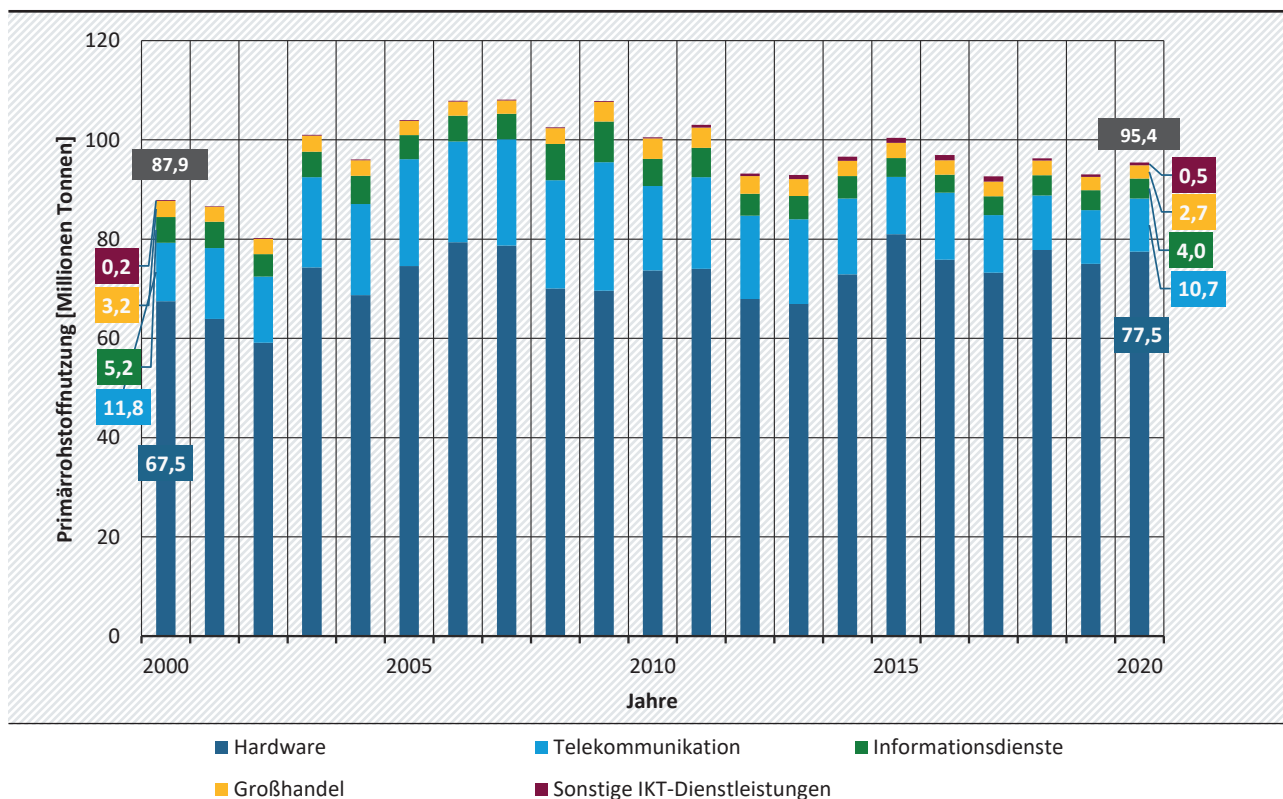
Eigene Darstellung in Anlehnung an OECD (2011)

Die Datenbank GLORIA verwendet die wirtschaftlichen Klassifikationen der VGR. Sie berichtet in standardisierter Weise nicht nur über die zuvor angesprochenen monetären Zahlungsströme zwischen Ausgangs- und Zielsektoren, sondern auch über entsprechende **physikalische Entwicklungen** (wie Rohstoffextraktionen oder CO₂-Emissionen). Die Datenbank hat einen räumlichen Berichtsumfang von 160 Ländern und 4 „Rest of World“-Regionen, umfasst den Zeitraum 1990 bis 2020, gliedert sich sektoral in 120 Wirtschaftsbereiche und enthält diverse Umweltfaktoren wie CO₂-Emissionen sowie insgesamt 62 Materialkategorien. Zu letzteren zählen bspw. fossile Energieträger, Erze, nicht metallische Mineralien, Biomasse etc. (Lenzen et al. 2017; 2022). Die Datenbank GLORIA war daher für das Forschungsvorhaben die erste Wahl.

Basierend auf der Datenbank GLORIA wurden für den deutschen Digitalisierungssektor (Tab. 2) für die Jahre

2000 bis 2020 neben monetären Strömen in unterschiedlichen konzeptionellen Abstimmungen folgende Indikatoren bestimmt und analysiert: der **Rohstoffkonsum** ($RMC_{Dig.}$, engl. *raw material consumption*), der Rohstoffeinsatz ($RMI_{Dig.}$, engl. *raw material input*) und die Kohlenstoffdioxid-Emissionen (hier bezeichnet als **CO₂-Fußabdruck der Digitalisierung**, $CO_{2,Dig.}$). Allgemein bildet der RMC die globale Inanspruchnahme von Primärrohstoffen zur Bereitstellung jener Güter und Dienstleistungen ab, die im Inland final verwendet werden. Berichtsgegenstand ist die Masse sämtlicher im Inland genutzter Primärrohstoffe. Zur Berechnung dieser Masse muss zu dem Gewicht sämtlicher Rohstoffe, die im Inland direkt der Natur entnommen werden, das Gewicht der über Importe insgesamt genutzten Primärrohstoffe addiert und von dieser Summe das Gewicht der Primärrohstoffe für Exporte ins Ausland subtrahiert werden. Um die über Importe und Exporte volkswirtschaftlich insgesamt genutzten Rohstoffmassen zu bestimmen, berechnete das

Abbildung 6

Analyse des Rohstoffkonsums (RMC_{Dig.}) der Digitalisierung in Deutschland

RMC_{Dig.}: Globale Inanspruchnahme von Primärrohstoffen zur Erzeugung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen für inländische Konsum-, Investitions- und Produktionsaktivitäten.

Quelle: Eigene Berechnungen

Forschungsvorhaben mithilfe von Detailinformationen aus GLORIA sogenannte **Rohstoffäquivalente**. Diese erfassen **sämtliche Primärrohstoffnutzungen während der Herstellungsphase entlang globaler Lieferketten**. Zwar gibt es bislang keine verbindlichen politischen Ziele für die langfristige Entwicklung des RMC. Dennoch hat sich dieser Indikator in der wissenschaftlichen Literatur als Berichtsgröße für internationale Vergleiche des Material-Fußabdrucks im Kontext der Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung fest etabliert (Lenzen et al. 2022). Die globale Summe sämtlicher nationaler RMC-Werte entspricht per Definition der Summe sämtlicher global genutzter Rohstoffextraktionen.

Der Rohstoffeinsatz (RMI) entspricht dem Rohstoffkonsum (RMC) **zuzüglich** sämtlicher globaler Inanspruchnahmen von Primärrohstoffen, mit denen aus dem Inland in andere Weltregionen exportierte Güter und Dienstleistungen bereitgestellt werden. In Analogie zum RMC berechnet der CO₂-Fußabdruck sämtliche CO₂-Emissionen, die global bei der Herstellung

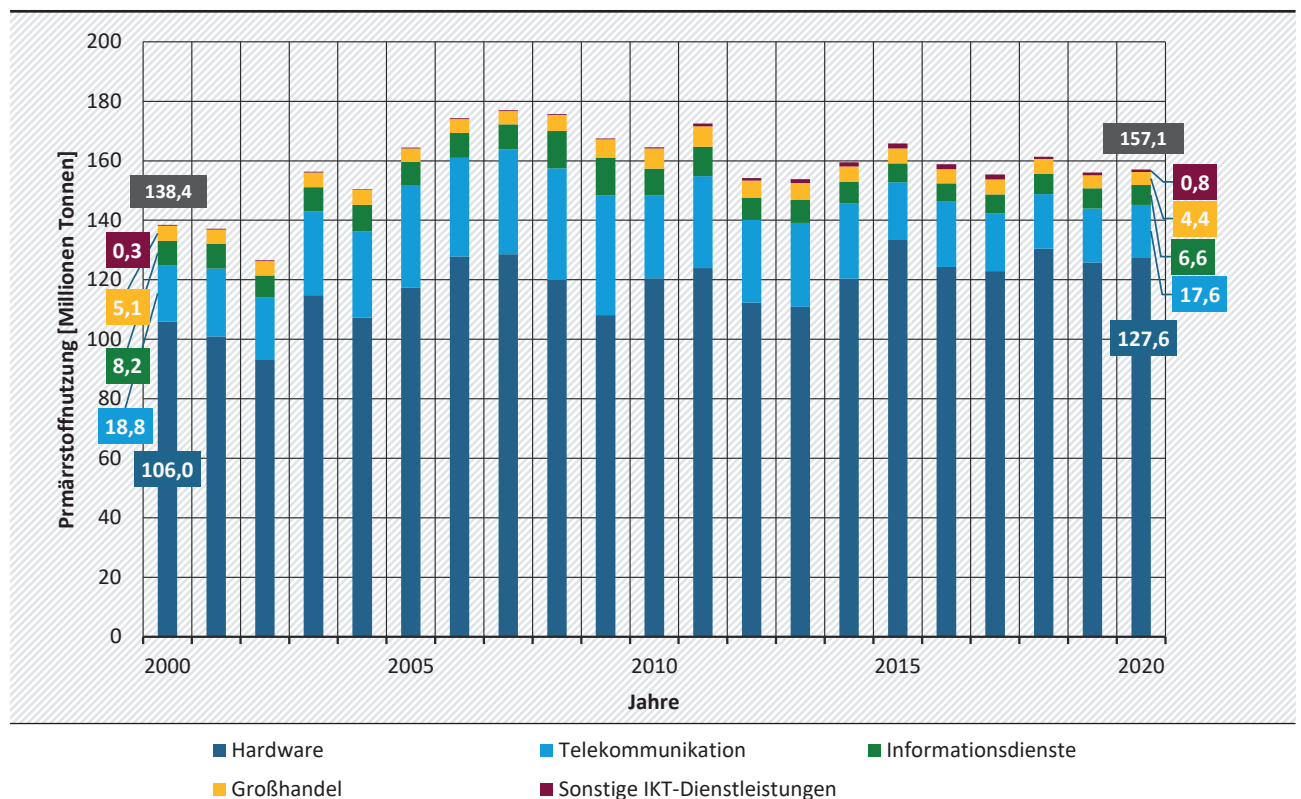
von im Inland final verwendeten Gütern und Dienstleistungen entstehen.

Die Ergebnisse der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung über die Jahre 2000 – 2020

Wie in Kap. 3 erläutert wurde, basieren die folgenden Ergebnisse auf einem Systemverständnis, das sowohl die makroökonomische Endnachfrage als auch die gesamte Vorleistungsnachfrage nach IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen vollständig erfasst. Im Vergleich zu anderen Fußabdruck-Bewertungen werden dadurch weiter gefasste Materialflüsse analysiert. Im Sinne der besseren Lesbarkeit behalten die konzeptionell erweiterten Indikatoren im Folgenden ihre Namen: Rohstoffkonsum (RMC_{Dig.}), Rohstoffeinsatz (RMI_{Dig.}) und CO₂-Fußabdruck (CO_{2,Dig.}) der Digitalisierung.

Der **Rohstoffkonsum** der Digitalisierung in Deutschland (RMC_{Dig.}) belief sich im Jahr 2020 auf **95,4 Millionen Tonnen** (Abb. 6). Von unter 88 Millionen Tonnen im Jahr 2000 ist dieser Wert bis zum Jahr 2020 um **ca. 8,5 % angestiegen**.

Abbildung 7

Analyse des Rohstoffeinsatzes ($RMI_{Dig.}$) der Digitalisierung in Deutschland

$RMI_{Dig.}$: Globale Inanspruchnahme von Primärrohstoffen zur Erzeugung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen für den inländische Konsum-, Investitions- und Produktionsaktivitäten sowie dem Export von Gütern und Dienstleistungen.

Quelle: Eigene Berechnungen

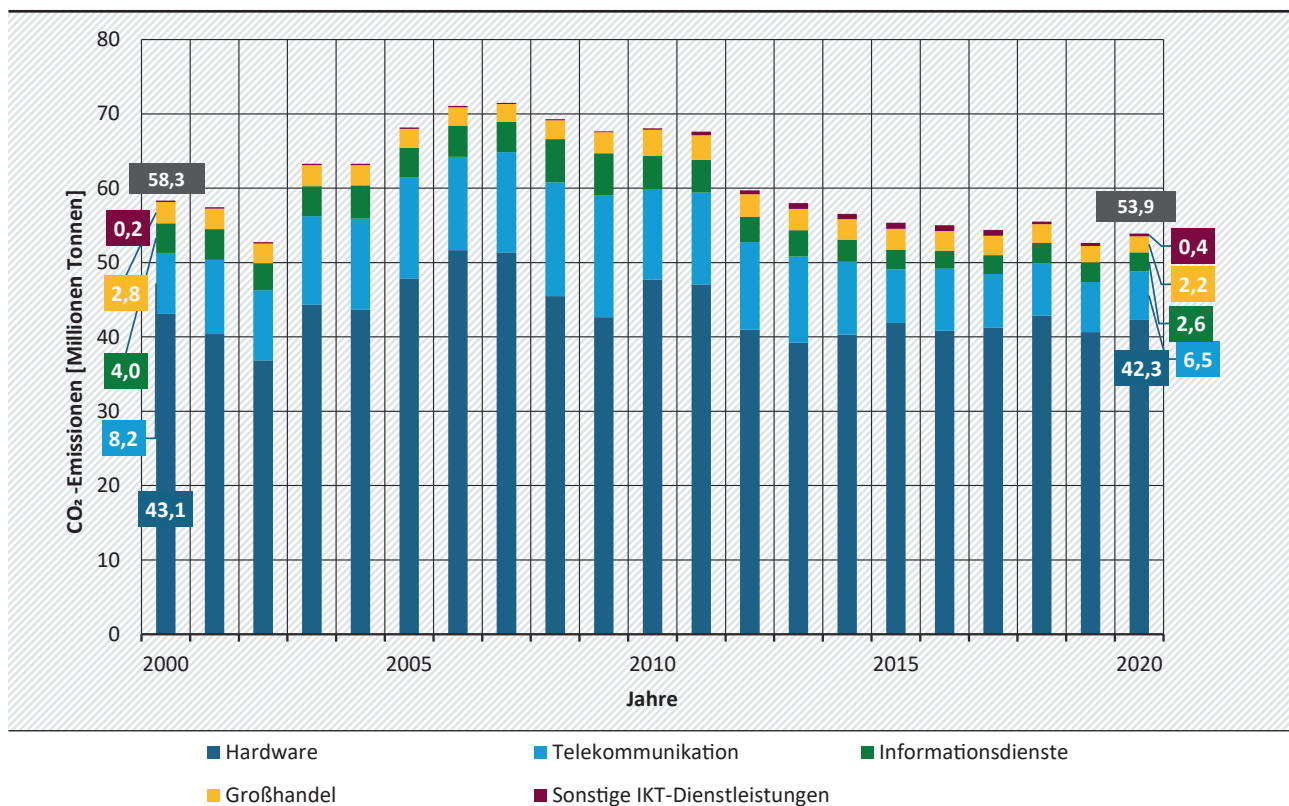
Während des gesamten Zeitraums ist die Entwicklung des $RMC_{Dig.}$ wesentlich durch die Nachfrage nach **Hardware** beeinflusst. Im Jahr 2020 verursachte diese Nachfrage mehr als 80 % des digitalen Rohstoffkonsums. Die IKT-Dienstleistungen verzeichnen deutlich geringere Werte. Davon entfällt auf Telekommunikationsdienstleistungen der größte verbleibende Anteil (ca. 11 % im Jahr 2020). Informationsdienstleister sowie der Groß- und Einzelhandel tragen ebenfalls merklich zum $RMC_{Dig.}$ bei, allerdings in deutlich geringerem Maße (Anteile im Jahr 2020: Informationsdienstleistungen 4,2 %, Großhandel 2,8 %).

Weiterführende eigene Berechnungen zeigen, dass die Digitalisierung in Deutschland auch in Relation zum gesamten RMC ihren Anteil vergrößert: Im Jahr 2000 verursachte der $RMC_{Dig.}$ ca. 4,3 % des gesamten deutschen RMC. Bis zum Jahr 2020 ist dieser **Anteil auf 5,6 %** angestiegen (gesamter deutscher RMC 2020: ca. 1.701 Millionen Tonnen).

Berücksichtigt man neben der heimischen Endnachfrage auch die Exportnachfrage aus dem Ausland – also den gesamten **Rohstoffeinsatz** der deutschen Wirtschaft für IKT-Güter und -Dienstleistungen ($RMI_{Dig.}$) –, ergibt sich für das Jahr 2020 ein Gesamtwert von **157,1 Millionen Tonnen**. Im Zeitraum 2000 bis 2020 ist der $RMI_{Dig.}$ um annähernd **13,5 % angestiegen** (Abb. 7). Während der Anteil von IKT-Dienstleistungen am Rohstoffeinsatz langfristig leicht zurückging, nahm der $RMI_{Dig.}$ aufgrund von Hardware zwischen 2000 und 2020 um gut 21 Millionen Tonnen zu. Im Jahr 2000 waren rund 76 % des $RMI_{Dig.}$ auf Hardware zurückzuführen, im Jahr 2020 schon über 81 %.

Auch der $RMI_{Dig.}$ hat in Relation zum gesamtwirtschaftlichem Rohstoffeinsatz über die Jahre an Bedeutung gewonnen: Nach 4,7 % am gesamten RMI im Jahr 2000 erreichte er im Jahr 2020 einen Anteil von 4,9 % (deutscher RMI 2020: 3.179 Millionen Tonnen).

Abbildung 8

Nachfrageseitige Analyse des CO₂, Dig.-Fußabdrucks der Digitalisierung in Deutschland

Quelle: Eigene Berechnungen

Analog zum digitalisierungsbedingten Rohstoffkonsum und zum Rohstoffeinsatz wurde in diesem Vorhaben auch der **CO₂-Fußabdruck** der Digitalisierung (CO₂, Dig.) mit dem Model GLORIA berechnet. Im Jahr 2020 summierten sich die CO₂-Emissionen zur Erzeugung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen für inländische Konsum-, Investitions- und Produktionsaktivitäten insgesamt auf einen Wert von etwas mehr als **53,9 Millionen Tonnen** (Abb. 8). Zwischen 2000 und 2020 nahm der CO₂-Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland um **7,6 %** ab. Gleichzeitig zeigt sich ein langfristiger Anstieg des **Anteils der Digitalisierung** am gesamten CO₂-Fußabdruck Deutschlands: von 5,1 % im Jahr 2000 auf **5,7 % im Jahr 2020**. Für das Jahr 2020 zeigen die Anteile des CO₂, Dig.-Fußabdrucks und des zuvor beschriebenen Rohstoffkonsums (RMC_{Dig.}) eine hohe **Übereinstimmung**.

Analyse nach Rohstoffgruppen, geografischem Ursprung und Verwendungen

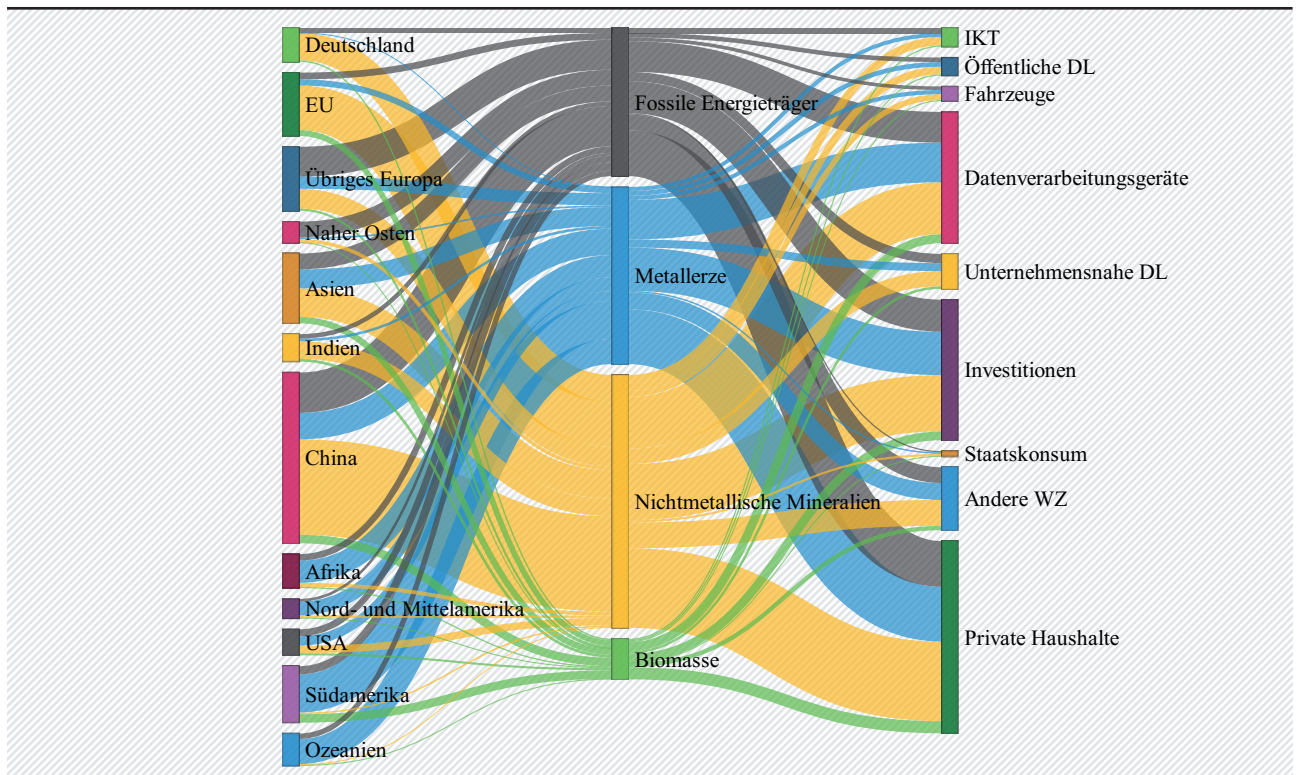
In der Analyse des Forschungsvorhabens wurden die zuvor dargestellten Indikatoren außerdem nach den

folgenden Aspekten aufgeschlüsselt: Anteile individueller Zielsektoren, verwendete Materialien (nicht metallische Mineralien, Metallerze, fossile Energieträger, Biomasse) sowie Herkunftsländer der Güter und Dienstleistungen bzw. der Vorkettenprodukte. Im Folgenden wird dies am Beispiel des Rohstoffkonsums (RMC_{Dig.}) beschrieben. Gleichzeitig illustriert Abb. 9, wie komplex die Berechnungen der Indikatoren in diesem Forschungsvorhaben waren.

Geografischer Ursprung: Wie bereits zuvor (Abb. 6) beschrieben, wird der Rohstoffkonsum der Digitalisierung in Deutschland überwiegend durch die Nachfrage nach Hardware getrieben. Da Hardware überwiegend aus **fernöstlichen Weltregionen** importiert wird, führt die deutsche Digitalisierung insbesondere in China und im übrigen Asien zu Rohstoffextraktionen. Für sämtliche in Deutschland benötigten IKT-Güter und -Dienstleistungen (Vorleistungsnachfrage und Endnachfrage) extrahierte allein China im Jahr 2020 rund 26,3 Millionen Tonnen Rohstoffe. Dies entspricht gut einem Viertel des gesamten deutschen RMC_{Dig.} (Abb. 9). Zum Vergleich: Deutschland selbst

Abbildung 9

Rohstoffkonsum des digitalen Wandels in Deutschland im Jahr 2020 (RMC_{Dig.}) nach Rohstoffgruppen, geographischem Ursprung und Verwendungen



Quelle: Eigene Berechnungen

entnahm 2020 im Zuge der Digitalisierung lediglich 5,2 Millionen Tonnen Rohstoffe.

Hauptrohstoffgruppen: Nicht metallische Mineralien sind die wichtigste Materialkategorie im Rohstoffkonsum der Digitalisierung. Im Jahr 2020 wurden davon annähernd 39 Millionen Tonnen (überwiegend Sand und Kies) benötigt. Dies entspricht einem Anteil von ca. 40,9 % an den erfassten Primärrohstoffen. **Metallerze** summierten sich auf 27,3 Millionen Tonnen, was die Menge fossiler Energieträger übersteigt. Diese wurden in einem Umfang von 22,8 Millionen Tonnen genutzt. Ihr Anteil am RMC_{Dig.} (rund 24 %) ist damit deutlich höher als der Anteil biotischer Rohstoffe (6,6 %). Fossile Energieträger wurden vorrangig in China, in europäischen Regionen außerhalb der EU, im Nahen Osten und im übrigen Asien beansprucht. Dies ist in erster Linie auf die Energiesysteme zurückzuführen, die in den genannten Weltregionen der Herstellung von IKT-Gütern zugrunde liegen. Die für die Digitalisierung

in Deutschland genutzten Metallerze stammen in erster Linie aus China, Afrika, Südamerika, Ozeanien sowie Nord- und Mittelamerika. Nicht metallische Mineralien werden in hohem Maße auch in Deutschland sowie sonstigen europäischen Regionen extrahiert.

Verwendungen: Die inländische Endnachfrage nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen⁴ verursachte im Jahr 2020 insgesamt einen Rohstoffkonsum von mehr als 52,1 Millionen Tonnen. Dies entspricht einem Anteil von annähernd 55 % am gesamten RMC_{Dig.} sowie einem Anteil von 3,1 % am gesamtwirtschaftlichen RMC des Jahres 2020. Der Anteil der gesamten Vorleistungsnachfrage⁵ am deutschen RMC_{Dig.} summierte sich im Jahr 2020 auf rund 43,3 Millionen Tonnen. Mit 20 Millionen Tonnen war der Anteil der Vorleistungsnachfrage zur Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten am gesamten RMC_{Dig.} nahezu gleichbedeutend wie jener der Investitionsnachfrage (21,7 Millionen Tonnen).

⁴ In Abb. 9 weiter unterteilt in Staatskonsum, Investitionen und Konsum privater Haushalte in Deutschland

⁵ In Abb. 9 weiter unterteilt in die Zielsektoren Informations- und Kommunikationsdienstleistungen, öffentliche Dienstleistungen, Fahrzeugbau, Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, unternehmensnahe Dienstleistungen und sonstige Wirtschaftszweige.

Einordnung der Ergebnisse der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung

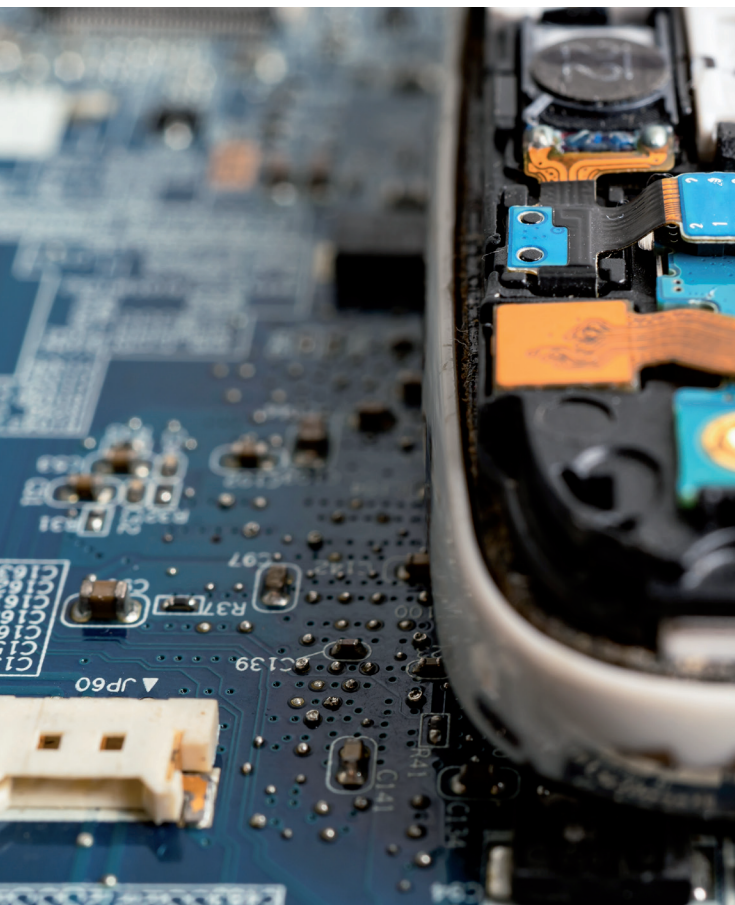
Die Analysen auf Meso- bzw. Makroebene des Forschungsvorhabens DigitalRessourcen haben **eine erste vollständige globale Bewertung** der Material- und CO₂-Intensität des digitalen Wandels in Deutschland ermöglicht. Bisher lagen dazu so gut wie keine ähnlichen Arbeiten und Berechnungen vor.

Der **UBA-Ressourcenbericht 2022** (Lutter et al. 2022) schätzte den Rohstoffkonsum der deutschen Digitalisierung (Materialbedarf für die Endnachfrage nach IKT-relevanten Gütergruppen und

Dienstleistungen) ab. Die Arbeiten im gegenständlichen Vorhaben DigitalRessourcen verwenden allerdings ein deutlich weiter gefasstes konzeptionelles Verständnis des Systems Digitalisierung und nutzen eine andere empirische Methode. Daher ist kein direkter Vergleich der Ergebnisse möglich. Dies betrifft sowohl die absoluten Werte der gesamtwirtschaftlichen Indikatoren RMC und RMI als auch die Ergebnisse der Teilindikatoren RMC_{Dig.} und RMI_{Dig.}. Interessant ist aber die Tatsache, dass Lutter et al. (2022) den relativen Anteil der heimischen IKT-Endnachfrage am gesamten deutschen RMC für das Jahr 2019 auf 3 % schätzen. Diese ersten Schätzungen sind **nahezu identisch** mit den vorliegenden eigenen Berechnungen für den RMC-Anteil der heimischen IKT-Endnachfrage (ca. 3,1 % im Jahr 2020).

Die eigenen Ergebnisse belegen, dass der digitale Wandel in Deutschland zwischen 2000 und 2020 mit steigenden Anteilen zu gesamtwirtschaftlichen Umweltinanspruchnahmen beitrug. Der **Rohstoffkonsum** der Digitalisierung in Deutschland ist in diesem Zeitraum **um etwa 8,5 %** gestiegen. Während der RMC_{Dig.} im Jahr 2000 ca. 4,3 % des gesamten deutschen RMC ausmachte, nahm dieser Anteil bis zum Jahr 2020 auf 5,6 % zu. Der **Rohstoffeinsatz** der deutschen Wirtschaft für IKT-Güter und -Dienstleistungen (RMI_{Dig.}) stieg von 2000 bis 2020 um **annähernd 13,5 %**. Der RMI_{Dig.} hatte im Jahr 2000 noch einen Anteil von 4,7 % am gesamten deutschen RMI, bis zum Jahr 2020 hatte er auf 4,9 % zugelegt.

Der **CO₂-Fußabdruck** der Digitalisierung in Deutschland entwickelte sich in absoluten Zahlen zwischen 2000 und 2020 rückläufig. Allerdings ging der gesamtwirtschaftliche CO₂-Fußabdruck im gleichen Zeitraum deutlicher zurück. Daher ergibt sich ein **langfristiger Anstieg** des Anteils der Digitalisierung am gesamten CO₂-Fußabdruck Deutschlands auf **5,7 % im Jahr 2020**.



Quelle: amazing studio – stock.adobe.com

6 Ressourcenintensität und CO₂-Emissionen: Modellierung des digitalen Wandels bis zum Jahr 2050

Die computergestützte Modellierung möglicher Zukunftsszenarien ist heute ein wichtiger Bestandteil der angewandten Nachhaltigkeitsforschung. Auch der im Forschungsvorhaben entwickelte globale multi-regionale Input-Output-Bewertungsansatz kann die **Rohstoffinanspruchnahmen und Treibhausgasemissionen** im Zuge der deutschen Digitalisierung über zukünftige Dekaden simulieren. Hierzu wurde im Forschungsvorhaben das **Modell GRAMOD** entwickelt, das die Datenstrukturen der **Datenbank GLORIA** (Kap. 5) dynamisch fortschreibt.

Gemäß Projektauftrag waren mögliche zukünftige Entwicklungspfade (Szenarien) des im Vorhaben definierten „Systems Digitalisierung“ quantitativ zu modellieren und unter Maßgabe einer ressourcenschonenden und ressourcenextensiven Entwicklung entsprechende Simulationen zu erarbeiten.

Das Trendszenario bis 2050

Die Annahmen zu Wirtschaftswachstum und Bevölkerungszahlen in den von GRAMOD abgebildeten Weltregionen wurden im Trendszenario zentral vorgegeben.

Das Trendszenario simuliert deutliche Fortschritte in der nationalen Klimapolitik bei einer weitgehenden Fortschreibung sonstiger historischer Entwicklungstrends (Entwicklung der aggregierten Endnachfragekomponenten gegenüber vorgegebenen BIP-Wachstumsraten, strukturelle Veränderungen der Endnachfrage in einzelnen Themenfeldern, zukünftige Globalisierungstrends und daraus gesamtwirtschaftlich resultierende Veränderungen der Ressourcenproduktivität). Die angenommene Entwicklung des länderspezifischen preisbereinigten **BIP** pro Kopf wurde aktuellen Langfristprojektionen der OECD entnommen (OECD.Stat, 2021).

Die **Bevölkerungsprojektionen** entstammen den *World Population Prospects 2022* der Vereinten Nationen (United Nations Department of Economic and Social Affairs 2022). Die UN-Projektion unterstellt, dass die globale Bevölkerungszahl bis zum Jahr 2050 auf insgesamt 9,7 Milliarden Menschen ansteigt. Für Deutschland rechnet man langfristig mit einem leichten Bevölkerungsrückgang (bis zum Jahr 2050 um ca. -5,1 %

gegenüber heute). Trotz dieser rückgängigen Bevölkerungsprojektion wird für Deutschland langfristig ein stabiles Wirtschaftswachstum erwartet.

Die im Trendszenario für Deutschland projizierte jährliche **Wachstumsrate** des Bruttoinlandsprodukts (BIP) entspricht im Durchschnitt annähernd 0,8 %. Dieses BIP-Wachstum liegt im Vergleich zu den globalen BIP-Wachstumsraten (im Durchschnitt gut 2,1 %) allerdings relativ niedrig.

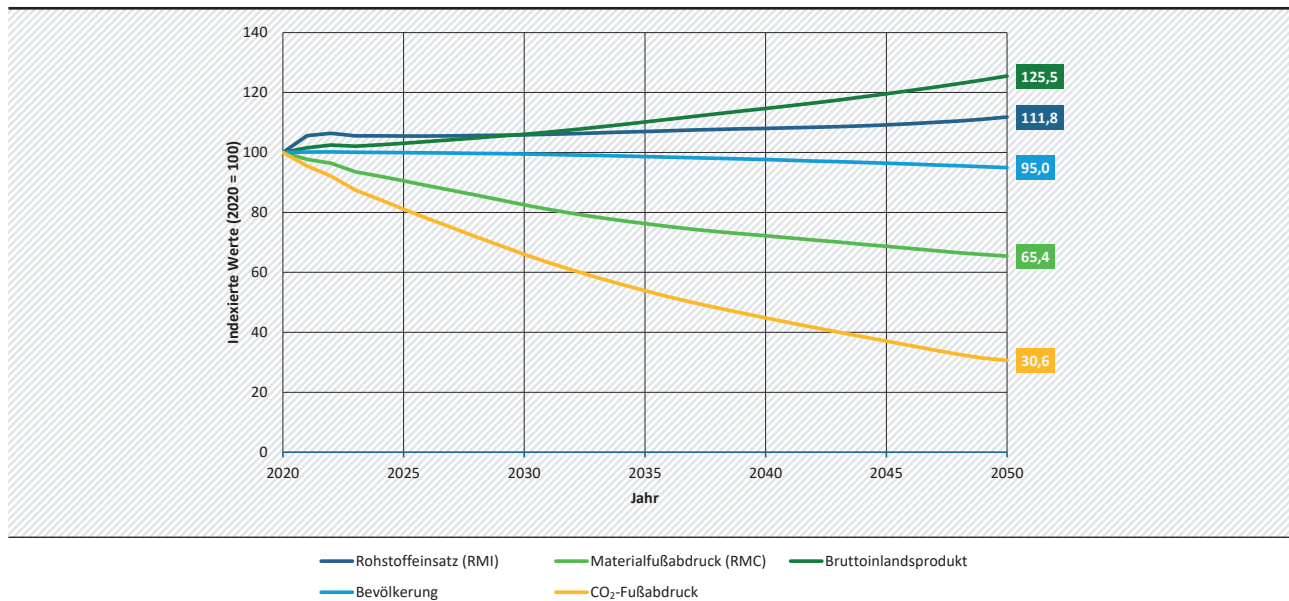
Darüber hinaus lassen sich zukünftige Umfeldentwicklungen in anderen Bereichen über die Vorgabe von unterschiedlichen „**Stellschrauben**“ in der **Simulation** berechnen. So wurden im Forschungsvorhaben für das energie- und klimapolitische Umfeld folgende Annahmen beschlossen: Bereits im Trendszenario für Deutschland erfolgt in der Stromerzeugung eine **umfassende Substitution** von fossilen Energieträgern durch erneuerbare Energien, die Energieintensität in der Produktion sinkt deutlich und die Produktion (außer Stromerzeugung) ist weitgehend dekarbonisiert. Auch das globale Trendszenario setzt langfristige Dekarbonisierungstendenzen voraus. Allerdings wird angenommen, dass **andere Weltregionen** im Vergleich zu Deutschland **längere Zeiträume** für entsprechende Transformationsfortschritte benötigen. Daher steigen die globalen industriellen CO₂-Emissionen im Simulationszeitraum noch bis Mitte der 2030er-Jahre an.

Dennoch entwickelt sich nach den Berechnungen des Forschungsvorhabens der deutsche **CO₂-Fußabdruck** im Trendszenario stetig rückläufig (Abb. 10). Im gesamten Zeitraum 2020 bis 2050 zeigt sich annähernd eine **Reduktion um 70 %**.

Auch der gesamtwirtschaftliche deutsche **Rohstoffkonsum** (RMC) entwickelt sich langfristig rückläufig. Allerdings beträgt der Rückgang zwischen 2020 und 2030 nur ein Drittel des ursprünglichen Niveaus (Abb. 10). Der Rohstoffkonsum (RMC) erreicht somit – ebenso wie der **CO₂-Fußabdruck** – eine **absolute Entkopplung** vom Wirtschaftswachstum. Im Gegensatz dazu verzeichnet der **Rohstoffeinsatz** der deutschen Wirtschaft (RMI = RMC + Exportnachfrage)

Abbildung 10

Entwicklung ausgewählter gesamtwirtschaftlicher Schlüsselindikatoren für Deutschland im Trendszenario über die Jahre 2020 bis 2050



Anmerkung: Schlüsselindikatoren werden zur besseren Vergleichbarkeit als Indexzeitreihen mit dem Basisjahr 2020 dargestellt.

Quelle: Eigene Berechnungen

langfristig lediglich eine **relative Entkopplung** von der wirtschaftlichen Entwicklung. Zwischen den Jahren 2020 und 2050 steigt der gesamtwirtschaftliche deutsche Rohstoffeinsatz (RMI) insgesamt um rund 12 % (Abb. 10).

Die unterschiedliche Dynamik der gesamtwirtschaftlichen Indikatoren RMI und RMC im Trendszenario erklärt sich durch die unterschiedlichen sozioökonomischen Entwicklungen in Deutschland und im Rest der Welt. Da die übrigen Weltregionen im Vergleich zu Deutschland ein stärkeres durchschnittliches Wirtschaftswachstum aufweisen, verhält sich in der Simulation die Exportnachfrage aus dem Ausland dynamischer als die inländische Endnachfrage in Deutschland.

In ihrer Zusammensetzung zeigen sich beide gesamtwirtschaftlichen Materialindikatoren **langfristig qualitativ übereinstimmend**: Die Anteile fossiler Rohstoffe sinken im Trendszenario bis zum Jahr 2050 deutlich (der RMC fossiler Rohstoffe um 64 %, der RMI fossiler Rohstoffe um 39 % im Vergleich zu 2020). Auch die Inanspruchnahme biotischer Materialien entwickelt sich im Trendszenario langfristig rückläufig (RMC: -46 %, RMI: -23 %). Die Primärrohstoffnutzung von Metallerzen und nicht metallischen Mineralien geht nach dem RMC-Konzept im Trendszenario

langfristig ebenfalls zurück (Metallerze: -26 %, nicht metallische Mineralien: -11 %). Dennoch sind diese Hauptrohstoffkategorien die wesentlichen Treiber des beobachteten Anstiegs beim gesamtwirtschaftlichen Indikator RMI (Metallerze: +31 %, nicht metallische Mineralien: +48 %).

Zu beachten ist, dass die Trendprojektion **keine Wirtschaftsprognose** darstellt. Sie ist vielmehr ein plausibles zukünftiges Entwicklungsszenario, das als Grundlage zur Bewertung alternativer Entwicklungsszenarien dient.

Sechs alternative Zukunftsszenarien bis zum Jahr 2050

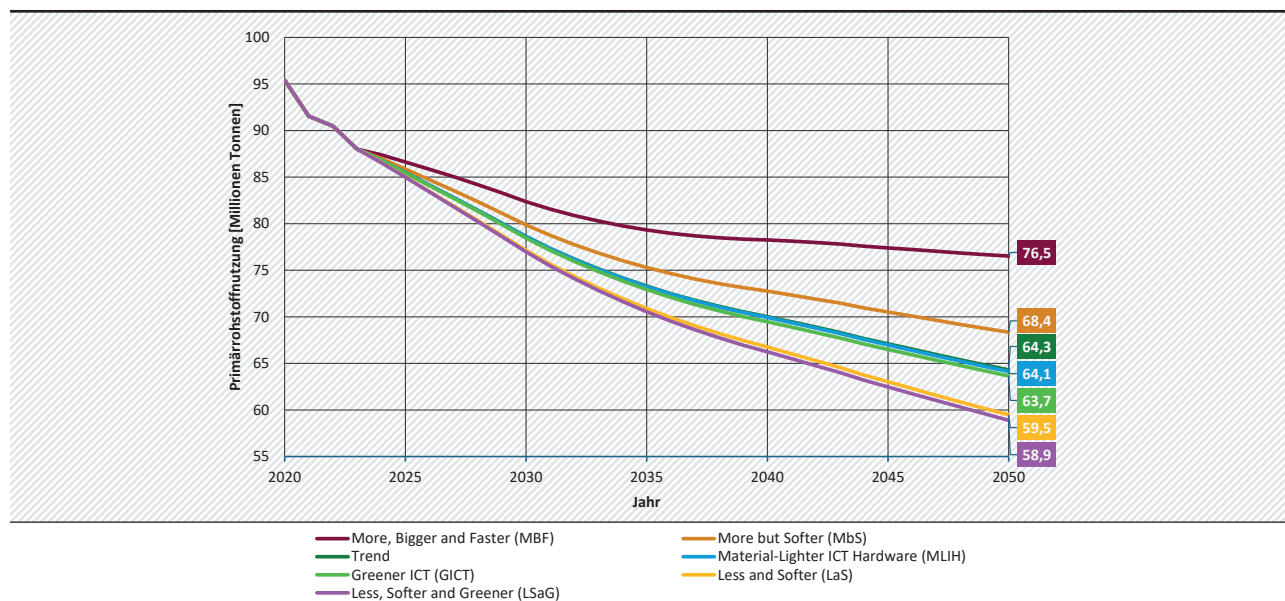
Die sechs alternativen Szenarien sollen abbilden, wie sich zentrale Einflussfaktoren der zukünftigen Digitalisierungstrends in Deutschland auswirken. In den Simulationen wurden mehrere Einflussfaktoren als „zentrale Stellschrauben“ für Effizienzsteigerungen in der **Produktion** und für Bedarfs- und Konsumententwicklungen der **privaten Haushalte** variiert.

Daraus ergaben sich die **folgenden sechs Alternativszenarien** des Forschungsvorhabens:

1. **More, Bigger and Faster (MBF)**: Die privaten Haushalte in Deutschland steigern bis zum Jahr

Abbildung 11

Entwicklung des Rohstoffkonsums ($RMC_{Dig.}$) der Digitalisierung in Deutschland für unterschiedlich ambitionierte Szenarien im Zeitraum 2020 bis 2050



Quelle: Eigene Berechnungen

2050 ihre Nachfrage nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen um 50 % gegenüber dem Trendszenario. Der Konsum fokussiert sich dabei auf Hardware: Der Anteil von IKT-Gütern an der gesamten Konsumnachfrage nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen verdoppelt sich im Vergleich zum Trendszenario bis zum Jahr 2050.

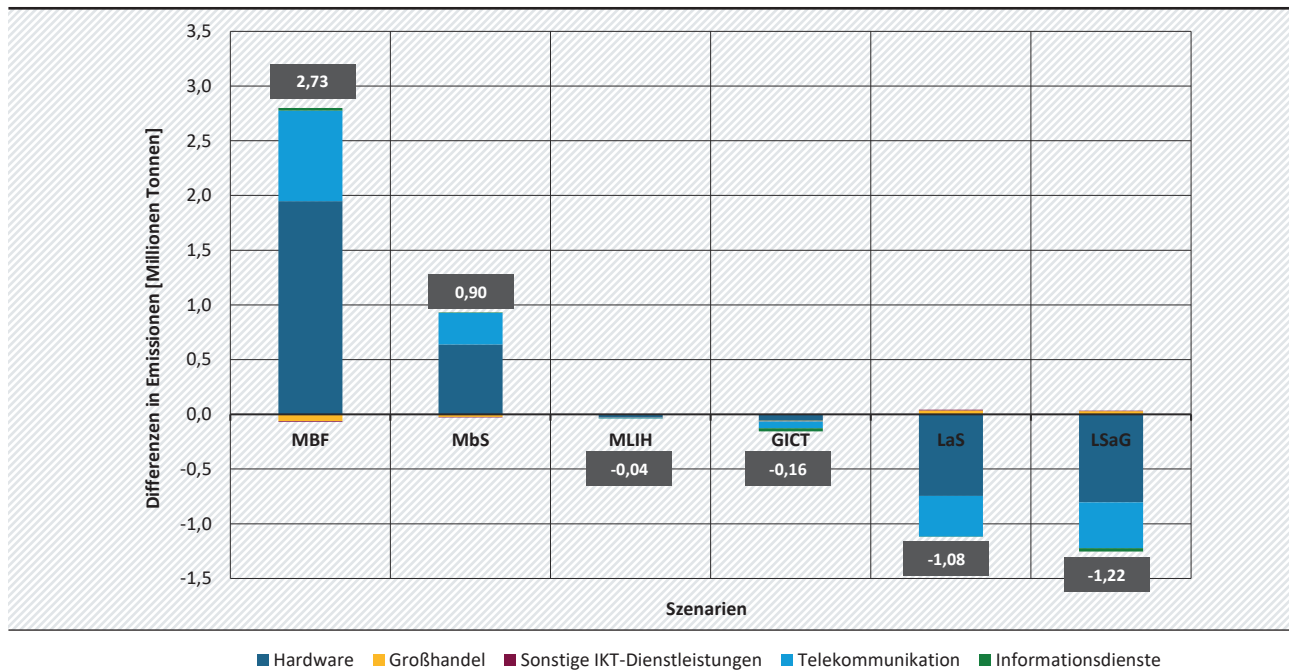
2. **More but Softer (MbS):** Auch in diesem Szenario steigern die privaten Haushalte in Deutschland bis zum Jahr 2050 ihre Nachfrage nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen um 50 % im Vergleich zum Trendszenario. Diese Entwicklung wird aber durch die Nachfrage nach IKT-Dienstleistungen getrieben: Deren Anteil an der gesamten Konsumnachfrage nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen verdoppelt sich im Vergleich zum Trendszenario bis zum Jahr 2050.
3. **Less and Softer (LaS):** In diesem Szenario reduzieren die privaten Haushalte in Deutschland bis zum Jahr 2050 ihre Nachfrage nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen um 20 % im Vergleich zum Trendszenario. Wie im Szenario „More but Softer“ werden dabei strukturelle Nachfrageveränderungen hin zu einer

weniger rohstofflastigen Nachfrage unterstellt: Der Anteil von IKT-Dienstleistungen an der gesamten Konsumnachfrage nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen verdoppelt sich im Vergleich zum Trendszenario bis zum Jahr 2050.

4. **Material-Lighter ICT Hardware (MLIH):** Dieses Szenario illustriert Effekte von Effizienzsteigerungen in der inländischen Produktion von IKT-Gütern. Unterstellt wird, dass die inländischen Produzenten von IKT-Gütern bis zum Jahr 2050 ihre Materialinputs im Vergleich zur Trendprojektion um 7,5 % reduzieren können.
5. **Greener ICT (GICT):** Auch dieses Szenario bildet Effekte von Effizienzsteigerungen in der inländischen Produktion ab. Diesmal wird allerdings unterstellt, dass die inländischen Produzenten von IKT-Gütern und auch IKT-Dienstleistungen bis zum Jahr 2050 ihre Materialinputs im Vergleich zur Trendprojektion um 7,5 % reduzieren können. Darüber hinaus gilt die Annahme, dass die Produzenten von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland bis zum Jahr 2050 zusätzlich Energie einsparen können. Im Vergleich zur Trendprojektion ergibt sich eine Reduktion der Energienachfrage bei den Produzenten um 15 % bis zum Jahr 2050.

Abbildung 12

CO₂, Dig.-Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland, Unterschiede der Szenarienergebnisse im Vergleich zum Trendszenario für das Jahr 2050



MBF (More, Bigger and Faster). MbS (More but Softer). MLIH (Material-Lighter ICT Hardware). GICT (Greener ICT). LaS (Less and Softer). LSaG (Less, Softer and Greener).

Quelle: Eigene Berechnungen

6. **Less, Softer and Greener (LSaG):** Dieses Szenario betrachtet die kombinierten Effekte von Effizienzsteigerungen in der Produktion sowie Bedarfs- und Konsumententwicklungen der privaten Haushalte. Hierzu werden die Szenarioeinstellungen zu „3. Less and Softer“ mit jenen des Szenarios „5. Greener ICT“ kombiniert.

Der **Rohstoffkonsum** ($RMC_{Dig.}$) der Digitalisierung in Deutschland entwickelt sich bis zum Jahr 2024 in allen betrachteten Szenarien parallel (Abb. 11).

Ab 2024 setzen sie sich getrennt voneinander fort, wobei sich die Szenarien „Trend“, „Material-Lighter ICT Hardware“ und „Greener ICT“ sehr ähnlich entwickeln; ebenso die Szenarien „Less and Softer“ und „Less, Softer and Greener“.

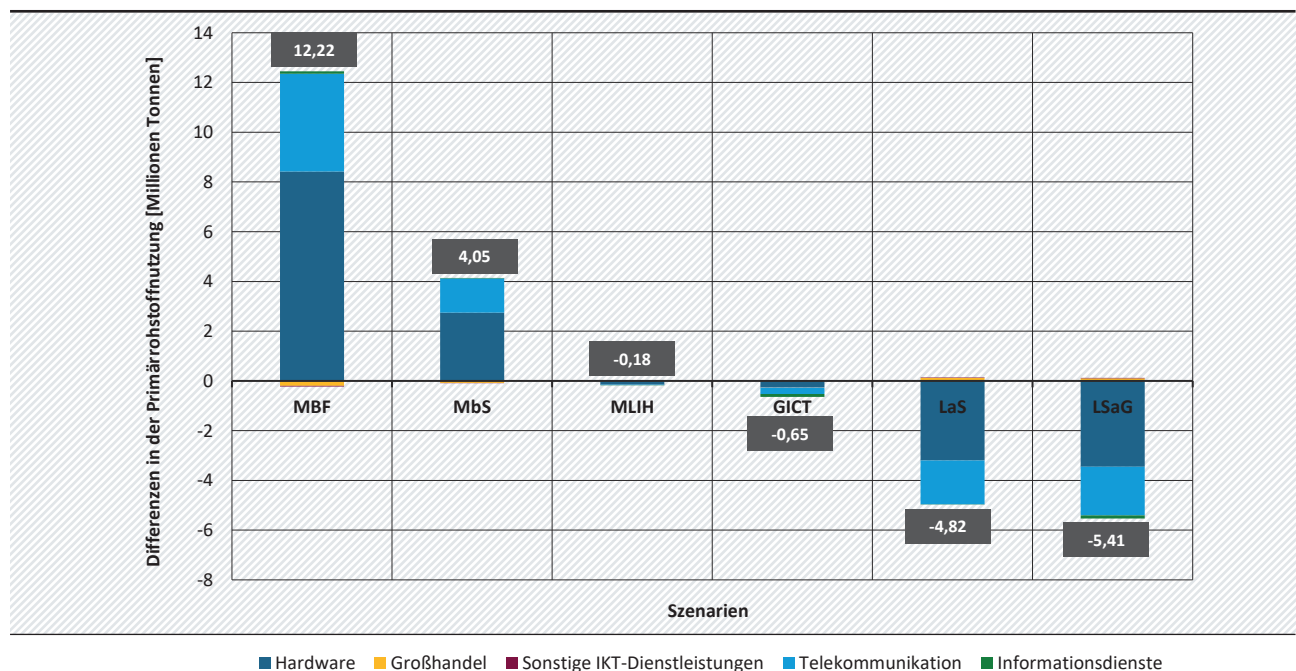
Über den gesamten dargestellten Zeitraum **geht die Primärrohstoffnutzung zurück**, ausgehend von etwa 95 Millionen Tonnen. Beim Szenario „Less, Softer and Greener“ mit der stärksten Abnahme beträgt sie im Jahr 2050 dann weniger als 59 Millionen Tonnen. Das Szenario „More, Bigger and Faster“ weist die höchste Primärrohstoffnutzung auf. Die Differenz zwischen diesem Szenario und dem

Szenario „Less, Softer and Greener“ beläuft sich im Jahr 2050 auf etwa 17,6 Millionen Tonnen. Dies entspricht einer Zunahme um ca. 30 Prozent. Die beiden „More“-Szenarien befinden sich ab 2024 über dem Trend und die beiden „Less“-Szenarien darunter. Die Entwicklung des Rohstoffkonsums der Digitalisierung ($RMC_{Dig.}$) in Deutschland ist im Szenario „Material-Lighter ICT Hardware“ nicht sichtbar von der im Trendszenario projizierten Entwicklung unterscheidbar. Im Szenario „Greener ICT“ reduziert sich der Rohstoffkonsum der Digitalisierung in Deutschland im Vergleich zum Trendszenario marginal. Im Jahr 2050 beträgt dieser 1 % weniger als der Referenzwert des Trendszenarios.

Auch mit Blick auf den digitalisierungsbedingten Rohstoffeinsatz der deutschen Wirtschaft ($RMI_{Dig.}$) entwickeln sich die Szenarien bis zum Jahr 2024 nahezu identisch (nicht dargestellt in Abb. 11, s. ausführlich (Abraham et al. 2023a)). Ab 2024 setzen sie sich getrennt voneinander fort. Über den gesamten dargestellten Zeitraum nimmt die Primärrohstoffnutzung zu. Sie liegt anfangs (2020) bei etwa 157 Millionen Tonnen und steigt im Szenario „More, Bigger and Faster“ mit der stärksten Zunahme bis zum Jahr 2050 auf ungefähr 170 Millionen Tonnen.

Abbildung 13

Rohstoffkonsum (RMC_{Dig.}) der Digitalisierung in Deutschland – Unterschiede der Szenarien gegenüber dem Trendszenario nach Produktgruppen



MBF (More, Bigger and Faster). MbS (More but Softer). MLIH (Material-Lighter ICT Hardware). GICT (Greener ICT). LaS (Less and Softer). LSaG (Less, Softer and Greener).

Quelle: Eigene Berechnungen

Der CO_{2, Dig.}-**Fußabdruck** der deutschen Digitalisierung zeigt laut dem Forschungsvorhaben über den gesamten dargestellten Zeitraum bis 2050 in allen Szenarien eine **Abnahme**. Er beträgt im Jahr 2025 knapp 43 Millionen Tonnen und geht beim Szenario „Less, Softer and Greener“ mit der stärksten Abnahme im Jahr 2050 auf etwa 14 Millionen Tonnen zurück.

Das Szenario „More, Bigger and Faster“ ist insgesamt durch die höchsten CO_{2, Dig.}-Emissionen gekennzeichnet (Abb. 12). Die Differenz zwischen diesem Szenario und „Less, Softer and Greener“ beläuft sich im Jahr 2050 auf etwa 4 Millionen Tonnen. Dabei bewirkt die Produktgruppe Hardware im Jahr 2050 die meisten Abweichungen gegenüber dem Trendszenario. Es folgt die Produktgruppe Telekommunikation, während die anderen Gruppen von untergeordneter Bedeutung sind. Gleichzeitig zeigt sich, dass die Veränderungen im Großhandel und bei den sonstigen IKT-Dienstleistungen sowohl für die Szenarien mit deutlich höherem als auch für solche mit niedrigerem CO₂-Ausstoß den Gesamteffekt leicht abschwächen.

Im Vergleich des Rohstoffkonsums (RMC_{Dig.}) der deutschen Digitalisierung nach den **fünf** Produktgruppen über alle Szenarien zeigt sich eine

Zunahme der Unterschiede im Simulationszeitraum. Dabei fällt die **Hardware** besonders stark ins Gewicht: Unter allen Produktgruppen unterscheidet sie sich am stärksten vom Trendszenario (Abb. 13). Aber auch die **Telekommunikation** weist deutliche Abweichungen auf. Im Szenario „More, Bigger and Faster“ treten die höchsten Abweichungen und bei „Material-Lighter ICT Hardware“ die geringsten Abweichungen auf. Die beiden „More“-Szenarien liegen im positiven Bereich, die übrigen im negativen Bereich. Im Jahr 2050 beträgt die **Differenz** im Fall von Hardware über 7,5 Millionen Tonnen. Für die anderen Produktgruppen werden vernachlässigbar geringere Differenzen simuliert.

Die in den Szenarien „Material-Lighter ICT Hardware“ und „Greener ICT“ simulierten Effizienzsteigerungen in Deutschland reduzieren die Rohstoffintensität sowie die CO_{2, Dig.}-Emissionen durch den digitalen Wandel in Deutschland nur unwesentlich. Dies steht im Gegensatz zu den übrigen Szenarien, die die Folgen alternativer Bedarfs- und Konsumententwicklungen der privaten Haushalte simulieren. Dieser Befund ist darauf zurückzuführen, dass die besonders rohstoff- und CO₂-intensive Hardware **überwiegend aus dem Ausland importiert** wird.

Zusammenfassung – Modellierung des digitalen Wandels bis zum Jahr 2050

Mithilfe des in diesem Vorhaben entwickelten Modells GRAMOD wurden zukünftige gesamtwirtschaftliche Entwicklungspfade des Systems Digitalisierung in Deutschland modelliert.

Die Basis für diese Bewertungen bildet ein **Trend-szenario**. Dieses kommt unter den Annahmen von global steigenden Bevölkerungszahlen und globalem Wirtschaftswachstum zu dem Schluss, dass sich von 2020 bis 2050 das Produktionsniveau von IKT-Gütern und -Dienstleistungen weltweit verdoppelt. Für Deutschland ergibt sich ein schwaches, aber langfristig stabiles Wirtschaftswachstum bei gleichzeitiger **absoluter Entkopplung** von globalen CO₂-Emissionen und globalem Rohstoffkonsum (RMC). Ambitionierte Fortschritte in der nationalen Klimapolitik prägen das Trendszenario. Der gesamtwirtschaftliche CO₂-Fußabdruck geht im betrachteten Zeitraum um nahezu 70 % zurück, der gesamtwirtschaftliche Rohstoffkonsum (RMC) um **rund ein Drittel**. Auch der CO₂, Dig.-Fußabdruck sowie der Rohstoffkonsum RMC_{Dig.} entwickeln sich im Trendszenario für Deutschland **langfristig rückläufig**. Im Gegensatz hierzu steigt der Rohstoffeinsatz RMI_{Dig.} in die deutsche Wirtschaft zwischen den Jahren 2020 und 2050 im Trendszenario insgesamt geringfügig um 1,25 % an.

Neben dem Trendszenario wurden **sechs alternative Zukunftsszenarien** untersucht, bei denen zwei **zentrale Stellschrauben** variiert wurden: Effizienzsteigerungen in der Produktion von IKT-Gütern sowie die Bedarfs- und Konsumententwicklung der privaten Haushalte. Diese alternativen Zukunftsszenarien zeigen, welche Bandbreite globaler Rohstoffverbräuche durch die Digitalisierung in Deutschland in Zukunft denkbar ist.

Das Szenario „*More, Bigger and Faster*“ unterstellt dabei eine dynamischere private Nachfrage, die sich insbesondere auf digitale Hardware bezieht. Im Vergleich zur Trendentwicklung projiziert dieses Szenario für das Jahr 2050 eine **Steigerung** des Rohstoffkonsums (RMC_{Dig.}) um ca. 19 %. Für die einzelnen Hauptrohstoffgruppen simuliert es Abweichungen um 15 bis 20 Prozent gegenüber dem Trendszenario. Durch die unterstellten Steigerungen der inländischen Endnachfrage würde in diesem Szenario

auch der Rohstoffeinsatz (RMI_{Dig.}) im Vergleich zum Trendszenario zunehmen. Im Jahr 2050 übersteigt der RMI_{Dig.} im Szenario „*More, Bigger and Faster*“ den Referenzwert des Trendszenarios um 7,8 %.

Das Szenario „*Less, Softer and Greener*“ unterstellt hingegen eine **nachlassende** inländische Endnachfrage nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen sowie deren effizientere Produktion in Deutschland. In diesem Szenario **sinken** Rohstoffkonsum (RMC_{Dig.}) und Rohstoffeinsatz (RMI_{Dig.}) in Deutschland im Vergleich zum Trendszenario: Der Rohstoffkonsum (RMC_{Dig.}) weicht im Jahr 2050 um -8,4 % vom Trendszenario ab, der Rohstoffeinsatz (RMI_{Dig.}) um -3,7 %.

Der CO₂-Fußabdruck der Digitalisierung variiert in Größenordnungen, die mit jenen des Rohstoffkonsums (RMC_{Dig.}) vergleichbar sind (+18,2 % im Szenario „*More, Bigger and Faster*“, 8,1 % im Szenario „*Less, Softer and Greener*“; jeweils im Vergleich zur Referenz des Jahres 2050).

Beide vorstehend erwähnten Alternativszenarien unterstellen deutliche Variationen der privaten Nachfrage (+50 % im Szenario „*More, Bigger and Faster*“, -20 % im Szenario „*Less, Softer and Greener*“; jeweils im Vergleich zur Referenz des Jahres 2050). Gleichzeitig geben die Ergebnisse einen **deutlichen Hinweis** darauf, dass die analysierten Fußabdruck-Indikatoren in Zukunft besonders durch die **Vorleistungsnachfrage** der deutschen Wirtschaftszweige getrieben werden. Bereits Kapitel 5 zeigte mit Blick auf die bisherige Entwicklung des Rohstoffkonsums: Schon in der Vergangenheit hat sich der Einfluss der Vorleistungsnachfrage im Vergleich zu den Effekten der heimischen Endnachfrage deutlich dynamischer verändert.

Da das Vorhaben DigitalRessourcen **keine spezifischen Szenarien** zur zukünftigen produktionsseitigen Nachfrage nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen erarbeitete, bleiben entsprechende Forschungsaktivitäten **zukünftigen Vorhaben** vorbehalten. Im Idealfall sollten dabei für ausgewählte Produktionsbereiche (wie z. B. Landwirtschaft, Automobilindustrie oder Gesundheitsdienstleistungen) die zu erwartenden Produktionsstrukturen hergeleitet und dann in den Input-Output-Strukturen des Modells GRAMOD detailliert parametrisiert werden.

7 Gestaltungsfelder für eine nachhaltigere Digitalisierung

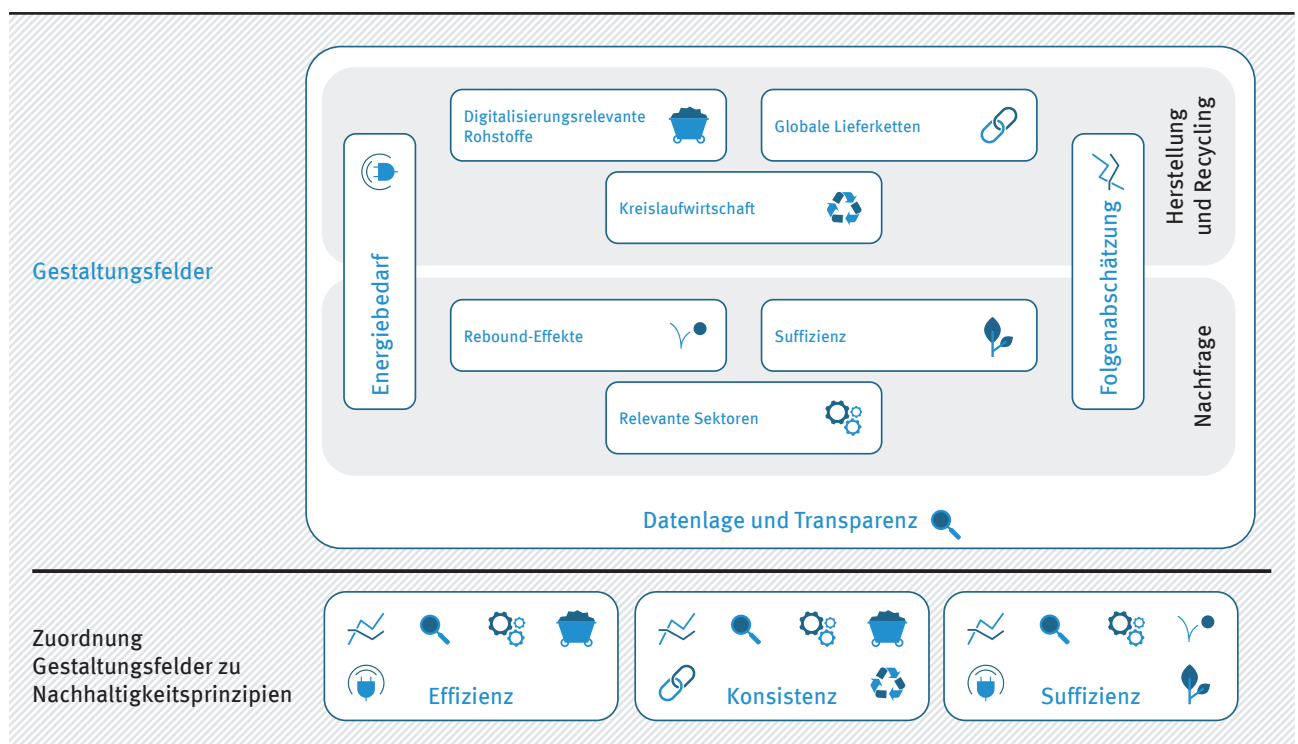
Die Digitalisierung ist ein komplexes System, dessen verschiedene Teilsysteme (beteiligte Ausgangssektoren, Technologien, verwendete Geräte, ...) miteinander in Verbindung stehen und einander beeinflussen (Kap. 3). Die Untersuchungen im vorliegenden Forschungsvorhaben DigitalRessourcen zur Ressourcenintensität der Digitalisierung auf Mikroebene (Kap. 4) und Makroebene (Kap. 5–6) zeigen: Das komplexe System Digitalisierung ist heute und in Zukunft in vielen Bereichen mit einem hohen Ressourcenbedarf und einem hohen Anfall an Treibhausgasemissionen verbunden.

Das Forschungsvorhaben sollte Optionen für eine nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung aufzeigen. Dazu wurden neun übergreifende Gestaltungsfelder abgeleitet und beschrieben, die Potenzial für die Verringerung von Ressourcenbedarfen und Umweltbelastungen bieten (Abb. 14). Diese Gestaltungsfelder beziehen sich auf den gesamten Lebenszyklus von IKT-Gütern und -Dienstleistungen. Das

umfasst deren Herstellung, Nachfrage und Nutzung sowie das Recycling. Das Gestaltungsfeld „Datenlage und Transparenz“ bildet ein Querschnittsfeld, da es Einfluss auf alle anderen Gestaltungsfelder hat. Die Gestaltungsfelder adressieren die Umsetzung von **Nachhaltigkeitsprinzipien**, das heißt die Steigerung von Effizienz, Konsistenz und Suffizienz. Für eine nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung ist eine umfassende Transformation erforderlich. Zudem brauchen die verschiedenen Akteure* Akteurinnen aus Politik, Wirtschaft, Gesellschaft und Wissenschaft Unterstützung. Für jedes Gestaltungsfeld wurden im Forschungsvorhaben beispielhafte Maßnahmen für Politiker*innen, Unternehmen, Verbraucher*innen sowie Forscher*innen benannt. Beispielsweise können Nutzer*innen die Effizienz von Geräten indirekt beeinflussen, indem sie energieeffiziente Geräte bevorzugen. Die Konsistenz lässt sich verbessern, wenn im gesamten Lebenszyklus von Produkten erneuerbare Energien zum Einsatz kommen. Die Suffizienz betrifft die Nachfrage

Abbildung 14

Übersicht über mögliche Gestaltungsfelder einer nachhaltigen Digitalisierung



Quelle: Eigene Darstellung

nach Geräten und Dienstleistungen und ist direkt beeinflussbar, indem der Bedarf kritisch hinterfragt wird. Die Maßnahmen eines Gestaltungsfelds können auch Auswirkungen auf andere Gestaltungsfelder haben. Zum Beispiel können Maßnahmen zur Kreislaufwirtschaft auch die Lieferketten beeinflussen. Im Folgenden findet sich ein Überblick über die **neun Gestaltungsfelder**.

Das Gestaltungsfeld „**Kreislaufwirtschaft**“ zielt darauf ab, den Rohstoffverbrauch zu reduzieren und Produkte sowie Materialien länger zu nutzen und wiederzuverwerten. Es besteht ein hoher Bedarf an IKT-Geräten, was zu einer steigenden Nachfrage von Rohstoffen führt. Die kurze Lebensdauer von IKT-Geräten erhöht die Nachfrage weiter. Niedrige Sammel- und Recyclingquoten stehen einer zirkulären Nutzung im Weg. Eine stringente Umsetzung von Prinzipien der Kreislaufwirtschaft kann zu einer nachhaltigeren Gestaltung der Digitalisierung beitragen.

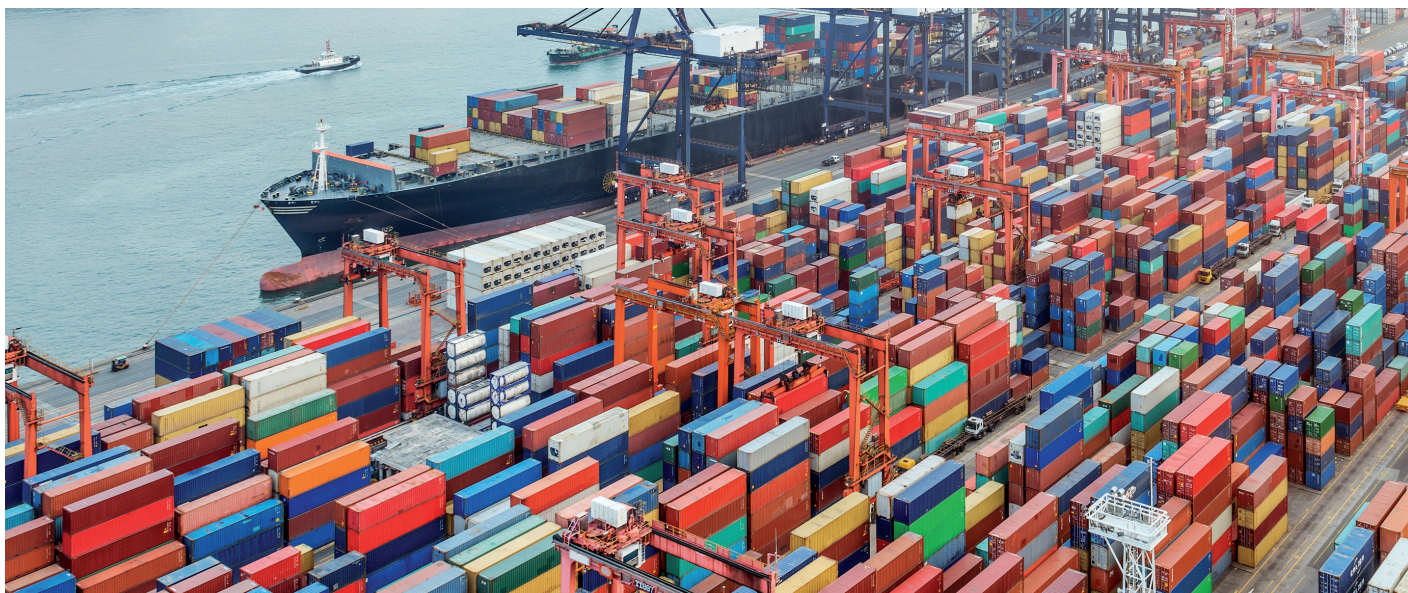
Die Herstellung von IKT-Geräten erfordert den Einsatz von **digitalisierungsrelevanten Rohstoffen**, die weltweit in geringen Mengen verfügbar sind. Ihr Abbau erfolgt oft unter unzureichenden sozialen

und ökologischen Bedingungen, insbesondere in Ländern wie dem Kongo, Ruanda, Brasilien und Nigeria. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurden 27 Rohstoffe identifiziert, die übermäßig wichtig für die Produktion von IKT-Geräten sind. Bei den Lebenszyklusanalysen stellten sich die Rohstoffe Gallium, Tantal, Gold, Silber, Zinn, Nickel, Scandium und Lithium als besonders relevant heraus. Die gesamtwirtschaftliche Betrachtung identifizierte Edelmetalle, einschließlich Gold und Silber, als die bedeutendste Gruppe innerhalb der Metallerze. Ein schonender Umgang mit diesen digitalisierungsrelevanten Rohstoffen ist für eine nachhaltige Digitalisierung unverzichtbar.

Die Rohstoffe für die Produktion von IKT-Geräten werden größtenteils im Ausland abgebaut. Ebenfalls im Ausland werden die IKT-Geräte produziert, bevor sie über lange Transportwege zu den Verbrauchern*Verbraucherinnen gelangen. Die gesamtwirtschaftliche Betrachtung im Forschungsvorhaben machte deutlich: Die Digitalisierung in Deutschland hängt stark von Produktionsprozessen in Asien ab, die erhebliche Mengen fossiler Energieträger nutzen. Im Rahmen der Lebenszyklusanalysen erwies sich der verwendete Strommix als wichtiger Einflussfaktor für die



Quelle: evgenii_v – stock.adobe.com



Quelle: hxdyl – stock.adobe.com

Treibhausgasemissionen von digitalen Diensten. Ein Beispiel dafür sind Kryptowährungen, bei denen die Emissionen stark von der spezifischen **Lieferkette** und vom Betriebsstandort abhängen. Transparenz und internationale Zusammenarbeit sind erforderlich, um den ökologischen Fußabdruck entlang der Lieferketten zu identifizieren und zu reduzieren. Dabei müssen umweltfreundlichere Technologien und Verfahren zum Einsatz kommen, die die Rohstoffgewinnung sowie die Herstellung und Bereitstellung von Produkten und Dienstleistungen weltweit nachhaltiger machen.

Eine effizientere Gestaltung von digitalen Geräten und Dienstleistungen kann theoretisch den Ressourcengebrauch der Digitalisierung reduzieren und negative Umweltwirkungen begrenzen. Effizienzgewinne bewirken allerdings häufig eine Steigerung des Konsums. Dadurch kann der Ressourcengebrauch gleichbleiben oder sogar steigen (z. B. bei Verhaltensänderungen). Und in der Tat ergeben sich in den Fallstudien von DigitalRessourcen Hinweise auf diese sogenannten **Rebound-Effekte**. So ermöglichen Consumer-to-Consumer-Plattformen den ressourcenschonenderen Kauf von Gebrauchsgütern, aber gleichzeitig kann es insgesamt zu einer Steigerung des Konsums kommen, weil der Produktzugriff so einfach und kostengünstig ist. Es gilt, Rebound-Effekte so weit wie möglich zu vermindern und Voraussetzungen zu schaffen, damit digitale Anwendungen zu realen Effizienz- und Nachhaltigkeitseffekten führen.

Die Digitalisierung hat das Potenzial, die Energieeffizienz in verschiedenen Wirtschaftsbereichen zu

verbessern („Industrie 4.0“). Sie verursacht jedoch ihrerseits einen zunehmenden **Energiebedarf**. Insbesondere IKT-Geräte, Rechenzentren und Prozesse zur Datenübertragung sind Treiber des Energiebedarfs. So zeigen die Lebenszyklusanalysen, dass der Hauptanteil des Energiebedarfs durch die Nutzung von IKT-Geräten und den Betrieb von Rechenzentren entsteht. In einer Fallstudie kam ans Licht, dass die THG-Emissionen und die Nachhaltigkeit eines Anwendungsfalls stark vom verwendeten Strommix abhängen. Aus den gesamtwirtschaftlichen Berechnungen ging hervor, dass die Digitalisierung etwa 5,7 % des gesamtdeutschen THG-Fußabdrucks verursacht. Für eine nachhaltigere Digitalisierung in der Zukunft ist somit zweierlei notwendig: Der Energiebedarf von Geräten, Dienstleistungen und begleitender Infrastruktur muss zurückgehen und gleichzeitig muss der Anteil von erneuerbaren Energien im Strommix steigen.

Das Gestaltungsfeld „**Relevante Sektoren**“ greift vorrangig auf die Ergebnisse der gesamtwirtschaftlichen Analysearbeiten im Forschungsvorhaben zurück. Von den unterschiedlichen Produktgruppen der makroökonomischen Analyse weist die Produktgruppe Hardware mit Abstand den größten Ressourcenbedarf und CO₂-Fußabdruck auf. Der Begriff Hardware bezieht sich jedoch auf sehr unterschiedliche wirtschaftliche Aktivitäten, beispielsweise den Bau von Leiterplatten oder Bestrahlungsgeräten. Diese Produktgruppe sollte in weiteren Analysen feiner aufgegliedert werden, damit sich die relevanten Teilbereiche und Akteure ermitteln lassen. Betrachtet man die Nachfrageseite auf makroökonomischer

Ebene, so machen private Haushalte, Exporte und Investitionen der Wirtschaft zusammen fast die Hälfte der Gesamtnachfrage aus. Zur Identifikation relevanter Akteure aus der Wirtschaft wäre es hilfreich, den Berechnungsansatz so weiterzuentwickeln, dass sich die nachfragenden Bereiche feiner auflösen lassen.

IKT-Geräte und digitale Dienste werden derzeit in unserer Gesellschaft in hohem Umfang nachgefragt und verwendet. Digitale Technologien haben einen hohen Durchdringungsgrad. IKT-Geräte haben meist nur geringe Nutzungsdauern und werden in kurzen Zyklen ersetzt: Die Recherchen zu den Fallstudien in DigitalRessourcen ergaben Nutzungsdauern der betrachteten IKT-Geräte von lediglich zwei bis vier Jahren. Ein nachhaltigeres Konsum- und Kaufverhalten im Sinne von **Suffizienz** könnte den Rohstoff- und Energiebedarf und die damit verbundenen Treibhausgasemissionen reduzieren. Beispielsweise führte das in DigitalRessourcen berechnete „private Suffizienzscenario“ zur Abnahme des Rohstoffgebrauchs und zu einem entsprechenden Ressourceneinsparpotenzial.

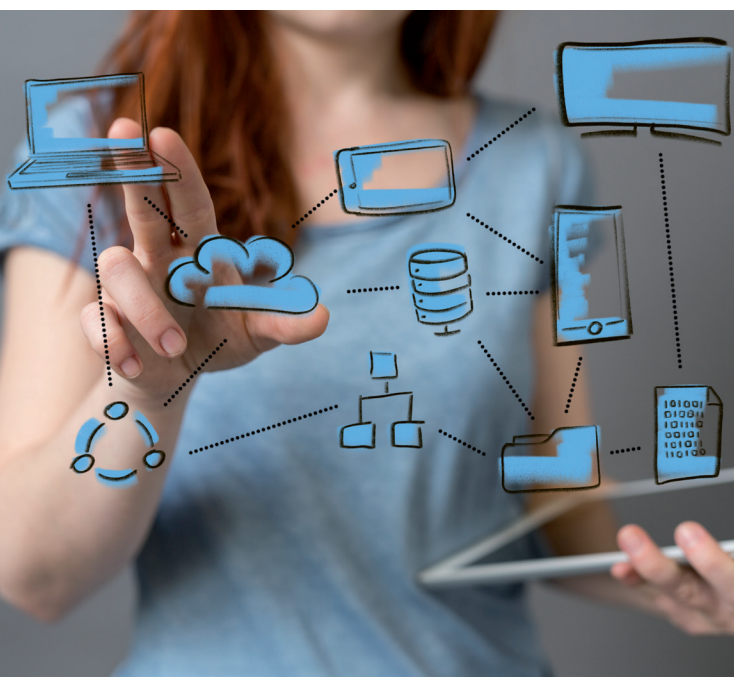
Welche Umfänge und Auswirkungen die Ressourcenintensität der Digitalisierung hat, ist schwer nachzuvollziehen: Die Informationen und Umweltdaten für IKT-Geräte und -Dienstleistungen sind unsicher, uneinheitlich oder nicht vorhanden. Doch

nur wenn Ausmaß und Auswirkungen bekannt und messbar sind, lassen sich die entsprechenden Produkte und Anwendungen nachhaltiger gestalten und können Verbraucher*innen bei ihren Kauf- und Nutzungsentscheidungen unterstützt werden. Das Querschnittsfeld „**Datenlage und Transparenz**“ zeigt auf, dass Berechnungs- und Bewertungsmethoden vereinheitlicht, die Datenlage grundsätzlich verbessert und die Informationen veröffentlicht und verfügbar gemacht werden müssen. Das Gestaltungsfeld gilt als Querschnittsfeld, weil es alle Bereiche der Digitalisierung sowie alle identifizierten Gestaltungsfelder betrifft und diese davon profitieren würden.

Digitale Trends werden oft als nachhaltig beworben, haben aber selbst einen großen ökologischen Fußabdruck. Für ein Verständnis der Umweltwirkungen digitaler Anwendungen und für Maßnahmen zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks sind umfassendere **Folgenabschätzungen** in sämtlichen Bereichen der Digitalisierung notwendig. Ein systematisches Monitoring durch verschiedene Akteure würde dabei helfen, den Fortschritt und die Auswirkungen der Digitalisierung im Blick zu behalten und Handlungsoptionen für eine nachhaltigere Gestaltung zu identifizieren.

Die Bearbeitung der in den Gestaltungsfeldern aufgegriffenen Themenfelder erfordert die **Zusammenarbeit vieler Akteure*Akteurinnen** aus Politik, Wirtschaft, Forschung und Zivilgesellschaft. Zur Verdeutlichung soll ein einfaches Beispiel aus dem Gestaltungsfeld „Energiebedarf“ dienen: Um die Energieeffizienz von Rechenzentren zu verbessern, könnte die Politik Rahmenbedingungen für energieeffiziente Rechenzentren schaffen und die Unternehmen könnten Daten zum Energiebedarf der Rechenzentren bereitstellen. Die Forschung müsste die Erarbeitung von Standards und Lösungen für energieeffiziente Rechenzentren und für die Datenbereitstellung unterstützen. Auf dieser Grundlage könnten die Verbraucher*innen das Nachhaltigkeitskriterium Energieeffizienz in ihre Entscheidungen einbeziehen und Dienste mit energieeffizienten Rechenzentren bevorzugen.

Im nächsten Schritt sollten die genannten Gestaltungsfelder priorisiert werden. Alle relevanten Akteure*Akteurinnen sollten gemeinsam konkrete Lösungen für eine nachhaltigere Gestaltung der Digitalisierung erarbeiten.



Quelle: vegefox.com – stock.adobe.com

8 Weiterer Forschungsbedarf

Basierend auf den zuvor dargestellten Analysen und Arbeiten im Forschungsvorhaben wurden übergreifende Forschungsbedarfe identifiziert, die eine nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung ermöglichen.

Ressourceneffizienz und kreislaufwirtschaftliche Ansätze: Ein zentraler Forschungsbedarf besteht darin, ressourceneffiziente Hardwarekomponenten zu entwickeln und Alternativen für kritische Rohstoffe zu identifizieren. Dies erfordert interdisziplinäre Zusammenarbeit zwischen Ingenieuren*Ingenieurinnen, Materialwissenschaftlern* Materialwissenschaftlerinnen und Umweltfachleuten. Die Forschungsprojekte sollten sich darauf konzentrieren, nachhaltige Materialien und Fertigungstechniken zu entwickeln, die den Ressourcenverbrauch in der Produktion von IKT-Geräten reduzieren. Darüber hinaus spielt die Förderung von Technologien für eine längere Lebensdauer von Geräten eine entscheidende Rolle. Dieses Ziel lässt sich durch Reparierbarkeit, modulare Designs und Upgrade-Möglichkeiten erreichen. Die zirkuläre Nutzung digitaler Geräte und Dienstleistungen ist ein Schlüsselfaktor für Ressourceneinsparungen. Im Sinne spürbarer Fortschritte müssen sich die Forschungsaktivitäten in diesem Bereich ferner auf die effiziente Nutzung von Rohstoffen und das Recycling digitaler Geräte konzentrieren. Sinnvoll wären hier vor allem spezialisierte Studien für verschiedene Produktgruppen, Sektoren und Wiederverwertungsmöglichkeiten. Ein digitaler Produktpass, der die Umweltwirkungen der Geräte transparent erfasst, kann dabei ein wichtiger Treiber sein.

Identifikation von Recycling-Potenzialen: Für eine ganzheitliche Bewertung der Substitution von Primär- durch Sekundärrohstoffe müssen die durch Recycling maximal nutzbaren Sekundärrohstoffmenen ganzheitlich bewertet werden. Im gegenständigen Vorhaben standen entsprechende Abschätzungen nicht zur Verfügung.

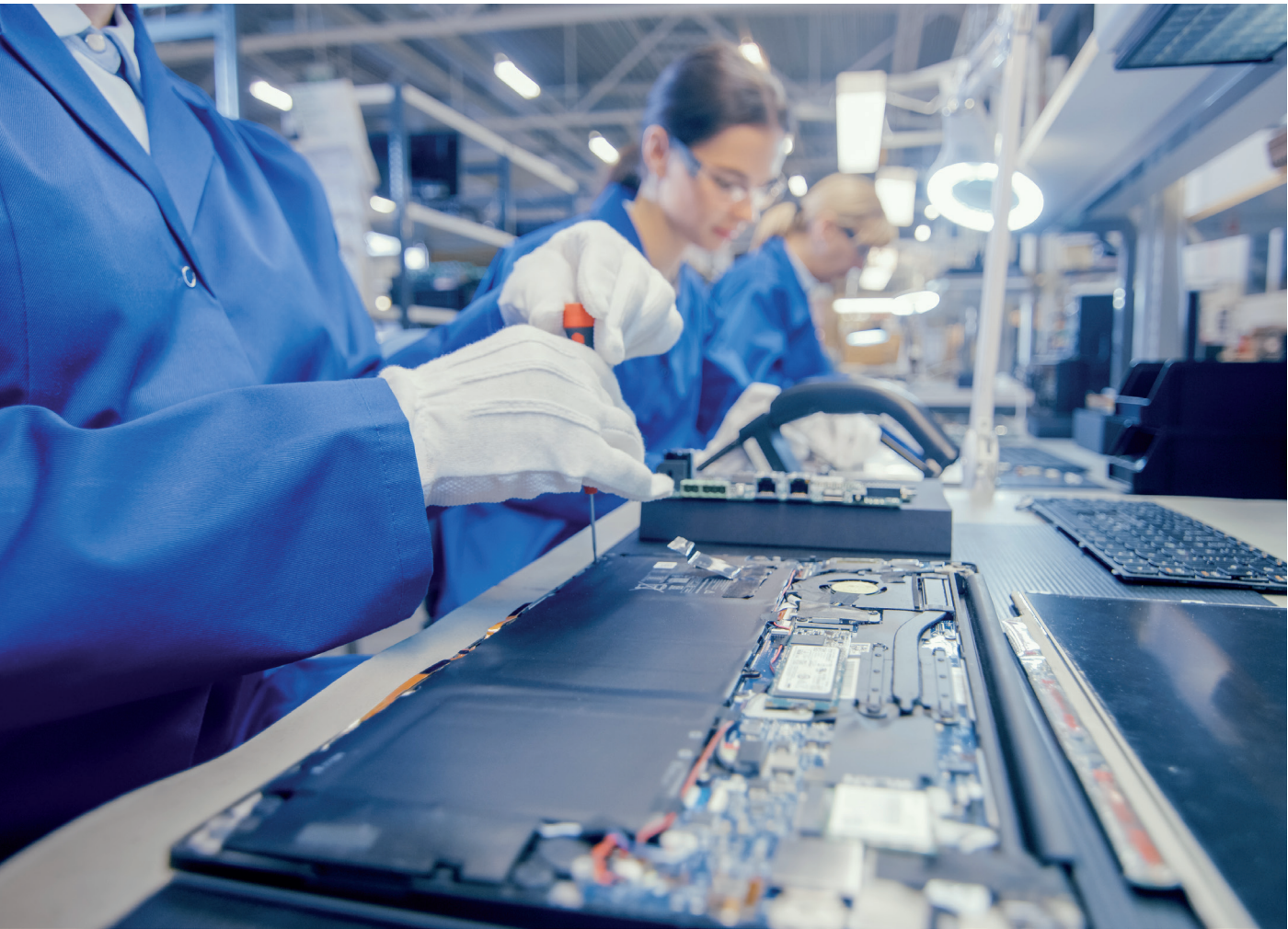
Energieeffizienz und erneuerbare Energien: Das Forschungsvorhaben zeigt deutlich, dass die Digitalisierung ein maßgeblicher Treiber für den globalen Energieverbrauch ist. Es ist notwendig, dieses Thema bewusst anzugehen und innovative Technologien und Strategien zu erforschen, um den Energieverbrauch von IKT-Produkten zu minimieren. Denkbar

sind effiziente Rechenzentren, intelligente Energiemanagementsysteme und die Integration erneuerbarer Energien in den digitalen Betrieb. Die Forschung in diesem Bereich kann dazu beitragen, den ökologischen Fußabdruck der digitalen Infrastruktur erheblich zu verringern.

Nachhaltige Lieferketten und Beschaffung: Die Schaffung nachhaltiger Lieferketten für digitale Geräte und Dienstleistungen erfordert weitere Forschungsanstrengungen zur Optimierung von Transport- und Logistiklösungen. Dies kann dazu beitragen, den CO₂-Fußabdruck der Digitalisierung zu reduzieren. Zudem sollten Nachhaltigkeitskriterien in Beschaffungsprozesse integriert werden, damit IKT-Produkte umweltfreundlich hergestellt und vertrieben werden. Hindernisse und Anreize für eine nachhaltige Beschaffung sowie die sozialen Auswirkungen sind in diesem Kontext wichtige, noch zu wenig beleuchtete Aspekte.

Bildung, Bewusstsein und Rebound-Effekte: Nicht zu unterschätzen ist das Potenzial von Wissen und Sensibilisierung in Bezug auf die Umweltwirkungen der Digitalisierung. Dementsprechend sollte sich die Forschung nicht nur mit technologischen Aspekten befassen. Sie muss vielmehr auch Bildungsprogramme entwickeln, die Menschen über die Bedeutung von Ressourceneffizienz und nachhaltiger Nutzung digitaler Technologien aufklären. So könnten Verhaltensänderungen auf individueller und organisatorischer Ebene erzielt werden. Wichtig in diesem Zusammenhang ist auch die Analyse von Rebound-Effekten. Dabei kommt es durch Ressourceneffizienztechnologien zu einer paradoxen Zunahme des Verbrauchs. Nur wenn man das Nutzungsverhalten gegenüber digitalen Angeboten versteht, lassen sich unerwünschte Auswirkungen – wie eben ein erhöhter Energieverbrauch – minimieren. Dies erfordert interdisziplinäre Studien, die Verhaltensökonomie, Sozialwissenschaften und Technologieintegration kombinieren.

Foresight-Ansätze: Ansätze der Zukunftsforschung (*foresight*) zur Antizipation zukünftiger Entwicklungen sollten häufiger genutzt, aber auch durch Forschungsanstrengungen unterstützt werden. Daraus ergibt sich eine vorausschauende Perspektive, die in die Planung von Forschungsaktivitäten integriert werden kann. So lassen sich der Wandel aktiv



Quelle: Gorodenkoff – stock.adobe.com

gestalten und zukünftige Herausforderungen einbeziehen. Damit einhergehend sind – z. B. zur Überwachung des Ressourcenverbrauchs digitaler Technologien – Langzeitstudien erforderlich, die Trends und Entwicklungen aussagekräftig aufdecken bzw. validieren.

Eigenständige Szenarioprozesse: Mit dem Modell GRAMOD wurde im Forschungsvorhaben ein eigenständiger Bewertungsansatz entwickelt, der die Simulation alternativer zukünftiger Entwicklungen in unterschiedlichen Transformationsbereichen ermöglicht. Bislang wurde dieser Ansatz noch nicht dazu genutzt, detaillierte sektorale Entwicklungsszenarien (bspw. zum zukünftigen Einsatz digitalisierungsrelevanter Produkte durch unternehmensnahe Dienstleister, im Fahrzeugbau oder in anderen Wirtschaftsbereichen) zu parametrisieren. Entsprechende Parametrisierungen sollten daher zukünftig in gemeinsamen Szenarioprozessen im Austausch mit sektoralen Stakeholdern erfolgen.

Der beschriebene Forschungsbedarf erstreckt sich über **verschiedene Disziplinen**: von Ingenieurwissenschaften über Sozialwissenschaften bis hin zu Wirtschaft und Umweltschutz. Daher spielen die Förderung interdisziplinärer Forschung und die Schaffung von Partnerschaften eine entscheidende Rolle. Ein Schlüsselinstrument könnte dabei der Stakeholder-Dialog sein. Dieser bringt verschiedene Akteure aus Politik, Wirtschaft, Wissenschaft, Industrie, Umweltschutz und Normung mit der Absicht zusammen, gemeinsame Ziele zu definieren, Lösungen zu entwickeln und Rahmenbedingungen zu schaffen. Ein solcher Dialog könnte die Grundlage für ein gemeinsames Verständnis von Handlungsbedarfen und Handlungsoptionen bilden. Die Einbindung von Stakeholdern mit vielfältigen Kompetenzen würde fundierte und innovative Lösungsansätze ermöglichen. Ein **Stakeholder-Dialog** könnte dabei helfen, die unterschiedlichen Prioritäten und Bedenken der beteiligten Parteien zu identifizieren und mögliche Konflikte frühzeitig anzugehen.

9 Quellenverzeichnis

- Abraham, V; Kirchdorfer, R; Albus, N; Aigner, J; Wirges, N; Milde, K; Klose, A; Böbel, M; Lückerrath, D; Meyer, M; Distelkamp, M; Banning, M; Philippi, A; Haack, D; Risch, L; Elsesser, P-V (2023a): Abschlussbericht Digitalisierung und natürliche Ressourcen. Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/digital-ressourcen> (in Erscheinung)
- Abraham, V; Kirchdorfer, R; Albus, N; Aigner, J; Wirges, N; Milde, K; Klose, A; Böbel, M; Lückerrath, D; Meyer, M; Distelkamp, M; Banning, M; Philippi, A; Haack, D; Risch, L; Elsesser, P-V (2023b): Anhang zum Abschlussbericht Digitalisierung und natürliche Ressourcen. Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Download unter: <http://www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen> (in Erscheinung)
- Braun, A (2020): How Much Bandwidth Does Video Calling Use? - Make Tech Easier. Maketecheasier. <https://www.maketecheasier.com/how-much-bandwidth-does-video-calling-use/> (Stand: 14.12.2023)
- Buchert, M; Degreif, S; Bulach, W; Schüler, D; Prakash, S; Möller, M; Köhler, A; Behrendt, S; Nolte, R; Röben, A (2019): Substitution als Strategie zur Minderung der Kritikalität von Rohstoffen für Umwelttechnologien – Potentialermittlung für Second-Best-Lösungen. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/substitution-als-strategie-minderung-rohstoffkritikalitaet> (Stand: 14.12.2023)
- Cabernard, L (2019): Global supply chain analysis of material-related impacts in ICT (MRIO approach). 73rd LCA - Digital Transformation: LCA of digital services, multifunctional devices and cloud computing, Eidgenössische Technische Hochschule Zürich.
- DIN EN ISO (14040:2021-02): DIN EN ISO 14040 Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020. Ausgabe 2021-02
- Europäische Kommission (2020): Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken (COM(2020) 474 final).
- Europäische Kommission (2023): Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020.
- Gröger, J; Liu, R; Stobbe, L; Druschke, J; Richter, N (2021): Green cloud computing. Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/en/publikationen/green-cloud-computing> (Stand: 14.12.2023)
- Jacob, K; Postpischil, R; Graaf, L; Ramezani, M; Ostertag, K; Pfaff, M; Reuster, L; Zerkawy, F (2021): Handlungsfelder zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/handlungsfelder-zur-steigerung-der> (Stand: 14.12.2023)
- Köhn, M; Gröger, J; Stobbe, L (2020): Energie- und Ressourceneffizienz digitaler Infrastrukturen. Ergebnisse des Forschungsprojektes „Green Cloud Computing“. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energie-ressourceneffizienz-digitaler> (Stand: 14.12.2023)
- Kristof, K; Hennicke, P (2010): „Materialeffizienz und Ressourcenschonung“ – Kernergebnisse des Projekts MaRes. https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/4468/file/MaRes_final_de.pdf (Stand: 14.12.2023)
- Lenzen, M; Geschke, A; Abd Rahman, M D; Xiao, Y; Fry, J; Reyes, R; Dietzenbacher, E; Inomata, S; Kanemoto, K; Los, B; Moran, D; Schulte in den Bäumen, H; Tukker, A; Walmsley, T; Wiedmann, T; Wood, R; Yamano, N (2017): The Global MRIO Lab – charting the world economy. Economic Systems Research, 29(2), 158–186.
- Lenzen, M; Geschke, A; West, J; Fry, J; Malik, A; Giljum, S; Milà i Canals, L; Piñero, P; Lutter, S; Wiedmann, T; Li, M; Sevenster, M; Potočník, J; Teixeira, I; Van Voore, M; Nansai, K; Schandl, H (2022): Implementing the material footprint to measure progress towards Sustainable Development Goals 8 and 12. Nature Sustainability, 5(2), 157–166.
- Liu, R; Gailhofer, P; Gensch, C.-O; Köhler, A; Wolff, F (2019): Impacts of the digital transformation on innovation across sectors - Issue Paper under Task 3 from the “Service contract on future EU environment policy”.
- Lutter, S; Kreimel, J; Giljum, S; Dittich, M; Limberger, S; Ewers, B; Schoer, K; Manstein, C (2022): Die Nutzung natürlicher Ressourcen. Ressourcenbericht für Deutschland 2022. Spezial: Rohstoffnutzung der Zukunft. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. Dessau-Roßlau. Download unter: <https://www.umweltbundesamt.de/ressourcenbericht2022> (Stand: 14.12.2023)
- Mostert, C; Bringezu, S (2019): Measuring Product Material Footprint as New Life Cycle Impact Assessment Method: Indicators and Abiotic Characterization Factors. Resources, 8(2), 61.
- Neligan, A; Engels, B; Schaefer, T; Schleicher, C; Fritsch, M; Schmitz, E; Wiegand, R (2021): Digitalisierung als Enabler für Ressourceneffizienz in Unternehmen. IW-Gutachten. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie – Hauptbericht. Köln.
- OECD (2011): OECD Guide to Measuring the Information Society 2011. OECD Publishing. Paris.
- OECD.Stat (2021): Economic Outlook No 109 - October 2021 - Long-term baseline projections. https://stats.oecd.org/Index.aspx?DataSetCode=EO109_LTB (Stand: 14.12.2023)
- Statistisches Bundesamt (2008): Klassifikation der Wirtschaftszweige - (WZ 2008). Statistisches Bundesamt. Wiesbaden.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022): World Population Prospects 2022: Summary of Results. United Nations. New York.
- WBGU (Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen; 2019): Unsere gemeinsame digitale Zukunft. WBGU. Berlin.
- Wernet, G; Bauer, C; Steubing, B; Reinhard, J; Moreno-Ruiz, E; Weidema, B (2016): The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. International Journal of Life Cycle Assessment, 21(9), 1218–1230.



► **Unsere Broschüren als Download**
Kurzlink: bit.ly/2dowYYI

 www.facebook.com/umweltbundesamt.de
 www.youtube.com/user/umweltbundesamt
 www.instagram.com/umweltbundesamt/