

TEXTE

114/2024

**Abschlussbericht**

# Digitalisierung und natürliche Ressourcen

## Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland

Veronika Abraham, Roman Kirchdorfer, Nina Albus,  
Joachim Aigner, Nils Wirges  
Ramboll Deutschland GmbH, München, Essen und  
Hamburg

Katharina Milde, Anna Klose, Mareike Böbel, Daniel  
Lückerath  
Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und  
Informationssysteme IAIS, Sankt Augustin

Mark Meyer, Martin Distelkamp, Maximilian Banning,  
Alice Philippi  
GWS Gesellschaft für Wirtschaftliche  
Strukturforschung mbH, Osnabrück

Daniel Haack, Dr. Lisa Risch, Phuong-Vy Elsesser  
Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Berlin

**Herausgeber:**  
Umweltbundesamt



TEXTE 114/2024

Ressortforschungsplan des Bundesministeriums für  
Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und  
Verbraucherschutz

Forschungskennzahl 3720 31 101 0  
FB001418

Abschlussbericht

## **Digitalisierung und natürliche Ressourcen**

Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels  
in Deutschland

von

Veronika Abraham, Roman Kirchdorfer, Nina Albus,  
Joachim Aigner, Nils Wirges  
Ramboll Deutschland GmbH, München, Essen und Hamburg

Katharina Milde, Anna Klose, Mareike Böbel, Daniel  
Lückerath, Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und  
Informationssysteme IAIS, Sankt Augustin

Mark Meyer, Martin Distelkamp, Maximilian Banning,  
Alice Philippi, GWS Gesellschaft für Wirtschaftliche  
Strukturforschung mbH, Osnabrück

Daniel Haack, Dr. Lisa Risch, Phuong-Vy Elsesser  
Deutsches Institut für Normung e. V. (DIN), Berlin

Im Auftrag des Umweltbundesamtes

## Impressum

### Herausgeber

Umweltbundesamt  
Wörlitzer Platz 1  
06844 Dessau-Roßlau  
Tel: +49 340-2103-0  
Fax: +49 340-2103-2285  
[buergerservice@uba.de](mailto:buergerservice@uba.de)  
Internet: [www.umweltbundesamt.de](http://www.umweltbundesamt.de)

### Durchführung des Vorhabens:

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

### Abschlussdatum:

Dezember 2023

### Redaktion und Fachbegleitung:

Fachgebiet I 1.1 „Grundsatzfragen, Nachhaltigkeitsstrategien und -szenarien,  
Ressourcenschonung“  
Christopher Manstein

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

ISSN 1862-4804

Dessau-Roßlau, August 2024

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

**Kurzzusammenfassung: Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland („DigitalRessourcen“)**

Digitale Anwendungen, Prozesse und Dienstleistungen sind integraler Bestandteil des modernen Lebens. Ihre Bedeutung steigt stetig an. Die Umweltauswirkungen des digitalen Wandels sind jedoch nicht ausführlich genug untersucht. Es fehlt etwa eine ganzheitliche Betrachtung, die sowohl die direkten Effekte (z. B. Ressourcenbedarf und Treibhausgasemissionen) als auch die indirekten Effekte (z. B. veränderte Produktions- und Konsummuster) digitaler Anwendungen einbezieht. Digitale Anwendungen können den Bedarf an natürlichen Ressourcen verringern, etwa durch intelligente Lösungen in der Industrie. Umgekehrt wurde ihre Ressourcenintensität, d. h. die Ressourcenaufwände zur Herstellung digitaler Anwendungen, bisher kaum untersucht.

Das Forschungsvorhaben DigitalRessourcen hat daher die Ressourcenintensität und das Treibhausgaspotential der digitalen Transformation in Deutschland sowohl auf Mikro- als auch auf Makroebene berechnet und analysiert.

In zehn Fallstudien (Mikroebene) verschiedener digitaler Anwendungen wurde eine ökobilanzielle Betrachtung durchgeführt und die Ressourcenintensitäten rechnerisch bestimmt. Es wurde dabei festgestellt, dass die Hälfte der untersuchten digitalen Anwendungen in unterschiedlichem Maße ein Entlastungspotenzial für die Umwelt bieten (Videokonferenzen, digitale Medien, online Lebensmittelhandel, Carsharing, Plattformen von Verbraucher\*in zu Verbraucher\*in). Bei den anderen fünf Fallstudien wurde festgestellt, dass sie geringes oder gar kein Entlastungspotenzial bieten oder sich sogar negativ auf die Umwelt auswirken können (Smart-Home-System, Kryptowährung, E-Sports, 3D-Druck, E-Health).

Mit einem multiregionalen Input-Output-Modell (Makroebene) wurde daneben der Rohstoffeinsatz (RMC u. RMI) und der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland für die Jahre 2000-2020 rechnerisch bestimmt. Rohstoffeinsatz und der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Digitalisierung werden vor allem durch die Nachfrage nach Hardware getrieben, die überwiegend aus asiatischen Regionen importiert wird.

Außerdem wurden mögliche Entwicklungen der Ressourcenintensität (inkl. CO<sub>2</sub>) der Digitalisierung in Deutschland bis zum Jahr 2050 in sechs unterschiedlichen Szenarien berechnet und dargestellt.

Das Forschungsvorhaben DigitalRessourcen schließt mit der Identifizierung von neun Gestaltungsfeldern und beispielhaften Maßnahmen für Politik, Forschung, Unternehmen und Verbraucher\*innen Vorhaben für eine nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung in Deutschland ab.

**Dieser Bericht wird durch einen umfangreichen Anhang ergänzt, der in einem separaten Dokument veröffentlicht wurde (Schlussbericht: Abraham *et al.*, 2023a; Anhang: Abraham *et al.*, 2023b<sup>1</sup>). Eine Zusammenfassung der Forschungsergebnisse ist auch in einer Fachbroschüre veröffentlicht (Milde *et al.*, 2023).**

---

<sup>1</sup> Vgl. [www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen](http://www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen) (Stand: 31.12.2023).

**Short abstract: Digitalisation and Natural Resources - Analysis of the digital transformation's resource intensity in Germany ("DigitalRessourcen")**

Digital applications, processes and services are an integral part of modern life. Their importance is constantly increasing. However, the environmental impact of the digital transformation has not been analysed in sufficient detail. For example, there is a lack of a holistic view that includes both the direct effects (e.g. resource requirements and greenhouse gas emissions) and the indirect effects (e.g. changes in production and consumption patterns) of digital applications. Digital applications can reduce the demand for natural resources through intelligent solutions in industry. Conversely, their resource intensity, i.e. the resources required to produce these digital applications, has hardly been analysed to date.

Therefore, the *DigitalRessourcen* research project calculated and analysed the resource intensity and greenhouse gas potential of the digital transformation in Germany at both the micro and macro level.

In ten case studies (micro level) of various digital applications, a life cycle assessment was carried out and the resource intensities were calculated. It was found that half of the digital applications analysed offer varying degrees of environmental relief potential (video conferencing, digital media, online grocery shopping, car sharing, consumer-to-consumer platforms). The other five case studies were found to offer little or no potential for environmental relief or may even have a negative impact on the environment (Smart-Home systems, cryptocurrency, e-sports, 3D printing, e-health).

A multi-regional input-output model (macro level) was also used to calculate the raw material input (RMC and RMI) and the carbon footprint of digitalisation in Germany for the years 2000-2020. The use of raw materials and the carbon footprint of digitalisation are primarily driven by the demand for hardware, which is mainly imported from regions of Asia.

In addition, possible developments in the resource intensity (incl. CO<sub>2</sub>) of digitalisation in Germany up to the year 2050 were calculated and presented in six different scenarios.

The *DigitalRessourcen* research project concludes with the identification of nine design fields and exemplary measures for politics, research, companies, and consumer projects for a sustainable design of digitalisation in Germany.

**This report is supplemented by an extensive appendix, which was published in a separate document (final report: Abraham *et al.*, 2023a; appendix: Abraham *et al.*, 2023b<sup>2</sup>). A summary of the research results can be also found in the published brochure (brochure, Milde *et al.*, 2023).**

---

<sup>2</sup> Vgl. [www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen](http://www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen) (Stand: 31.12.2023).

## Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	12
Tabellenverzeichnis.....	21
Abkürzungsverzeichnis.....	24
Zusammenfassung.....	29
Summary.....	40
1 Hintergrund.....	50
2 Bestandsaufnahme.....	53
2.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	53
2.2 Vorgehensweise.....	53
2.3 Politischer Rahmen und wissenschaftlicher Stand.....	54
2.3.1 Politischer Rahmen.....	54
2.3.2 Erörterung des wissenschaftlichen Stands.....	66
2.3.3 Fazit politischer und wissenschaftlicher Diskussionsstand.....	75
2.4 Recherche zu quantitativen Vorarbeiten.....	77
2.4.1 Mikroebene.....	77
2.4.2 Meso- und Makroebene.....	84
3 System- und Betrachtungsgrenzen.....	89
3.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung.....	89
3.2 Vorgehensweise.....	89
3.3 Grundlegende Überlegungen zur Systematisierung der Digitalisierung.....	89
3.4 Konzeptionelle Einordnung der Digitalisierung aus Ressourcensicht.....	90
3.4.1 Etablierte Leitmodelle zur konzeptionellen Abgrenzung des „Systems Digitalisierung“.....	92
3.4.2 Ableitung einer konzeptionellen Perspektive auf das „System Digitalisierung“.....	94
3.5 Identifikation und Diskussion von methodischen Betrachtungsgrenzen.....	97
3.5.1 Gegenüberstellung Ökobilanzierung und Input-Output-Analyse sowie Erkenntnisse aus der Recherche zu quantitativen Ergebnissen.....	98
3.5.2 Ökobilanzierung und Sachbilanzierung.....	100
3.5.3 Input-Output-Modelle (Makroebene).....	103
3.5.3.1 Von nationalen Input-Output-Tabellen zu globalen EE-MRIO-Datensätzen.....	103
3.5.4 Abgrenzung des „Systems Digitalisierung“ aus Input-Output-Perspektive.....	106
Funktionale Abgrenzung des Systems „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“.....	107
Institutionelle Abgrenzung des Systems „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“.....	109

Räumliche Abgrenzung des Systems „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“ .....	111
3.6 Zusammenfassung und Fazit System- und Betrachtungsgrenzen .....	112
4 Fallstudien Lebenszyklusdaten.....	114
4.1 Auswahl und Priorisierung der Fallstudien .....	115
4.2 Vorgehensweise bei der Berechnung der Ressourcenintensität und weiterer Indikatoren.....	116
4.2.1 Allgemeines Vorgehen .....	116
4.2.2 Datengrundlagen und Modellierungs-Software .....	117
4.2.3 Indikatoren und Angaben zu den Fallstudien .....	118
4.2.4 Methodische Details zur Berechnung der Indikatoren in den Fallstudien .....	123
4.3 Fallstudien.....	124
4.3.1 Fallstudie Videokonferenz im Homeoffice.....	124
4.3.2 Fallstudie Smart-Home-System .....	130
4.3.3 Fallstudie digitale Medien.....	136
4.3.4 Fallstudie <i>E-Grocery</i> : Online-Lebensmittelhandel .....	141
4.3.5 Fallstudie Carsharing.....	148
4.3.6 Fallstudie Kryptowährung.....	154
4.3.7 Fallstudie <i>Consumer-to-Consumer</i> -Plattform .....	159
4.3.8 Fallstudie E-Sport .....	165
4.3.9 Fallstudie privater 3D-Druck .....	170
4.3.10 Fallstudie E-Health: Smartwatch für digitale Fitness und Gesundheit .....	175
4.4 Diskussion der Ergebnisse und Fazit zu den Fallstudien .....	180
5 Makroökonomische Berechnungen .....	184
5.1 Aufgabenstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise .....	184
5.2 Hintergrund: Quantitative Analysen von Rohstoff- und Emissionsintensitäten auf Makro- /Mesoebene.....	186
5.2.1 Methodische Grundlagen .....	186
5.2.1.1 Grundsätzlich anwendbare Methoden.....	186
5.2.1.2 Das Grundkonzept Input-Output-basierter Zuordnungen multinationaler Lieferverflechtungen zu heimischen Nachfrageentwicklungen .....	187
5.2.2 Empirische Grundlagen.....	191
5.2.2.1 Für makroökonomische Berechnungen etablierte globale MRIO-Datenbanken .....	191
5.2.2.2 Empirische Datenbasis der eigenen Analysen: GLORIA Release 055 .....	192
5.2.2.2.1 Überblick des Berichtsumfangs der Datenbank GLORIA .....	192



5.2.3	Vorstellung des im Vorhaben für makroökonomische Berechnungen und Simulationen entwickelten Bewertungsmodells GRAMOD.....	204
5.2.3.1	Makroökonomische Erfassung gesamtwirtschaftlicher Entwicklungen: Klassifikationsdetails.....	204
5.2.3.2	Makroökonomische Erfassung digitalisierungsrelevanter Entwicklungen.....	206
5.2.3.3	Bewertungsalgorithmen zur Abschätzung von Rohstoff- und Emissionsintensität des digitalen Wandels in Deutschland.....	211
5.3	Digitaler Wandel in Deutschland: Makroökonomische Berechnungen.....	213
5.3.1	Methodische Anmerkungen .....	213
5.3.2	Ergebnisse.....	213
5.4	Digitaler Wandel in Deutschland: Umweltökonomische Bewertung .....	224
5.4.1	Umweltökonomische Entwicklungen des digitalen Wandels: Materialfußabdrücke für Deutschland.....	224
5.4.1.1	Betrachtung des Indikators RMC .....	224
5.4.1.2	Betrachtung des Indikators RMI .....	231
5.4.2	Umweltökonomische Entwicklungen des digitalen Wandels: CO <sub>2</sub> -Fußabdrücke für Deutschland .....	235
5.5	Zusammenfassung und Fazit.....	238
5.5.1	Zusammenfassende Anmerkungen zu den umweltökonomischen Befunden .....	238
5.5.2	Zwischenfazit zu Kapitel 5.....	242
6	Simulationen: Anwendung des Modells GRAMOD zur Simulation zukünftiger Entwicklungen bis 2050 .....	244
6.1	Hintergrund.....	244
6.1.1	Grundlagen des Modells.....	244
6.1.2	Parametrisierung der Trendprojektion.....	247
6.1.2.1	Gesamtwirtschaftliches Umfeld .....	247
6.1.2.2	Energie- und klimapolitisches Umfeld .....	252
6.1.2.3	Themenfeld Digitalisierung.....	253
6.2	Ergebnisse: Die Trendprojektion.....	256
6.2.1	Globale Umfeldentwicklungen .....	256
6.2.2	Entwicklungen in Deutschland.....	262
6.3	Ergebnisse: Die Simulationen.....	271
6.3.1	Alternative Szenarioparametrisierungen.....	271
6.4	Zusammenfassung .....	286
7	Diskussion und Ableitung von Gestaltungsansätzen.....	288
7.1	Definition und Methodik für die Herleitung der Gestaltungsfelder .....	288

7.2	Gestaltungsfeld „Kreislaufwirtschaft“ .....	290
7.2.1	Ausgangslage .....	290
7.3	Gestaltungsfeld „Digitalisierungsrelevante Rohstoffe“ .....	292
7.3.1	Ausgangslage .....	292
7.3.2	Gestaltungsmöglichkeiten .....	294
7.3.2.1	Politische Maßnahmen .....	294
7.3.2.2	Unternehmen .....	294
7.3.2.3	Forschungsbedarfe .....	294
7.4	Gestaltungsfeld „Globale Lieferketten“ .....	295
7.4.1	Gestaltungsmöglichkeiten .....	295
7.4.1.1	Politische Maßnahmen .....	295
7.4.1.2	Verbraucher*innen.....	296
7.4.1.3	Unternehmen .....	296
7.4.1.4	Forschungsbedarfe .....	296
7.4.2	Ausgangslage .....	297
7.4.3	Gestaltungsmöglichkeiten .....	299
7.4.3.1	Politische Maßnahmen .....	299
7.4.3.2	Verbraucher*innen.....	299
7.4.3.3	Unternehmen .....	299
7.4.3.4	Forschungsbedarfe .....	299
7.5	Gestaltungsfeld „Rebound-Effekte“ .....	300
7.5.1	Ausgangslage .....	300
7.5.2	Gestaltungsmöglichkeiten .....	302
7.5.2.1	Politische Maßnahmen .....	302
7.5.2.2	Verbraucher*innen.....	303
7.5.2.3	Unternehmen .....	303
7.5.2.4	Forschungsbedarfe .....	303
7.6	Gestaltungsfeld „Energiebedarf“ .....	304
7.6.1	Ausgangslage .....	304
7.6.2	Gestaltungsmöglichkeiten .....	305
7.6.2.1	Politische Maßnahmen .....	305
7.6.2.2	Verbraucher*innen.....	306
7.6.2.3	Unternehmen .....	306
7.6.2.4	Forschungsbedarfe .....	306

7.7	Gestaltungsfeld „Relevante Sektoren“ .....	307
7.7.1	Gestaltungsmöglichkeiten .....	312
7.8	Gestaltungsfeld „Suffizienz“ .....	312
7.8.1	Ausgangslage .....	312
7.8.2	Gestaltungsmöglichkeiten .....	315
7.8.2.1	Politische Maßnahmen .....	315
7.8.2.2	Verbraucher*innen .....	315
7.8.2.3	Unternehmen .....	315
7.8.2.4	Forschungsbedarfe .....	315
7.9	Querschnittsfeld „Datenlage und Transparenz“ .....	316
7.9.1	Ausgangslage .....	316
7.9.2	Gestaltungsmöglichkeiten .....	318
7.9.2.1	Politische Maßnahmen .....	318
7.9.2.2	Verbraucher*innen .....	318
7.9.2.3	Unternehmen .....	319
7.9.2.4	Forschungsbedarfe .....	319
7.10	Gestaltungsfeld „Folgenabschätzung“ .....	319
7.10.1	Ausgangslage .....	319
7.10.2	Gestaltungsmöglichkeiten .....	321
7.10.2.1	Politische Maßnahmen .....	321
7.10.2.2	Verbraucher*innen .....	322
7.10.2.3	Unternehmen .....	322
7.10.2.4	Forschungsbedarfe .....	322
7.11	Zusammenfassung (Zwischenfazit) .....	322
8	Fazit, Ausblick, weiterer Forschungsbedarf .....	324
	Quellenverzeichnis .....	331

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Konzeptionelle Einordnung potenzieller Umweltwirkungen der Digitalisierung.....	67
Abbildung 2:	Produktbezogene Ressourcenbedarfe entlang der Wertschöpfungskette.....	69
Abbildung 3:	Illustrative Darstellung unterschiedlicher Perspektiven auf die Ressourcenintensität der Digitalisierung .....	76
Abbildung 4:	Mengenmäßige Verteilung der Untersuchungsgegenstände ..	79
Abbildung 5:	Klassifizierung der Untersuchungsgegenstände.....	80
Abbildung 6:	Häufigkeit untersuchter Indikatoren für die Analyse der Ressourcenintensität sowie weiterer Umweltwirkungen .....	81
Abbildung 7:	Häufigkeit der untersuchten Lebenszyklusphasen.....	82
Abbildung 8:	Geografischer Bezug.....	83
Abbildung 9:	Globale Wirkungen der IKT-Bereiche .....	86
Abbildung 10:	Einordnung von Digitalisierung, digitaler Transformation und digitalem Wandel .....	91
Abbildung 11:	Leitmodelle für die Definition des "Systems Digitalisierung" ...	93
Abbildung 12:	Schematische (indikative) Darstellung der konzeptionellen Perspektive auf das „System Digitalisierung“ (Betrachtungsmodell).....	96
Abbildung 13:	Iterative und standardisierte Phasen der Ökobilanzierung (Lebenszyklusanalyse) .....	101
Abbildung 14:	Generische Systemgrenzen einer Ökobilanz .....	102
Abbildung 15:	Kausale Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen potenziellen Indikatoren und Sachbilanzinformationen .....	103
Abbildung 16:	Aufbau einer nationalen IO-Tabelle und einer globalen IO-Tabelle .....	104
Abbildung 17:	Zielkonflikt zwischen Detailgrad und Datenqualität .....	105
Abbildung 18:	IKT-Güter als Teil der Gütergruppe DV-Geräte, elektronische und optische Erzeugnisse (CPA 26) .....	108
Abbildung 19:	Verwendungsstruktur von IKT-relevanten Gütergruppen in Deutschland.....	109
Abbildung 20:	Struktur der intermediären Verwendung von IKT-relevanten Gütergruppen in Deutschland .....	110
Abbildung 21:	Herkunft der deutschen Importe von IKT-Gütern .....	111
Abbildung 22:	Indikatorenset für die Analyse auf Mikroebene im Rahmen der Fallstudien .....	119
Abbildung 23:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Eine Stunde Videokonferenz“ .....	125
Abbildung 24:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Eine Stunde Videokonferenz“ in Gramm* .....	126

Abbildung 25:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ in Prozent und Milligramm...127
Abbildung 26:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase* .....129
Abbildung 27:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“* .....131
Abbildung 28:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in Kilogramm* .....132
Abbildung 29:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in Prozent und Gramm.....133
Abbildung 30:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase* .....134
Abbildung 31:	Vergleich der Treibhausgasemissionen der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ mit Szenarien zur Treibhausgaseinsparung in Tonnen CO <sub>2</sub> -Äq .....135
Abbildung 32:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ .....137
Abbildung 33:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm .....138
Abbildung 34:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase im Gerätemix-Szenario* .....140
Abbildung 35:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ .....142
Abbildung 36:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von

	„E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Kilogramm .....	144
Abbildung 37:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in dem ressourcenschonenden und -intensiven Szenario in Prozent und Gramm/Milligramm .....	145
Abbildung 38:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „E- Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ absolut und in Prozent nach Szenarien* .....	146
Abbildung 39:	Vergleich ausgewählter Indikatoren der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ absolut und in Prozent nach Komponenten und Szenarien* .....	147
Abbildung 40:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ .....	149
Abbildung 41:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ in Gramm* .....	150
Abbildung 42:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ in Prozent und Milligramm .....	151
Abbildung 43:	Anteile der Rohstoffarten am Primärrohstoffeinsatz in der Nutzungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ mit Grünstrom (Szenario 1) und mit konventionellem Strom (Szenario 2).....	152
Abbildung 44:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase in den Szenarien Grünstrom (Szenario 1 – S1) und konventioneller Strom (Szenario 2 – S2)* .....	153
Abbildung 45:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ .....	155
Abbildung 46:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Megatonnen.....	156

Abbildung 47:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Prozent und Tonnen...157
Abbildung 48:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ absolut und in Prozent nach Anteil des Strombedarfs und Mining-Hardware (Standardszenario)* .....158
Abbildung 49:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ .....160
Abbildung 50:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Kilogramm .....162
Abbildung 51:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase in den drei Szenarien; S1 = RZ <sub>effizient</sub> , S2 = RZ <sub>2011</sub> , S3 = Abholung* .....164
Abbildung 52:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Eine Stunde E-Sport“ .....166
Abbildung 53:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Eine Stunde E-Sport“ in Gramm* .....167
Abbildung 54:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ in Milligramm und Prozent.....168
Abbildung 55:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ absolut und in Prozent nach Herstellungs- und Nutzungsphase* .....169
Abbildung 56:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ .....171
Abbildung 57:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Kilogramm* .....172
Abbildung 58:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Gramm und Prozent .....173
Abbildung 59:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks zur Bereitstellung der

	Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ absolut und in Prozent nach Herstellungs- und Nutzungsphase* .....	174
Abbildung 60:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ .....	176
Abbildung 61:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ in Gramm .....	177
Abbildung 62:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ in Mikrogramm und Prozent .....	178
Abbildung 63:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ absolut und in Prozent nach Herstellungs- und Nutzungsphase* .....	179
Abbildung 64:	Schema einer Input-Output-Tabelle (I-O-Tabelle).....	187
Abbildung 65:	Schema einer MRIO-Tabelle .....	189
Abbildung 66:	Ergebnisvergleich für unterschiedliche Bewertungsansätze: Deutschlands jährlicher Rohstoffkonsum (RMC) von 2008 bis 2020 in Millionen Tonnen.....	199
Abbildung 67:	Ergebnisvergleich für unterschiedliche Bewertungsansätze: Deutschlands Rohstoffeinsatz (RMI) von 2008 bis 2020 in Millionen Tonnen .....	203
Abbildung 68:	Strukturelle Entwicklung der IKT-Produktionsanteile in Deutschland von 2000 bis 2020 anteilig am gesamten Produktionswert in Prozent.....	209
Abbildung 69:	Globale Verteilung der IKT-Produktionsanteile nach Ländergruppen im Jahr 2020 anteilig am gesamten globalen Produktionswert in Prozent.....	210
Abbildung 70:	Produktion von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Wirtschaftsbranchen in Milliarden Euro .....	214
Abbildung 71:	Entwicklung der globalen Produktion von IKT-Gütern und -Dienstleistungen von 2000 bis 2020 nach Ländern in Milliarden Euro .....	215
Abbildung 72:	Entwicklung der Importe von IKT-Gütern und -Dienstleistungen nach Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen in Milliarden Euro .....	216



Abbildung 73:	Strukturelle Entwicklung der Importe von IKT-Gütern und -Dienstleistungen nach Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen anteilig in Prozent.....	217
Abbildung 74:	Geografische Herkunft der von 2000 bis 2020 nach Deutschland importierten IKT-Güter und -Dienstleistungen nach Ländern in Milliarden Euro .....	217
Abbildung 75:	Entwicklung der Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen in Milliarden Euro.....	218
Abbildung 76:	Entwicklung der Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen anteilig in Prozent .....	219
Abbildung 77:	Nachfrage nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Wirtschaftsbereichen in Milliarden Euro .....	220
Abbildung 78:	Nachfrage nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Verwendungsbereichen der Wirtschaft anteilig in Prozent .....	221
Abbildung 79:	Entwicklung der verwendeten IKT-Güter in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Herkunftsländern in Milliarden Euro.....	221
Abbildung 80:	Entwicklung der verwendeten IKT-Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Herkunftsländern in Milliarden Euro .....	222
Abbildung 81:	Zusammensetzung des Rohstoff-Fußabdrucks der Digitalisierung (RMC <sub>Dig.</sub> ) in Deutschland im Jahr 2020 nach Rohstoffgruppen anteilig an der Primärrohstoffnutzung in Prozent (vgl. Anhang F, Tab. 130).....	225
Abbildung 82:	Entwicklung des RMC <sub>Dig.</sub> für IKT-Güter und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 131).....	226
Abbildung 83:	Aufteilung der Beiträge des digitalen Wandels zum deutschen RMC <sub>Dig.</sub> des Jahres 2020 nach Rohstoffen in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 132).....	227
Abbildung 84:	Geografischer Ursprung der Beiträge des digitalen Wandels zum deutschen RMC <sub>Dig.</sub> von 2000 bis 2020 nach Ländern in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 133).....	228
Abbildung 85:	Geografische Aufteilung der Beiträge des digitalen Wandels zum RMC <sub>Dig.</sub> des Jahres 2020 nach Ländern anteilig am Gesamtbetrag in Prozent (vgl. Anhang F, Tab. 134).....	229
Abbildung 86:	Geografischer Ursprung, Rohstoffgruppen und Verwendungen des RMC <sub>Dig.</sub> des digitalen Wandels im Jahr 2020, gemessen in Tonnen (vgl. Anhang F, Tab. 135).....	230

Abbildung 87:	Entwicklung des $RMI_{Dig.}$ für IKT-Güter und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen in Kilotonnen .....	231
Abbildung 88:	Zusammensetzung des $RMI_{Dig.}$ in Deutschland im Jahr 2020 nach Rohstoffgruppen anteilig an der Primärrohstoffnutzung in Prozent (vgl. Anhang F, Tab. 136).....	232
Abbildung 89:	Aufteilung der Beiträge des digitalen Wandels zum deutschen $RMI_{Dig.}$ des Jahres 2020 nach Rohstoffen in Millionen Tonnen (vgl. Anhang F, Tab. 137) .....	233
Abbildung 90:	Geografischer Ursprung der Beiträge des digitalen Wandels zum deutschen $RMI_{Dig.}$ von 2000 bis 2020 nach Ländern in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 138).....	233
Abbildung 91:	Geografische Aufteilung der Beiträge des digitalen Wandels zum $RMI_{Dig.}$ des Jahres 2020 nach Ländern anteilig am Gesamtbetrag in Prozent (vgl. Anhang F, Tab. 139).....	234
Abbildung 92:	Geografischer Ursprung, Rohstoffgruppen und Verwendungen des $RMI_{Dig.}$ des digitalen Wandels im Jahr 2020, gemessen in Tonnen (vgl. Anhang F, Tab. 140).....	235
Abbildung 93:	Emissionen des $CO_{2,Dig.}$ in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 141) ...	236
Abbildung 94:	Geografischer Ursprung der $CO_2$ -Emissionen der Digitalisierung in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Ländern in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 142) .....	237
Abbildung 95:	Emissionen des $CO_{2,Dig.}$ in Deutschland von 2000 bis 2020 nach nachfragenden Wirtschaftsbereichen in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 143).....	239
Abbildung 96:	Rohstoff-Fußabdruck ( $RMC_{Dig.}$ ) der Digitalisierung in Deutschland von 2000 bis 2020 nach nachfragenden Wirtschaftsbereichen in Millionen Tonnen.....	241
Abbildung 97:	Rohstoff-Einsatz ( $RMI_{Dig.}$ ) der Digitalisierung in Deutschland von 2000 bis 2020 nach nachfragenden Wirtschaftsbereichen in Millionen Tonnen .....	242
Abbildung 98:	Einordnung des Modells GRAMOD.....	245
Abbildung 99:	Entwicklung der Globalisierung in den Jahren 2000 bis 2050	252
Abbildung 100:	Trendszenario: Globale Ergebnisse – Bevölkerung von 2000 bis 250 in Millionen Personen.....	256
Abbildung 101:	Trendszenario: Globale Ergebnisse – makroökonomische Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts von 2000 bis 2050 in Milliarden USD.....	257
Abbildung 102:	Trendszenario: Globale Ergebnisse – produktionsseitige $CO_2$ -Emissionen sämtlicher Wirtschaftszweige von 2000 bis 2050 in Milliarden Tonnen (vgl. Anhang F, Tab. 144).....	258

Abbildung 103:	Trendszenario: Globale Ergebnisse – Rohstoffextraktionen von 2000 bis 2050 in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 145) .....	261
Abbildung 104:	Trendszenario: Globale Ergebnisse – Produktion von IKT-Gütern und -Dienstleistungen von 2000 bis 2050 in Milliarden Euro .....	262
Abbildung 105:	Trendszenario: Bevölkerungsentwicklung in Deutschland von 2000 bis 2050 in Millionen Personen .....	263
Abbildung 106:	Trendszenario: Entwicklung des deutschen Bruttoinlandsprodukts von 2000 bis 2050 in Milliarden USD	264
Abbildung 107:	Trendszenario: Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2050 nach Produktgruppen in Millionen Euro .....	265
Abbildung 108:	Trendszenario: Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2050 nach nachfragenden Wirtschaftsbereichen in Millionen Euro .....	266
Abbildung 109:	Trendszenario: Entwicklung zentraler gesamtwirtschaftlicher Schlüsselindikatoren für Deutschland von 2020 bis 2050 in Prozent (vgl. Anhang F, Tab.146).....	267
Abbildung 110:	Trendszenario: Entwicklung des Rohstoffkonsums und des Rohstoffeinsatzes von 2020 bis 2050 in Millionen Tonnen....	268
Abbildung 111:	Trendszenario: Gesamtwirtschaftlicher CO <sub>2</sub> -Fußabdruck in Deutschland von 2020 bis 2050 in Megatonnen.....	269
Abbildung 112:	Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland nach Produktgruppen für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2025, 2030, 2040 und 2050 in Milliarden Euro .....	274
Abbildung 113:	CO <sub>2</sub> -Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland nach Produktgruppen für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2025, 2030, 2040 und 2050 in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 147).....	275
Abbildung 114:	Differenz des CO <sub>2,Dig.</sub> in Deutschland gegenüber dem Trendszenario nach Produktgruppen für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 148) .....	276
Abbildung 115:	Differenz des RMI <sub>Dig.</sub> in Deutschland gegenüber dem Trendszenario nach Produktgruppen für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 149) .....	277
Abbildung 116:	Differenz des RMC <sub>Dig.</sub> in Deutschland gegenüber dem Trendszenario nach Produktgruppen für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 150) .....	278

Abbildung 117:	Relative Abweichung des deutschen $RMC_{Dig.}$ gegenüber dem Trend im Jahr 2050 nach Materialien für unterschiedliche Szenarien in Prozent (vgl. Anhang F, Tab. 151) .....	279
Abbildung 118:	Relative Abweichung des deutschen $RMI_{Dig.}$ gegenüber dem Trend im Jahr 2050 nach Materialien für unterschiedliche Szenarien in Prozent (vgl. Anhang F, Tab. 152) .....	280
Abbildung 119:	Entwicklung des $RMC_{Dig.}$ in Deutschland von 2020 bis 2050 für unterschiedliche Szenarien in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 153).....	281
Abbildung 120:	Entwicklung des $RMI_{Dig.}$ in Deutschland von 2020 bis 2050 für unterschiedliche Szenarien in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 154).....	282
Abbildung 121:	Entwicklung des $CO_{2,Dig.}$ in Deutschland von 2020 bis 2050 für unterschiedliche Szenarien in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 155).....	283
Abbildung 122:	Differenz globaler $CO_2$ -Emissionen gegenüber dem Trend für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 156) .....	284
Abbildung 123:	Differenz weltweiter Entnahmen gegenüber dem Trend für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 157).....	285
Abbildung 124:	Übersicht über die identifizierten Gestaltungsfelder.....	289

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Wissenschaftliche Arbeiten zum Thema „Digitalisierung und Ressourcennutzung“ auf Meso- und Makroebene .....87
Tabelle 2:	Exemplarische Einordnung der Fallstudie „Smart-Home“ zur iterativen Überprüfung der Operationalisierbarkeit des Modells (siehe Abbildung 12).....97
Tabelle 3:	Gegenüberstellung Ökobilanzierung und Input-Output-Analyse .....98
Tabelle 4:	Auswertung relevanter Daten- und Informationsquellen mit quantitativen Ergebnissen sowie der jeweiligen methodischen Ansätze im Hinblick auf die Definition von Systemgrenzen .....98
Tabelle 5:	Abgrenzung des Digitalisierungssektors in den gesamtwirtschaftlichen Bewertungen .....107
Tabelle 6:	Liste der Fallstudien für die Analyse der Ressourcenintensität auf Mikroebene mit Themengebiet, spezifischem Anwendungsfall und Betrachtungsgegenstand.....116
Tabelle 7:	Digitalisierungsrelevante Rohstoffe mit ihren Rohstoffgruppen, die für die Fallstudien ausgewertet wurden* .....122
Tabelle 8:	Berücksichtigte Gerätekombinationen mit Energieverbrauch in kWh und angenommenen Nutzungsanteilen in Prozent für die Fallstudie „Eine Stunde Videokonferenz“ .....125
Tabelle 9:	Ausgewählte digitalisierungsrelevante Rohstoffe und ihre eingesetzte Menge zur Herstellung in den jeweiligen Endgeräten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Milligramm nach Geräten .....139
Tabelle 10:	Aus der Literatur entnommene Input-Werte, die zur Modellierung der Fallstudie „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ verwendet wurden .....142
Tabelle 11:	Annahmen der Szenarien für relevante Inputs der Fallstudie „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ .....143
Tabelle 12:	Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase in den Szenarien Grünstrom (Szenario 1 – S1) und konventioneller Strom (Szenario 2 – S2) – Tabelle zu Abbildung 44 .....153
Tabelle 13:	Szenarien der Modellierung für die Fallstudie „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ .....155
Tabelle 14:	Übersicht zu den Annahmen in den betrachteten Szenarien für die Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Wattstunden .....161

Tabelle 15:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Gramm .....163
Tabelle 16:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ im Vergleich der Szenarien .....164
Tabelle 17:	Berücksichtigte Gerätekombinationen und Anteile in Prozent für die Fallstudie „Eine Stunde E-Sport“ .....166
Tabelle 18	Übersicht über die Endergebnisse der betrachteten zehn Fallstudien .....183
Tabelle 19:	Datenabdeckung der im Vorhaben verwendeten MRIO-Datenbank GLORIA .....193
Tabelle 20:	Klassifikation der Rohstoffgruppen im Bewertungsmodell GRAMOD.....195
Tabelle 21:	Aggregation der Wirtschaftsregionen im Bewertungsmodell GRAMOD.....197
Tabelle 22:	Abgrenzung des Digitalisierungssektors in den gesamtwirtschaftlichen Bewertungen .....207
Tabelle 23:	Klassifikation der IKT-Güter und -Dienstleistungen einsetzenden Wirtschaftsbereiche.....211
Tabelle 24:	Erwartetes durchschnittliches jährliches Wachstum des preisbereinigten BIP in der Trendprojektion.....247
Tabelle 25:	Erklärung der Endnachfrage-Komponenten in GRAMOD .....249
Tabelle 26:	Erklärung der Veränderung von Konsummustern in GRAMOD .....250
Tabelle 27:	Erklärung der Veränderung von Konsummustern in GRAMOD .....251
Tabelle 28:	Erklärung der Veränderung der Ausgabenanteile für IKT-Güter und IKT-Dienstleistungen in GRAMOD .....254
Tabelle 29:	Identifizierte Trendabhängigkeiten der durchschnittlichen Inputkoeffizienten für den Einsatz von IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen.....255
Tabelle 30:	Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Kreislaufwirtschaft“ .....291
Tabelle 31:	Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Kreislaufwirtschaft“ .....291
Tabelle 32:	Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Digitalisierungsrelevante Rohstoffe“ .....293
Tabelle 33:	Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Digitalisierungsrelevante Rohstoffe“ .....293
Tabelle 34:	Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Globale Lieferketten“ .....297

Tabelle 35:	Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Globale Lieferketten“ .....	298
Tabelle 36:	Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Rebound-Effekte“ .....	300
Tabelle 37:	Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Rebound-Effekte“ .....	302
Tabelle 38:	Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Energiebedarf“ .....	304
Tabelle 39:	Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Energiebedarf“ .....	305
Tabelle 40:	Nachfragende des Vorleistungsbereichs in der makroökonomischen Simulation.....	309
Tabelle 41:	Prozentuale Verteilung von RMI und RMC auf die nachfragenden Wirtschaftsbereiche und Vorleistungsbereiche im Jahr 2020 .....	311
Tabelle 42:	Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Suffizienz“ .....	313
Tabelle 43:	Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Suffizienz“ .....	314
Tabelle 44:	Kurzbeschreibung des Querschnittsfelds „Datenlage und Transparenz“ .....	317
Tabelle 45:	Maßnahmenbeispiele des Querschnittsfelds „Datenlage und Transparenz“ .....	317
Tabelle 46:	Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Folgenabschätzung“ .....	320
Tabelle 47:	Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Folgenabschätzung“ .....	320

## Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
ADP	Abiotic Depletion Potential (abiotisches Erschöpfungspotenzial)
APV	LAGA-Ausschuss für Produktverantwortung; FV
AS	Arbeitsschritt
BDI	Bundesverband der Deutschen Industrie e.V.
BGBI	Bundesgesetzblatt
BIM	Building Information Modelling
BIP	Bruttoinlandsprodukt
BMBF	Bundesministerium für Bildung und Forschung
BMUB	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, Bau und Reaktorsicherheit
BMUV	Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz
BMWi	Bundesministerium für Wirtschaft und Energie
BMWK	Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz
BV Glas	Bundesverband Glasindustrie e.V., Düsseldorf
CED	Cumulative Energy Demand (kumulierter Energieaufwand)
CPA	Statistische Güterklassifikation in Verbindung mit den Wirtschaftszweigen in der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft
CPA 26	Abteilung 26 („Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse“) der Statistischen Güterklassifikation in Verbindung mit den Wirtschaftszweigen in der Europäischen Wirtschaftsgemeinschaft
CRA	Cyber Resilience Act
CSRD	Corporate Social Responsibility Directive
Destatis	Statistisches Bundesamt
DiätV	Diätverordnung
DIN	Deutsches Institut für Normung e.V.
DKE	Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik
DLMB	Deutsches Lebensmittelbuch
DMA	Digital Markets Act
DSA	Digital Services Act



Abkürzung	Erklärung
<b>DTA</b>	Domestic Technology Assumption (Annahme inländischer Technologie)
<b>DV</b>	Datenverarbeitung
<b>EAG</b>	Elektroaltgeräte
<b>EE</b>	Environmentally Extended (umwelterweitert)
<b>EED</b>	Europäische Energieeffizienzrichtlinie
<b>EFTA</b>	European Free Trade Association (Europäische Freihandelsassoziation)
<b>EMAS</b>	Eco Management and Audit Scheme
<b>EnEfG</b>	Energieeffizienzgesetz
<b>ETSI</b>	Europäisches Institut für Telekommunikationsnormen
<b>Eurostat</b>	Statistisches Amt der Europäischen Union
<b>FONA</b>	Forschung für Nachhaltige Entwicklung
<b>FrSaftErfrischGetrV</b>	Verordnung über Fruchtsaft, einige ähnliche Erzeugnisse, Fruchtnektar und koffeinhaltige Erfrischungsgetränke (Fruchtsaft- und Erfrischungsgetränkeverordnung)
<b>GDB</b>	Genossenschaft Deutscher Brunnen e.G., Bonn
<b>GDIP</b>	Green Deal Industrial Plan
<b>GfK</b>	Growth from Knowledge
<b>GINFORS</b>	Global Interindustry Forecasting System (Modell zur Analyse internationaler und weltwirtschaftlicher Fragestellungen)
<b>GLORIA</b>	Global Resource Input Output Assessment (Globale Input-Output Datenbank für Rohstoffbewertungen)
<b>GMRIO</b>	Global Multi-Regional Input-Output (Globales Multi-regionales Input-Output Modell)
<b>GoST</b>	Governance of Sociotechnical Transformations
<b>GRAM</b>	Global Resource Accounting Model (Multi-regionales Input-Output Modell zur rückblickenden Bewertung gesamtwirtschaftlicher Materialflüsse)
<b>GTAP</b>	Global Trade Analysis Project (Projekt zur Analyse des globalen Handels)
<b>GVM</b>	GVM Gesellschaft für Verpackungsmarktforschung mbH, Mainz
<b>GWP</b>	Global Warming Potential
<b>GWS</b>	Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforschung
<b>IAIS</b>	Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme
<b>ICIO</b>	Inter-Country Input-Output (Input-Output zwischen den Ländern)

Abkürzung	Erklärung
ICT/IKT	Informations- und Kommunikationstechnik
IEA	Internationale Energie Agentur
IEC	Internationale Elektrotechnische Kommission
IO	Input-Output (Modell)
IoT	Internet of Things (Internet der Dinge)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change (Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen)
Ira	Inflation Reduction Act
IRP	International Resource Panel (Internationaler Rat für Ressourcen)
ISIC	International Standard Industrial Classification (Internationale Standardklassifikation der Wirtschaftszweige)
ISO	Internationale Organisation für Normung
IT	Informationstechnik
ITU	International Telecommunication Union
IW	Institut der deutschen Wirtschaft
IZT	Institut für Zukunftsstudien und Technologieberatung GmbH
KI	Künstliche Intelligenz
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LAGA	Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Abfall
LCA	Life Cycle Assessment (Ökobilanz)
LoL	League of Legends
LOP	Landnutzungspotenzial (Land Occupation Potential)
MERCOSUR	Gemeinsamer Südamerikanischer Markt
MIPS	Material-Input pro Serviceeinheit
Möve	Mehrweg- und ökologisch vorteilhafte Einweggetränke
MRIO	Multi-Regional Input-Output
NACE	Nomenclature générale des activités économiques dans les Communautés Européennes (Klassifikation der Wirtschaftszweige)

Abkürzung	Erklärung
<b>NZIA</b>	Net Zero Industry Act
<b>OECD</b>	Organization for Economic Co-operation and Development (Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung)
<b>övE</b>	ökologisch vorteilhafte Einweggetränke
<b>OZG</b>	Onlinezugangsgesetz
<b>PMF</b>	Product Material Footprint
<b>PoS</b>	Proof of Stake
<b>PoW</b>	Proof of Work
<b>RMC</b>	Raw Material Consumption (Rohstoff-Fußabdruck)
<b>RMC<sub>Dig.</sub></b>	Raw Material Consumption (Rohstoff-Fußabdruck) der Digitalisierung
<b>RME</b>	Raw Material Equivalents (Rohstoffäquivalente)
<b>RMI</b>	Raw Material Input (Primärrohstoffeinsatz)
<b>RMI<sub>Dig.</sub></b>	Raw Material Input (Primärrohstoffeinsatz der Digitalisierung)
<b>SBS</b>	Structural business statistics (Strukturelle Unternehmensstatistiken)
<b>SCP-HAT</b>	Hotspot Analysis Tool for Sustainable Consumption and Production (Hotspot-Analyse-Tool für nachhaltigen Konsum und Produktion)
<b>SDG</b>	Sustainable Development Goals
<b>THG</b>	Treibhausgas
<b>TMR</b>	Total Material Requirement (Gesamtprimärrohstoffaufwand)
<b>UBA</b>	Umweltbundesamt
<b>UN</b>	United Nations (Vereinte Nationen)
<b>UNEP</b>	United Nations Environment Programme (Umweltprogramm der Vereinten Nationen)
<b>UTAMO</b>	Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung von Mobilfunknetzen und Endgeräten
<b>VdF</b>	Verband der deutschen Fruchtsaft-Industrie e.V., Bonn
<b>VDM</b>	Verband Deutscher Mineralbrunnen e.V., Bonn
<b>VerpackV</b>	Verpackungsverordnung
<b>VGR</b>	Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung
<b>wafg</b>	Wirtschaftsvereinigung Alkoholfreie Getränke e.V., Berlin
<b>WBGU</b>	Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen

<b>Abkürzung</b>	<b>Erklärung</b>
<b>WDP</b>	Water Depletion Potential (Wasserfußabdruck)
<b>WIOD</b>	World Input-Output Database
<b>WZ</b>	Wirtschaftszweig

## Zusammenfassung

Der digitale Wandel beeinflusst viele Bereiche unseres Lebens und stellt uns vor neue Herausforderungen in Politik, Wirtschaft, Soziales, Ökologie, Kultur und Ethik. Die ökologischen Auswirkungen der Digitalisierung werden jedoch noch nicht ausreichend diskutiert. Einerseits kann die Digitalisierung, wie in der "Industrie 4.0", zu Effizienzsteigerungen und geringerem Energie- und Rohstoffbedarf beitragen. Andererseits verbrauchen digitale Produkte und Technologien selbst enorme natürliche Ressourcen und haben entsprechende Umweltauswirkungen (WBGU, 2019; Umweltbundesamt, 2019a).

Das Umweltbundesamt beauftragte 2020 ein Forschungsvorhaben, das die Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland untersuchen sollte. Das Vorhaben "Digitalisierung und natürliche Ressourcen" (DigitalRessourcen) wurde von 2020 bis 2023 von einem Konsortium bearbeitet, zu dem Ramboll Management Consulting GmbH, die Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung, das Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme und das Deutsche Institut für Normung gehörten. Ziel war es, das Wissen über die Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland zu verbessern und Handlungsoptionen für eine nachhaltige, umwelt- und ressourcenschonende Gestaltung der Digitalisierung abzuleiten (Abraham *et al.*, 2023a; Abraham *et al.*, 2023b). Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sind in einem abschließenden Bericht und einem Anhang dokumentiert sowie in einer Fachbroschüre zusammengefasst (Abraham *et al.*, 2023a; Abraham *et al.*, 2023b; Milde *et al.*, 2023).

### Digitalisierung und natürliche Ressourcen – eine Bestandsaufnahme

Im Rahmen dieses Forschungsvorhabens wurde eine Bestandsaufnahme aktueller wissenschaftlicher Arbeiten durchgeführt, die sich mit der Schnittstelle von Digitalisierung und Ressourcenschonung befassen (WBGU, 2019; Umweltbundesamt, 2019a). Es wurden fast 100 Studien auf Mikro- und Meso-/Makroebene ausgewertet, wobei der Fokus auf Ökobilanzierungen und dem Energieverbrauch lag.

Auf der Mikroebene wurden neben wissenschaftlichen Publikationen auch Berichte von Bundesbehörden, Datenbankeinträge und Daten von privaten Interessengruppen ausgewertet. Auf der Meso- und Makroebene zeigte die Bestandsaufnahme, dass bisherige Studien meist die Ressourceneinsparpotentiale durch digitale Technologien analysierten. Zwei relevante Vorarbeiten wurden identifiziert: eine Analyse vergangener Trends bei der Nutzung von Informations- und Kommunikationsprodukten in der Schweiz (Cabernard, 2019) und ein Gutachten des wissenschaftlichen Beirats der Bundesregierung, dass die zukünftige Entwicklung von Ressourceninanspruchnahmen durch die Nutzung digitaler Anwendungen beschreibt (WBGU, 2019). Die Datenbank GLORIA wurde als Grundlage für die makroökonomischen Berechnungen in diesem Vorhaben ausgewählt. Zusätzlich wurden die umwelt- bzw. ressourcenpolitischen Diskussionen des Themas betrachtet und eingeordnet.

In Deutschland hat die Digitalisierung hohe politische Priorität. Die Bundesregierung verabschiedete 2022 die "Digitalstrategie Deutschland", die eine nachhaltige und ressourcenschonende Digitalisierung anstrebt. Das BMUV entwickelte 2020 die "Umweltpolitische Digitalagenda" mit dem Ziel, die Chancen der Digitalisierung umweltfreundlich zu nutzen. Das Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRes) und die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) enthalten bzw. werden Maßnahmen für mehr Ressourceneffizienz und zirkuläres Wirtschaften enthalten. Auf europäischer und internationaler Ebene gibt es zahlreiche politische Programme und Aktionspläne in Bezug auf Digitalisierung und natürliche Ressourcen, darunter der European Green Deal. Initiativen wie

der digitale Produktpass oder das Recht auf Reparatur beeinflussen die weitere Gestaltung der Digitalisierung.

### **Systemgrenzen der Digitalisierung**

Für die Berechnungen auf Mikro- und Makroebene in diesem Vorhaben war es wichtig, die System- und Betrachtungsgrenzen des Themas Digitalisierung zu erörtern und festzulegen. Digitalisierung beinhaltet die Umwandlung von analogen Informationen in digitale Signale und beschreibt einen umfassenden Prozess, der tiefgreifende Veränderungen in der Industrie und Auswirkungen auf die Gesellschaft mit sich bringt.

Ein konzeptionelles Betrachtungsmodell wurde entwickelt, das verschiedene Teilsysteme umfasst und die Vielfalt digitaler Lösungen und Anwendungsbereiche berücksichtigt. Auf der Mikroebene wurden spezifische digitale Anwendungen untersucht, die digitale Produkte und Technologien benötigen.

In den makroökonomischen Input-Output-Modellierungen wurden alle Verwendungen von IKT-Gütern und Dienstleistungen in Deutschland als direkte Effekte der Digitalisierung erfasst. Es wurde eine funktionale Abgrenzung des gesamtwirtschaftlichen Digitalisierungssystems vorgenommen und individuelle Anteilswerte für IKT-Güter und IKT-Dienstleistungen berechnet. Sowohl die Endnachfrage als auch die Vorleistungsnachfrage nach IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen wurden gesamtwirtschaftlich vollständig erfasst und strukturiert bewertet.

### **Die Mikroebene: zehn Fallstudien zu Lebenszyklusdaten digitaler Anwendungsfälle**

Im Rahmen des Vorhabens "DigitalRessourcen" wurden zehn Fallstudien durchgeführt, um die Ressourcenintensität und das Treibhausgaspotenzial zu berechnen. Die Fallstudien (Videokonferenz, Smart-Home, digitale Medien, *E-Grocery*, Carsharing, Kryptowährung, C2C-Plattform, E-Sport, 3D-Druck, E-Health) wurden ausgewählt, um die Breite des Themas Digitalisierung abzubilden und behandelten relevante Produkte und Technologien, die direkt von Endverbraucher\*innen genutzt werden.

Die Berechnung der Ressourcenintensität orientierte sich an der Erstellung einer Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) nach DIN EN ISO 14040/44 (Deutsches Institut für Normung, 2021a; 2021b). Dabei wurde die Software OpenLCA<sup>3</sup> in Kombination mit der Ecoinvent-Datenbank für Lebenszyklusdaten (Version 3.8)<sup>4</sup> verwendet (Wernet *et al.*, 2016).

Die betrachteten Indikatoren waren der Primärrohstoffeinsatz (RMI), der Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR), der kumulierte Energiebedarf (CED), der Wasserfußabdruck (WDP), das Landnutzungspotenzial (LOP) und das Treibhausgaspotenzial (GWP). Ein besonderer Fokus lag auf kritischen Rohstoffen wie Technologiemetallen oder seltenen Erden, die trotz ihrer geringen Masse von strategischer Bedeutung sind und oft mit schwerwiegenden Umweltauswirkungen verbunden sind (Kristof & Hennicke, 2010; Liu *et al.*, 2019; Umweltbundesamt, 2021). Insgesamt wurden 27 besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe definiert, die in jeder Fallstudie berechnet wurden.

Die Ressourcenintensität wurde anhand von vier Ressourcenfußabdrücken (Materialnutzung, fossile Energie, Wasser, Land) beurteilt und eine relevante Umweltwirkung - die Erderwärmung durch Treibhausgase - wurde betrachtet.

Jede Fallstudie wurde qualitativ hinsichtlich ihrer aktuellen und zukünftigen gesellschaftlichen Bedeutung sowie ihres theoretischen Umweltentlastungspotenzials eingeordnet. Informationen

---

<sup>3</sup><https://www.openlca.org> (Stand 15. Dezember 2022).

<sup>4</sup> <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/> (Stand: 20. Februar 2023).

aus weiterer Literatur flossen in die Berechnungen und Analysen 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 Ressourcenbedarfe wurden ihrem Zeitpunkt der Entstehung im Lebenszyklus zugeordnet, hauptsächlich der Herstellungs- oder Nutzungsphase<sup>5</sup>.

Für jede Fallstudie wurden Informationen zur Fallstudie, zur Untersuchungseinheit sowie die Ergebnisse der analysierten Indikatoren und eine Diskussion zusammengestellt.

#### **Das Beispiel der Fallstudie „Videokonferenz im Homeoffice“**

Die Arbeit im Homeoffice und die Nutzung von Videokonferenzen haben sich in Deutschland durch die COVID-19-Pandemie weitverbreitet und etabliert. In einer Fallstudie wurde die einstündige Teilnahme an einer Gruppen-Videokonferenz mit verschiedenen Gerätekombinationen untersucht.

Die Untersuchung ergab, dass eine Stunde Videokonferenz einen gesamten Rohstoffaufwand (RMI) von 116 g/h und einen Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) von 134 g/h verursacht. Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe wie Kupfer, Zinn und Silber spielen dabei eine wichtige Rolle, obwohl sie mengenmäßig nur einen kleinen Anteil ausmachen (137,3 mg/h)

Zusätzlich wurden andere Indikatoren wie der Wasserfußabdruck (WDP), der Flächenfußabdruck (LOP), der kumulierte Energieaufwand (CED) und der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (GWP) berechnet. Bei allen untersuchten Indikatoren dominiert die Herstellungsphase, wobei der Anteil der Nutzungsphase bei WDP und LOP fast 30 % erreicht und bei CED und GWP weniger als 20 % ausmacht.

#### **Diskussion der Ergebnisse und Erkenntnisse aus den Fallstudien**

Die Ergebnisse aus den Fallstudien des Vorhabens „DigitalRessourcen“ zeigen, dass der Ressourcenbedarf und das Treibhausgaspotenzial je nach Anwendungsfall variieren. Bei einigen Anwendungsfällen, wie Videokonferenzen und 3-D-Druck, entfällt der Großteil des Ressourcenaufwands auf die Herstellungsphase. Bei anderen, wie Smart-Home, Kryptowährung und E-Sport, geht der Ressourcenaufwand hauptsächlich auf die Nutzungsphase zurück (Neumann, 2020).

Die Nutzungsphase ist in allen Fallstudien vom Strombedarf des Anwendungsfalls geprägt. Der Ressourcenbedarf in der Herstellungsphase hängt von den verwendeten Materialien und den damit verbundenen Beschaffungs- und Herstellungsprozessen ab. In allen Fallstudien dominieren Metallerze als Rohstoffinputs in der Herstellungsphase. Unter den Massenrohstoffen ist Ganggestein das am meisten abgebaute Material.

Bei den digitalisierungsrelevanten Rohstoffen stechen Gallium, Tantal, Gold, Silber, Zinn, Nickel und teils Lithium sowie Scandium heraus. Diese Rohstoffe sind kritisch im Sinne der EU-Klassifikation (Europäische Kommission, 2020c) und essenziell für die Herstellung verschiedenster IKT-Komponenten. Die Haupttreiber des Bedarfs an digitalisierungsrelevanten Rohstoffen sind oft einzelne Geräte oder Komponenten des betrachteten Produktsystems, wie beispielsweise Computer in der E-Sport-Fallstudie oder das Netzteil beim 3-D-Drucker.

---

<sup>5</sup> Die *end of life* Phase wurde aufgrund der schwierigen Datenlage i. d. R. nicht betrachtet.

In allen Fallstudien des Vorhabens “DigitalRessourcen” zeigen die analysierten Indikatoren eine ähnliche Tendenz in Bezug auf die Aufteilung zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase. Die Haupttreiber der einzelnen Indikatoren liegen in den gleichen Lebenszyklusphasen.

Unsicherheiten in der Analyse ergeben sich hauptsächlich aus der Verfügbarkeit von Daten, insbesondere da die Aktualität der Datensätze aus der Lebenszyklusanalyse-Datenbank oft nicht mit der schnellen technischen Entwicklung bei digitalen Endgeräten mithalten kann (Malmodin *et al.*, 2018).

Die Fallstudien untersuchten auch, ob die jeweilige digitale Anwendung ein Umweltentlastungspotenzial aufweist. In einigen Fällen, wie bei Videokonferenzen, ist dies der Fall. Bei anderen Anwendungsfällen, wie Smart-Home-Szenarien oder 3D-Druck als Heimanwendung, die hauptsächlich zur Komfortsteigerung oder zur Unterstützung zusätzlichen Konsumverhaltens dienen, hat die digitale Anwendung wahrscheinlich keine Vorteile oder sogar einen negativen Einfluss in Bezug auf den Ressourcenbedarf und die Umweltauswirkungen. In diesen Fällen ist eine nachhaltige, ressourcen- und umweltschonende Gestaltung besonders wichtig.

### **Die Makroebene: Ressourcenintensität und CO<sub>2</sub>-Emissionen des digitalen Wandels in den Jahren 2000 – 2020**

Zur Berechnung der Umweltfolgen von Produktion und Konsum auf Meso- oder Makroebene gibt es zwei Ansätze: “Bottom-up”-Analysen und “Top-down”-Analysen. “Bottom-up”-Analysen basieren auf einer umfassenden Liste relevanter Güter und Dienstleistungen und erfassen deren Umweltwirkungen detailliert. “Top-down”-Analysen hingegen analysieren ausschließlich auf Makro- oder Mesoebene und untersuchen systematisch die volkswirtschaftlichen Lieferketten und Nachfragestrukturen ausgewählter Produktionssektoren.

Sachbilanzen, wie sie in den “Fallstudien zu Lebenszyklusdaten digitaler Anwendungsfälle” (Kapitel 4) durchgeführt wurden, sind typische Beispiele für “Bottom-up”-Analysen (Malmodin *et al.*, 2018). Sie erfordern jedoch viele Informationen. Daher wurden “Bottom-up”-Analysen nur für die Güter und Dienstleistungen bzw. digitalen Anwendungen durchgeführt, die zu einzelnen Fallbeispielen ausgewählt wurden. Für die gesamtwirtschaftliche Bewertung der umweltökonomischen Auswirkungen durch den digitalen Wandel wurden makroökonomische Berechnungen und Simulationen als eigenständige “Top-down”-Analysen durchgeführt (Kapitel 5 und 6).

Für die “Top-down”-Bewertungen im Forschungsvorhaben wurden die makroökonomischen Grenzen des Systems “Digitalisierung” festgelegt. Jegliche Verwendung von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) in Deutschland wird als direkter Effekt der Digitalisierung erfasst. Dies umfasst die Nachfrage aller Wirtschaftszweige nach IKT als Vorleistungen in ihren Produktionsprozessen, die gesamte Endnachfrage in Deutschland nach IKT und die gesamte Exporthnachfrage des Auslands nach IKT aus Deutschland (Kapitel 3).

Die Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) erfassen aggregierte Zahlungsströme zwischen Wirtschaftssektoren und verschiedenen Arten der Endnachfrage. Allerdings berichten die VGR nicht explizit über einen Digitalisierungssektor oder die Nachfrage nach den von diesem Sektor bereitgestellten Gütern und Dienstleistungen. Daher wurden diejenigen Sektoren definiert, die direkt dem IKT-Bereich zuzuordnen sind (OECD, 2011). Diese umfassen die IKT-Dienstleistungsindustrie, den IKT-Handel, die IKT-Reparaturindustrie und die IKT-Fertigungsindustrie.

Für alle makroökonomischen Bewertungen im Vorhaben wurde die globale Multi-Regionale Input-Output (MRIO)-Datenbank GLORIA genutzt (Lenzen *et al.*, 2017; 2022). Diese Datenbank



berichtet über monetäre Zahlungsströme zwischen Ausgangs- und Zielsektoren sowie über entsprechende physische Entwicklungen wie CO<sub>2</sub>-Emissionen oder Rohstoffextraktionen. Sie umfasst 160 Länder und 4 "Rest of World"-Regionen, den Zeitraum von 1990 bis 2020, 120 Wirtschaftsbereiche und diverse Umweltfaktoren sowie 62 Materialkategorien (Lenzen *et al.*, 2017; 2022).

Für den deutschen Digitalisierungssektor wurden basierend auf der Datenbank GLORIA für die Jahre 2000 bis 2020 neben monetären Strömen verschiedene Indikatoren analysiert: der Rohstoffkonsum (RMC<sub>Dig.</sub>), der Rohstoffeinsatz (RMI<sub>Dig.</sub>) und die Kohlenstoffdioxid-Emissionen (CO<sub>2,Dig.</sub>).

Der Rohstoffkonsum (RMC) bildet die globale Inanspruchnahme von Primärrohstoffen zur Bereitstellung jener Güter und Dienstleistungen ab, die im Inland final verwendet werden. Zur Berechnung dieser Masse muss das Gewicht sämtlicher Rohstoffe, die im Inland direkt der Natur entnommen werden, und das Gewicht der über Importe insgesamt genutzten Primärrohstoffe addiert und von dieser Summe das Gewicht der Primärrohstoffe für Exporte ins Ausland subtrahiert werden.

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.

Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck berechnet sämtliche CO<sub>2</sub>-Emissionen, die global bei der Herstellung von im Inland final verwendeten Gütern und Dienstleistungen entstehen (Lenzen *et al.*, 2022).

### **Die Ergebnisse der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung über die Jahre 2000 - 2020**

Die Ergebnisse der "Top-down"-Bewertungen im Forschungsvorhaben basieren auf einem Systemverständnis, das sowohl die makroökonomische Endnachfrage als auch die gesamte Vorleistungsnachfrage nach Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) vollständig erfasst (Kapitel 3). Es wurden verschiedene Indikatoren analysiert: der Rohstoffkonsum (RMC<sub>Dig.</sub>), der Rohstoffeinsatz (RMI<sub>Dig.</sub>) und die Kohlenstoffdioxid-Emissionen (CO<sub>2, Dig.</sub>) der Digitalisierung.

Im Jahr 2020 belief sich der Rohstoffkonsum der Digitalisierung in Deutschland (RMC<sub>Dig.</sub>) auf 95,41 Millionen Tonnen, ein Anstieg von ca. 8 % seit 2000. Mehr als 80 % des digitalen Rohstoffkonsums im Jahr 2020 wurde durch die Nachfrage nach Hardware verursacht.

Der Rohstoffeinsatz (RMI<sub>Dig.</sub>), der sowohl die heimische Endnachfrage als auch die Exportnachfrage aus dem Ausland berücksichtigt, betrug für das Jahr 2020 insgesamt 157,1 Millionen Tonnen, ein Anstieg von annähernd 13,5 % seit 2000.

Der CO<sub>2</sub>Fußabdruck der Digitalisierung (CO<sub>2,Dig.</sub>) wurde ebenfalls berechnet. Im Jahr 2020 summierten sich die CO<sub>2</sub>-Emissionen zur Erzeugung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen auf einen Wert von etwas mehr als 53,9 Millionen Tonnen. Zwischen 2000 und 2020 nahm der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland um 7,6 % ab.

### **Analyse nach Rohstoffgruppen, geografischem Ursprung und Verwendungen**

Die Analyse des Forschungsvorhabens hat die Indikatoren Rohstoffkonsum (RMC<sub>Dig.</sub>), Rohstoffeinsatz (RMI<sub>Dig.</sub>) und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (CO<sub>2, Dig.</sub>) der Digitalisierung nach verschiedenen Aspekten aufgeschlüsselt.

Im Jahr 2020 belief sich der Rohstoffkonsum der Digitalisierung in Deutschland (RMC<sub>Dig.</sub>) auf 95,41 Millionen Tonnen, ein Anstieg von ca. 8 % seit 2000. Mehr als 80 % davon wurde durch die Nachfrage nach Hardware verursacht, die hauptsächlich aus fernöstlichen Weltregionen

importiert wird. China extrahierte im Jahr 2020 rund 26,3 Millionen Tonnen Rohstoffe für in Deutschland benötigte IKT-Güter und Dienstleistungen, was etwa einem Viertel des gesamten deutschen  $RMC_{\text{Dig}}$  entspricht.

Nichtmetallische Mineralien, hauptsächlich Sand und Kies, waren die wichtigste Materialkategorie des Rohstoffkonsums der Digitalisierung (mit einem Anteil von ca. 40,9 % an den erfassten Primärrohstoffen). Metallerze summierten sich auf 27 Millionen Tonnen, was die Menge fossiler Energieträger übersteigt.

Die inländische Endnachfrage nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen verursachte im Jahr 2020 insgesamt einen Rohstoffkonsum von mehr als 52,1 Millionen Tonnen. Dies entspricht einem Anteil von annähernd 55 % am gesamten  $RMC_{\text{Dig}}$  und einem Anteil von 3,1 % am gesamtwirtschaftlichen RMC des Jahres 2020. Der Rest verteilt sich auf die anderen Wirtschaftszeige, wie „private Haushalte“, „Investitionen“, „Datenverarbeitungsgeräte“ etc. (vgl. Kapitel 5.5.1).

### **Einordnung der Ergebnisse der gesamtwirtschaftlichen Betrachtung**

Die Analysen des Forschungsvorhabens DigitalRessourcen haben eine erste vollständige globale Bewertung der Material- und  $\text{CO}_2$ -Intensität des digitalen Wandels in Deutschland ermöglicht. Im Vergleich zu früheren Arbeiten, wie dem UBA-Ressourcenbericht 2022 (Lutter *et al.*, 2022), verwendet dieses Vorhaben ein breiteres konzeptionelles Verständnis der Digitalisierung und eine andere empirische Methode.

Die eigenen Ergebnisse zeigen, dass der digitale Wandel in Deutschland zwischen 2000 und 2020 zu steigenden Anteilen an gesamtwirtschaftlichen Umweltbelastungen beigetragen hat. Der Rohstoffkonsum (RMC) der Digitalisierung in Deutschland ist in diesem Zeitraum um etwa 8 % gestiegen. Der Anteil des Rohstoffkonsums der Digitalisierung am gesamten deutschen Rohstoffkonsum stieg von ca. 4,3 % im Jahr 2000 auf 5,6 % im Jahr 2020.

Der Rohstoffeinsatz (RMI) der deutschen Wirtschaft für IKT-Güter und Dienstleistungen stieg von 2000 bis 2020 um annähernd 13,5 %. Der Anteil des Rohstoffeinsatzes der Digitalisierung am gesamten deutschen Rohstoffeinsatz stieg von 4,7 % im Jahr 2000 auf 4,9 % im Jahr 2020.

Obwohl der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland in absoluten Zahlen zwischen 2000 und 2020 zurückging, stieg der Anteil der Digitalisierung am gesamten  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck Deutschlands langfristig auf 5,7 % im Jahr 2020 an.

### **Ressourcenintensität und $\text{CO}_2$ -Emissionen: Modellierung des digitalen Wandels bis zum Jahr 2050**

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

Gemäß Auftrag wurden mögliche zukünftige Entwicklungspfade (Szenarien) des „Systems Digitalisierung“ quantitativ modelliert und entsprechende Simulationen erarbeitet. Das Trendszenario bis 2050 basiert auf Annahmen zu Wirtschaftswachstum und Bevölkerungszahlen in den von GRAMOD abgebildeten Weltregionen. Die angenommene Entwicklung des länderspezifischen preisbereinigten BIP pro Kopf wurde aktuellen Langfristprojektionen der OECD entnommen (OECD, 2021). Die Bevölkerungsprojektionen entstammen den World Population Prospects 2022 der Vereinten Nationen (United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022).

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. Trotz steigender globaler industrieller CO<sub>2</sub>-Emissionen bis Mitte der 2030er-Jahre entwickelt sich der deutsche CO<sub>2</sub>-Fußabdruck im Trendszenario stetig rückläufig. Im gesamten Zeitraum 2020 bis 2050 zeigt sich annähernd eine Reduktion um 70 %.

Die computergestützte Modellierung im Forschungsvorhaben DigitalRessourcen hat eine erste vollständige globale Bewertung der Material- und CO<sub>2</sub>-Intensität des digitalen Wandels in Deutschland ermöglicht. Im Trendszenario entwickelt sich der gesamtwirtschaftliche deutsche Rohstoffkonsum (RMC) langfristig rückläufig, während der Rohstoffeinsatz der deutschen Wirtschaft (RMI) zwischen 2020 und 2050 insgesamt um rund 12 % steigt.

Die unterschiedliche Dynamik der Indikatoren RMI und RMC erklärt sich durch die unterschiedlichen sozioökonomischen Entwicklungen in Deutschland und im Rest der Welt. In ihrer Zusammensetzung zeigen sich beide gesamtwirtschaftlichen Materialindikatoren langfristig qualitativ übereinstimmend: Die Anteile fossiler Rohstoffe und biotischer Materialien sinken im Trendszenario bis zum Jahr 2050 deutlich, während die Primärrohstoffnutzung von Metallerzen und nicht metallischen Mineralien steigt.

Die Trendprojektion stellt kein Wirtschaftsprognose dar, sondern ein plausibles zukünftiges Entwicklungsszenario. Es wurden sechs alternative Zukunftsszenarien bis zum Jahr 2050 entwickelt, die abbilden, wie sich zentrale Einflussfaktoren der zukünftigen Digitalisierungstrends in Deutschland auswirken könnten. In den Simulationen wurden mehrere Einflussfaktoren als „zentrale Stellschrauben“ für Effizienzsteigerungen in der Produktion und für Bedarfs- und Konsumentenentwicklungen 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 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.
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.

Die Rohstoffnutzung der Digitalisierung in Deutschland entwickelt sich bis 2024 in allen Szenarien parallel. Ab 2024 unterscheiden sich die Szenarien, wobei *Trend*, *Material-Lighter ICT Hardware* und *Greener ICT* ähnlich sind, ebenso wie *Less and Softer* und *Less, Softer and Greener*. Die Primärrohstoffnutzung geht über den gesamten Zeitraum zurück, von etwa 95 Millionen Tonnen auf weniger als 59 Millionen Tonnen im Szenario *Less, Softer and Greener* im Jahr 2050. Das Szenario *More, Bigger and Faster* weist die höchste Primärrohstoffnutzung auf, mit einer Differenz von etwa 17,6 Millionen Tonnen im Vergleich zum Szenario *Less, Softer and Greener* im Jahr 2050. Dies entspricht einer Zunahme um etwa 30 %.

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 der digitalisierungsbedingte Rohstoffeinsatz der deutschen Wirtschaft ( $RMI_{Dig.}$ ) entwickelt sich bis zum Jahr 2024 in den Szenarien nahezu identisch. Ab 2024 unterscheiden sich die Szenarien. Über den gesamten Zeitraum nimmt die Primärrohstoffnutzung zu, von etwa 157 Millionen Tonnen im Jahr 2020 auf ungefähr 170 Millionen Tonnen im Szenario *More, Bigger and Faster* im Jahr 2050.

Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der deutschen Digitalisierung zeigt über den gesamten 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<sub>2</sub>-Emissionen gekennzeichnet. Die Differenz zwischen diesem Szenario und *Less, Softer and Greener* beläuft sich im Jahr 2050 auf etwa 4 Millionen Tonnen.

Im Vergleich des Rohstoffkonsums der deutschen Digitalisierung nach Produktgruppen zeigt sich eine Zunahme der Unterschiede über die Zeit. Die Hardware fällt besonders auf, da sie sich am stärksten vom Trendszenario unterscheidet. Im Szenario *More, Bigger and Faster* treten die höchsten Abweichungen auf, während *Material-Lighter ICT Hardware* die geringsten aufweist. Im Jahr 2050 beträgt die Differenz bei der Hardware über 7,5 Millionen Tonnen.

Die simulierten Effizienzsteigerungen in den Szenarien *Material-Lighter ICT Hardware* und *Greener ICT* reduzieren die Rohstoffintensität und die CO<sub>2</sub>-Emissionen der deutschen Digitalisierung nur unwesentlich. Dies steht im Gegensatz zu den anderen Szenarien, die alternative Bedarfs- und Konsumentenentwicklungen simulieren. Dies liegt daran, dass die besonders rohstoff- und CO<sub>2</sub>-intensive Hardware hauptsächlich importiert wird.

## Zusammenfassung - Modellierung des digitalen Wandels bis zum Jahr 2050

Das Modell GRAMOD wurde verwendet, um zukünftige Entwicklungspfade der Digitalisierung in Deutschland zu modellieren. Ein Trendszenario prognostiziert eine Verdoppelung des Produktionsniveaus von IKT-Gütern und Dienstleistungen weltweit von 2020 bis 2050. Für Deutschland ergibt sich ein schwaches, aber stabiles Wirtschaftswachstum mit einer Entkopplung von globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen und Rohstoffkonsum. Der gesamtwirtschaftliche CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und der Rohstoffkonsum gehen langfristig zurück, während der Rohstoffeinsatz in die deutsche Wirtschaft leicht ansteigt.

Neben dem Trendszenario wurden sechs alternative Zukunftsszenarien untersucht, die Effizienzsteigerungen in der Produktion von IKT-Gütern und die Entwicklung der privaten Nachfrage variieren. Das Szenario *More, Bigger and Faster* prognostiziert eine Steigerung des Rohstoffkonsums um 19% im Jahr 2050 im Vergleich zum Trendszenario, während das Szenario *Less, Softer and Greener* einen Rückgang des Rohstoffkonsums und -einsatzes vorsieht.

Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Digitalisierung variiert in ähnlichen Größenordnungen wie der Rohstoffkonsum, mit einer Zunahme von 18,2% im Szenario *More, Bigger and Faster* und einer Abnahme von 8,1% im Szenario *Less, Softer and Greener* im Jahr 2050 im Vergleich zum Trendszenario.

Beide Alternativszenarien unterstellen deutliche Variationen der privaten Nachfrage. Die Ergebnisse deuten darauf hin, dass die analysierten Fußabdruck-Indikatoren in Zukunft besonders durch die Vorleistungsnachfrage der deutschen Wirtschaftszweige getrieben werden.

Das Vorhaben "DigitalRessourcen" hat keine spezifischen Szenarien für die zukünftige produktionsseitige Nachfrage nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen entwickelt. Zukünftige Forschungsvorhaben könnten diese Lücke füllen. Idealerweise sollten in solchen Vorhaben die erwarteten Produktionsstrukturen für ausgewählte Bereiche (wie Landwirtschaft, Automobilindustrie oder Gesundheitsdienstleistungen) abgeleitet und dann detailliert in den Input-Output-Strukturen des GRAMOD-Modells parametrisiert werden.

## Gestaltungsfelder für eine nachhaltigere Digitalisierung

Die Digitalisierung ist ein komplexes System mit hohem Ressourcenbedarf und Treibhausgasemissionen (Kapitel 3, 4, 5-6). Das Forschungsvorhaben "DigitalRessourcen" hat neun Gestaltungsfelder identifiziert, die das Potenzial haben, Ressourcenbedarf und Umweltbelastungen zu reduzieren. Diese Felder umfassen den gesamten Lebenszyklus von IKT-Gütern und Dienstleistungen, einschließlich Herstellung, Nachfrage, Nutzung und Recycling. Ein Querschnittsfeld ist die "Datenlage und Transparenz", die alle anderen Felder beeinflusst. Die Felder adressieren die Umsetzung von Nachhaltigkeitsprinzipien, einschließlich Effizienz, Konsistenz und Suffizienz. Für eine nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung ist eine umfassende Transformation erforderlich. Beispielhafte Maßnahmen für verschiedene Akteure\*Akteurinnen wurden für jedes Gestaltungsfeld benannt. Diese Maßnahmen können auch Auswirkungen auf andere Gestaltungsfelder haben, z. B. können Maßnahmen zur Kreislaufwirtschaft die Lieferketten beeinflussen.

Das Gestaltungsfeld "Kreislaufwirtschaft" zielt darauf ab, den Rohstoffkonsum zu reduzieren und die Nutzungsdauer von Produkten zu verlängern. Die Herstellung von IKT-Geräten erfordert den Einsatz bestimmter Rohstoffe, die oft unter schlechten sozialen und ökologischen Bedingungen abgebaut werden. Die Digitalisierung in Deutschland hängt stark von Produktionsprozessen in Asien ab, die erhebliche Mengen fossiler Energieträger nutzen. Eine effizientere Gestaltung von digitalen Geräten und Dienstleistungen könnte den Ressourceninanspruchnahme der Digitalisierung reduzieren, führt aber oft zu einer Steigerung des Konsums, den sogenannten

Rebound-Effekten. Es ist notwendig, diese Effekte zu minimieren und Bedingungen zu schaffen, die zu realen Effizienz- und Nachhaltigkeitseffekten führen.

Die Digitalisierung kann die Energieeffizienz verbessern (z. B. „Industrie 4.0“), verursacht aber auch einen steigenden Ressourcen- und Energiebedarf, insbesondere durch IKT-Geräte, Rechenzentren und Datenübertragungsprozesse. Lebenszyklusanalysen zeigen, dass der Hauptanteil des Energiebedarfs durch die Nutzung von IKT-Geräten und den Betrieb von Rechenzentren entsteht. Für eine nachhaltigere Digitalisierung muss der Energiebedarf von Geräten und Dienstleistungen reduziert und der Anteil erneuerbarer Energien im Strommix erhöht werden.

Das Gestaltungsfeld „Relevante Sektoren“ zeigt, dass die Produktgruppe Hardware den größten Ressourcenbedarf und CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aufweist. Eine feinere Aufgliederung dieser Produktgruppe in zukünftigen Analysen könnte relevante Teilbereiche und Akteure\*Akteurinnen identifizieren. IKT-Geräte und digitale Dienste werden derzeit in hohem Maße nachgefragt und verwendet. Ein nachhaltigeres Konsum- und Kaufverhalten könnte den Rohstoff- und Energiebedarf sowie die damit verbundenen Treibhausgasemissionen reduzieren.

Das Querschnittsfeld „Datenlage und Transparenz“ zeigt, dass Berechnungs- und Bewertungsmethoden vereinheitlicht, die Datenlage verbessert und die Informationen veröffentlicht und verfügbar gemacht werden müssen. Dieses Feld betrifft alle Bereiche der Digitalisierung und alle identifizierten Gestaltungsfelder.

Digitale Trends haben trotz ihrer oft nachhaltigen Werbung einen großen ökologischen Fußabdruck. Um die Umweltauswirkungen digitaler Anwendungen zu verstehen und Maßnahmen zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks zu ergreifen, sind umfassendere Folgenabschätzungen in allen Bereichen der Digitalisierung erforderlich. Systematisches Monitoring kann helfen, den Fortschritt und die Auswirkungen der Digitalisierung zu überwachen und Optionen für eine nachhaltigere Gestaltung zu identifizieren.

Die Bearbeitung der Themen in den Gestaltungsfeldern erfordert die Zusammenarbeit vieler Akteure\*Akteurinnen aus Politik, Wirtschaft, Forschung und Zivilgesellschaft. Ein Beispiel ist das Gestaltungsfeld „Energiebedarf“, bei dem die Politik Rahmenbedingungen für energieeffiziente Rechenzentren schaffen könnte, Unternehmen Daten zum Energiebedarf bereitstellen könnten und die Forschung bei der Entwicklung von Standards und Lösungen unterstützen könnte. Auf dieser Grundlage könnten Verbraucher\*innen Energieeffizienz als Nachhaltigkeitskriterium in ihre Entscheidungen einbeziehen.

Folgende Projekte sollten die genannten Gestaltungsfelder priorisieren und mit allen relevanten Akteuren\*Akteurinnen gemeinsam konkrete Lösungen für eine nachhaltigere Gestaltung der Digitalisierung erarbeiten.

#### **Fazit und weiterer Forschungsbedarf**

Basierend auf vorherigen Analysen wurden Forschungsbedarfe identifiziert, um eine nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung zu ermöglichen:

- **Ressourceneffizienz und kreislaufwirtschaftliche Ansätze:** Es besteht ein Bedarf an der Entwicklung von ressourceneffizienten Hardwarekomponenten und Alternativen für kritische Rohstoffe. Dies erfordert interdisziplinäre Zusammenarbeit und Forschung in nachhaltigen Materialien und Fertigungstechniken. Die Förderung von Technologien für eine längere Lebensdauer von Geräten und die zirkuläre Nutzung digitaler Geräte und Dienstleistungen sind Schlüsselfaktoren für Ressourceneinsparungen.

- ▶ **Identifikation von Recycling-Potenzialen:** Eine ganzheitliche Bewertung der Substitution von Primär- durch Sekundärrohstoffe ist erforderlich, um die maximal nutzbaren Sekundärrohstoffmengen durch Recycling zu bewerten.
- ▶ **Energieeffizienz und erneuerbare Energien:** Da die Digitalisierung ein maßgeblicher Treiber für den globalen Energieverbrauch ist, sind innovative Technologien und Strategien zur Minimierung des Energieverbrauchs von IKT-Produkten notwendig.
- ▶ **Nachhaltige Lieferketten und Beschaffung:** Die Schaffung nachhaltiger Lieferketten für digitale Geräte und Dienstleistungen erfordert weitere Forschungsanstrengungen. Nachhaltigkeitskriterien sollten in Beschaffungsprozesse integriert werden, um IKT-Produkte umweltfreundlich herzustellen und zu vertreiben.
- ▶ **Bildung, Bewusstsein und Rebound-Effekte:** Es ist wichtig, das Bewusstsein für die Umweltauswirkungen der Digitalisierung zu schärfen und Bildungsprogramme zu entwickeln, die die Bedeutung von Ressourceneffizienz und nachhaltiger Nutzung digitaler Technologien vermitteln. Die Analyse von Rebound-Effekten, bei denen Effizienzsteigerungen paradoxerweise zu einem erhöhten Verbrauch führen, ist ebenfalls wichtig.
- ▶ **Foresight-Ansätze:** Zukunftsforschungsansätze zur Antizipation zukünftiger Entwicklungen sollten häufiger genutzt und durch Forschungsanstrengungen unterstützt werden. Dies ermöglicht eine vorausschauende Perspektive, die in die Planung von Forschungsaktivitäten integriert werden kann.
- ▶ **Eigenständige Szenarioprozesse:** Mit dem Modell GRAMOD wurde ein eigenständiger Bewertungsansatz entwickelt, der die Simulation alternativer zukünftiger Entwicklungen ermöglicht. Dieser Ansatz sollte genutzt werden, um detaillierte sektorale Entwicklungsszenarien zu parametrisieren.

Der Forschungsbedarf zur nachhaltigen Gestaltung der Digitalisierung erstreckt sich über verschiedene Disziplinen, einschließlich Ingenieurwissenschaften, Sozialwissenschaften, Wirtschaft und Umweltschutz. Die Förderung interdisziplinärer Forschung und die Schaffung von Partnerschaften sind entscheidend. Ein Schlüsselinstrument könnte ein Stakeholder-Dialog sein, der verschiedene Akteure\*Akteurinnen zusammenbringt, um gemeinsame Ziele zu definieren, Lösungen zu entwickeln und Rahmenbedingungen zu schaffen. Dieser Dialog könnte ein gemeinsames Verständnis von Handlungsbedarfen und Handlungsoptionen fördern, innovative Lösungsansätze ermöglichen und helfen, unterschiedliche Prioritäten und Bedenken zu identifizieren und mögliche Konflikte frühzeitig anzugehen.

## Summary

Digitalisation is influencing many areas of our lives and presents us with new challenges in politics, business, social affairs, ecology, culture and ethics. However, the ecological effects of digitalisation are not yet sufficiently discussed. On the one hand, digitalisation, as in "Industry 4.0", can contribute to increased efficiency and lower energy and raw material requirements. On the other hand, digital products and technologies themselves consume enormous natural resources and have a corresponding environmental impact (WBGU, 2019; Umweltbundesamt, 2019a).

In 2020, the German Environment Agency commissioned a research project to investigate the resource intensity of the digital transformation in Germany. The project "Digitalisation and natural resources" (*DigitalRessourcen*) was carried out from 2020 to 2023 by a consortium including Ramboll Management Consulting GmbH, the Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung, the Fraunhofer Institute for Intelligent Analysis and Information Systems, and the German Institute for Standardisation (*DIN*). The aim was to improve knowledge about the resource intensity of the digital transformation in Germany and to derive options for action for a sustainable, environmentally friendly, and resource-efficient design of digitalisation (Abraham *et al.*, 2023a; Abraham *et al.*, 2023b). The results of the research project are documented in a final report and an appendix (Abraham *et al.*, 2023a; Abraham *et al.*, 2023b).

### Digitalisation and natural resources – Taking stock

As part of the research project, an inventory of current scientific work dealing with the interface between digitalisation and resource conservation was carried out (WBGU, 2019; Umweltbundesamt, 2019a). Almost 100 studies were analysed at micro and meso/macro level, with a focus on life cycle assessments and energy consumption.

At the micro level, reports from federal authorities, database entries and data from private interest groups were analysed in addition to scientific publications. At the meso and macro level, the review showed that previous studies have mostly analysed the resource-saving potential of digital technologies. Two relevant preliminary studies were identified: an analysis of past trends in the use of information and communication products in Switzerland (Cabernard, 2019) and a report by the Federal Government's Scientific Advisory Council that describes the future development of resource consumption through the use of digital applications (WBGU, 2019). The GLORIA database was selected as the basis for the macroeconomic calculations in this project. In addition, the environmental and resource policy discussions on the topic were considered and categorised.

Digitalisation is a high political priority in Germany. In 2022, the federal government adopted the "Digital Strategy Germany", which aims to achieve sustainable and resource-efficient digitalisation. In 2020, the BMUV developed the "Environmental Policy Digital Agenda" with the aim of exploiting the opportunities of digitalisation in an environmentally friendly way. The German Resource Efficiency Programme (ProgRes) and the National Circular Economy Strategy (NKWS) contain measures for greater resource efficiency and a circular economy. At European and international level, there are numerous political programmes and action plans relating to digitalisation and resources, including the European Green Deal. Initiatives such as the digital product passport or the right to repair are influencing the further development of digitalisation.

### System boundaries of digitalisation

For the calculations at micro and macro level in this project, it was important to discuss and define the system and observation limits of the topic of digitalisation. Digitalisation involves the



conversion of analogue information into digital signals and describes a comprehensive process that entails far-reaching changes in industry and impacts on society.

A conceptual model was developed that encompasses various subsystems and takes into account the diversity of digital solutions and application areas. At the micro level, specific digital applications that require digital products and technologies were analysed.

In the macroeconomic input-output modelling, all uses of ICT goods and services in Germany were recorded as direct effects of digitalisation. A functional delimitation of the overall economic digitalisation system was carried out and individual share values for ICT goods and ICT services were calculated. Both the final demand and the intermediate demand for ICT goods and ICT services were recorded in full for the economy as a whole and assessed in a structured manner.

#### **The micro level: ten case studies on the life cycle data of digital use cases**

As part of the "*DigitalRessourcen*" project, ten case studies were carried out to calculate the resource intensity and greenhouse gas potential. The case studies were selected to reflect the breadth of the topic of digitalisation and covered relevant products and technologies that are used directly by end users.

The calculation of resource intensity was based on the preparation of a life cycle assessment (LCA) in accordance with DIN EN ISO 14040/44 (Deutsches Institut für Normung, 2021a; 2021b). The OpenLCA software<sup>6</sup> was used in combination with the Ecoinvent database for life cycle data (version 3.8)<sup>7</sup> (Wernet *et al.*, 2016).

The indicators considered were primary raw material input (RMI), total primary material input (TMR), cumulative energy demand (CED), water footprint (WDP), land use potential (LOP) and global warming potential (GWP). A particular focus was placed on critical raw materials such as technology metals or rare earth minerals, which are of strategic importance despite their low mass and are often associated with serious environmental impacts (Kristof & Hennicke, 2010; Liu *et al.*, 2019; Umweltbundesamt, 2021). A total of 27 digitisation-relevant raw materials were defined and calculated in each case study.

Ten case studies were conducted as part of the "*DigitalRessourcen*" project in order to analyse relevant direct environmental effects. Resource intensity was assessed using four resource footprints (material use, fossil energy, water, land) and one relevant environmental impact—global warming due to greenhouse gases—was considered.

Each case study was categorised qualitatively in terms of its current and future social significance and its theoretical environmental relief potential. Information from other literature was incorporated into the calculations and analyses of the case studies and served as a reference for the interpretation and discussion of the calculated results.

The unit to be analysed and the observation limits were defined individually for each case study. For all case studies, framework conditions were defined for the influence of the data centres, the life cycles under consideration and the use of multifunctional devices. The resource requirements were assigned to their point in the life cycle, mainly the manufacturing or utilisation phase.

For each case study, information on the case study, the unit of investigation, the results of the analysed indicators and a discussion were compiled.

---

<sup>6</sup> <https://www.openlca.org> (Stand 15. Dezember 2022).

<sup>7</sup> <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/> (Stand: 20. Februar 2023).

### The example of the "video conferencing in the home office" case study

Working from home and the use of video conferencing have become more widespread and established in Germany as a result of the COVID-19 pandemic. In a case study, the one-hour participation in a group video conference with different device combinations was analysed.

- ▶ The study showed that one hour of video conferencing generates a total raw material input (RMI) of 116 g/h and a total primary material input (TMR) of 134 g/h. Raw materials relevant to digitalisation such as copper, tin and silver play a particularly important role here, although they only make up a small proportion in terms of quantity.
- ▶ Other indicators such as the water footprint (WDP), the land footprint (LOP), the cumulative energy demand (CED) and the carbon footprint (GWP) were also calculated. The production phase dominates in all the indicators analysed, with the use phase accounting for almost 30 % of WDP and LOP and less than 20 % of CED and GWP.

### Discussion of the results and findings from the case studies

The results from the case studies of the "*DigitalRessourcen*" project show that the resource requirements and greenhouse gas potential vary depending on the use case. In some use cases, such as video conferencing and 3D printing, the majority of the resource requirements are attributable to the production phase. For others, such as Smart-Homes, cryptocurrency and e-sports, the resource input is mainly attributable to the utilisation phase (Umweltbundesamt, 2020).

In all case studies, the use phase is characterised by the electricity requirements of the use case. The resource requirements in the manufacturing phase depend on the materials used and the associated procurement and manufacturing processes. In all case studies, metal ores dominate as raw material inputs in the production phase. Among the bulk raw materials, gangue is the most mined material.

Gallium, tantalum, gold, silver, tin, nickel and, in some cases, lithium and scandium stand out among the raw materials relevant to digitalisation. These raw materials are critical in terms of the EU classification (European Commission, 2020) and are essential for the production of various ICT components. The main drivers of the demand for raw materials relevant to digitalisation are often individual devices or components of the product system under consideration, such as computers in the e-sports case study or the power supply unit in the 3D printer.

In all case studies of the "*DigitalRessourcen*" project, the analysed indicators show a similar trend with regard to the division between the production and use phases. The main drivers of the individual indicators lie in the same life cycle phases.

Uncertainties in the analysis mainly arise from the availability of data, especially since the timeliness of the data sets from the life cycle analysis database often cannot keep up with the rapid technical development of digital devices (Umweltbundesamt, 2020).

The case studies also investigated whether the respective digital application has the potential to reduce environmental impact. In some cases, such as video conferencing, this is the case. In other use cases, such as Smart-Home scenarios or 3D printing as a home application, which mainly serve to increase comfort or support additional consumer behaviour, the digital application probably has no advantages or even a negative impact in terms of resource requirements and environmental impact. In these cases, sustainable, resource- and environmentally friendly design is particularly important.

### The macro level: resource intensity and CO<sub>2</sub> emissions of the digital transformation in the years 2000 – 2020

There are two approaches to calculating the environmental impact of production and consumption at meso or macro level: "bottom-up" analyses and "top-down" analyses. "Bottom-up" analyses are based on a comprehensive list of relevant goods and services and record their environmental impacts in detail. Top-down analyses, on the other hand, analyse exclusively at macro or meso level and systematically examine the economic supply chains and demand structures of selected production sectors.

Life cycle inventories, such as those carried out in the "Case studies on life cycle data of digital use cases" (Chapter 4), are typical examples of bottom-up analyses (Umweltbundesamt, 2020). However, they require a lot of information. Therefore, bottom-up analyses were only carried out for the goods and services or digital applications that were selected for individual case studies. Macroeconomic calculations and simulations were carried out as independent "top-down" analyses for the macroeconomic assessment of the environmental-economic impact of the digital transformation (Chapters 5 and 6).

The macroeconomic limits of the "digitalisation" system were defined for the "top-down" assessments in the research project. Any use of information and communication technologies (ICT) in Germany is recorded as a direct effect of digitalisation. This includes the demand of all economic sectors for ICT as intermediate inputs in their production processes, the total final demand in Germany for ICT and the total export demand from abroad for ICT from Germany (Chapter 3).

The national accounts record aggregated payment flows between economic sectors and different types of final demand. However, the national accounts do not explicitly report on a digitalisation sector or the demand for the goods and services provided by this sector. Therefore, those sectors that are directly attributable to the ICT sector have been defined (OECD, 2011). These include the ICT service industry, ICT trade, the ICT repair industry and the ICT manufacturing industry.

The global multi-regional input-output (MRIO) database GLORIA was used for all macroeconomic assessments in the project (Lenzen *et al.*, 2017; 2022). This database reports on monetary payment flows between source and target sectors as well as on corresponding physical developments such as CO<sub>2</sub> emissions or raw material extractions. It covers 160 countries and 4 "Rest of World" regions, the period from 1990 to 2020, 120 economic sectors and various environmental factors as well as 62 material categories (Lenzen *et al.*, 2017; 2022).

For the German digitalisation sector, various indicators were analysed based on the GLORIA database for the years 2000 to 2020 in addition to monetary flows: raw material consumption (RMC<sub>Dig.</sub>), raw material use (RMI<sub>Dig.</sub>) and carbon dioxide emissions (CO<sub>2, Dig.</sub>).

Raw material consumption (RMC) reflects the global utilisation of primary raw materials for the provision of goods and services that are ultimately used domestically. To calculate this mass, the weight of all raw materials taken directly from nature in Switzerland and the weight of all primary raw materials used via imports must be added together and the weight of primary raw materials for exports abroad subtracted from this total.

The raw material input (RMI) corresponds to the raw material consumption (RMC) plus all global utilisation of primary raw materials used to provide goods and services exported from Germany to other regions of the world.

The carbon footprint calculates all CO<sub>2</sub> emissions generated globally during the production of goods and services finally used domestically (Lenzen *et al.*, 2022).

### The results of the macroeconomic analysis for the years 2000 – 2020

The results of the "top-down" assessments in the research project are based on an understanding of the system that fully captures both the macroeconomic final demand and the total intermediate demand for information and communication technologies (ICT) (Chapter 3). Various indicators were analysed: raw material consumption ( $RMC_{Dig.}$ ), raw material input ( $RMI_{Dig.}$ ) and carbon dioxide emissions ( $CO_{2, Dig.}$ ) from digitalisation.

In 2020, the raw material consumption of digitalisation in Germany ( $RMC_{Dig.}$ ) amounted to 95.41 million tonnes, an increase of approx. 8 % since 2000. More than 80 % of digital raw material consumption in 2020 was caused by the demand for hardware.

Raw material use ( $RMI_{Dig.}$ ), which takes into account both domestic final demand and export demand from abroad, totalled 157.1 million tons in 2020, an increase of almost 13.5% since 2000.

The carbon footprint of digitalisation ( $CO_{2, Dig.}$ ) was also calculated. In 2020,  $CO_2$  emissions from the production of ICT goods and services totalled just over 53.9 million tonnes. Between 2000 and 2020, the carbon footprint of digitalisation in Germany decreased by 7.6%.

### Analysis by raw material groups, geographical origin and uses

- ▶ The analysis of the research project has broken down the indicators of raw material consumption ( $RMC_{Dig.}$ ), raw material use ( $RMI_{Dig.}$ ) and carbon footprint ( $CO_{2, Dig.}$ ) of digitalisation according to various aspects.
- ▶ In 2020, the raw material consumption of digitalisation in Germany ( $RMC_{Dig.}$ ) amounted to 95.41 million tonnes, an increase of approx. 8 % since 2000. More than 80 % of this was caused by the demand for hardware, which is mainly imported from Far Eastern regions of the world. In 2020, China extracted around 26.3 million tonnes of raw materials for ICT goods and services required in Germany, which corresponds to around a quarter of Germany's total ( $RMC_{Dig.}$ ).
- ▶ Non-metallic minerals, mainly sand and gravel, were the most important material category in the consumption of raw materials for digitalisation, accounting for around 40.9% of the primary raw materials recorded. Metal ores totalled 27 million tonnes, which exceeds the quantity of fossil fuels.

Domestic final demand for digitalisation-related goods and services caused a total consumption of raw materials of more than 52.1 million tonnes in 2020. This corresponds to a share of almost 55% of total ( $RMC_{Dig.}$ ) and a share of 3.1% of total economic RMC in 2020. The remainder is distributed among the other economic sectors, such as "private households", "investments", "data processing equipment", etc. (cf. Chapter 5.5.1).

### Classification of the results of the macroeconomic analysis

The analyses of the DigitalResources research project have enabled the first complete global assessment of the material and  $CO_2$  intensity of the digital transformation in Germany. Compared to previous work, such as the UBA Resource Report 2022 (Lutter *et al.*, 2022), this project uses a broader conceptual understanding of digitalisation and a different empirical method.

Its own results show that the digital transformation in Germany between 2000 and 2020 has contributed to increasing shares of overall economic environmental impacts. The raw material consumption of digitalisation in Germany increased by around 8 % during this period. The share

of raw material consumption for digitalisation in total German raw material consumption rose from around 4.3% in 2000 to 5.6% in 2020.

The German economy's use of raw materials for ICT goods and services rose by almost 13.5% between 2000 and 2020. The share of raw materials used for digitalisation in total German raw material use rose from 4.7% in 2000 to 4.9% in 2020.

Although the carbon footprint of digitalisation in Germany decreased in absolute terms between 2000 and 2020, the share of digitalisation in Germany's total carbon footprint increased in the long term to 5.7% in 2020.

### **Resource intensity and CO<sub>2</sub> emissions: Modelling the digital transformation up to the year 2050**

Computer-aided modelling of possible future scenarios is an important part of applied sustainability research. In the DigitalResources research project, the global multi-regional input-output assessment approach was developed, which can simulate the raw material consumption and greenhouse gas emissions in the course of German digitalisation over future decades. The GRAMOD model was developed for this purpose, which dynamically updates the data structures of the GLORIA database (Chapter 5).

In accordance with the mandate, possible future development paths (scenarios) of the "digitalisation system" were quantitatively modelled and corresponding simulations were developed. The trend scenario up to 2050 is based on assumptions about economic growth and population figures in the regions of the world modelled by GRAMOD. The assumed development of country-specific price-adjusted GDP per capita was taken from current OECD long-term projections (OECD, 2021). The population projections are taken from the United Nations World Population Prospects 2022 (United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022).

In the trend scenario for Germany, there is a comprehensive substitution of fossil fuels with renewable energies in electricity generation, energy intensity in production decreases significantly and production (except electricity generation) is largely decarbonised. Despite rising global industrial CO<sub>2</sub> emissions up to the mid-2030s, the German carbon footprint is steadily declining in the trend scenario. Over the entire period from 2020 to 2050, there is an approximate reduction of 70 %.

The computer-aided modelling in the DigitalResources research project has enabled the first complete global assessment of the material and CO<sub>2</sub> intensity of the digital transformation in Germany. In the trend scenario, overall German raw material consumption (RMC) is declining in the long term, while the raw material input of the German economy (RMI) will increase by around 12% overall between 2020 and 2050.

The different dynamics of the RMI and RMC indicators can be explained by the different socio-economic developments in Germany and the rest of the world. In terms of their composition, both macroeconomic material indicators are qualitatively the same in the long term: the shares of fossil raw materials and biotic materials fall significantly in the trend scenario by 2050, while the primary raw material utilisation of metal ores and non-metallic minerals increases.

The trend projection is not an economic forecast, but a plausible future development scenario. Six alternative future scenarios up to the year 2050 were developed, which illustrate how key influencing factors of future digitalisation trends could affect Germany. In the simulations, several influencing factors were varied as "central adjusting screws" for efficiency increases in production and for demand and consumer developments in private households.

This resulted in the **following six alternative scenarios** for the research project:

1. **More, Bigger and Faster (MBF)**: Private households in Germany will increase their demand for digitalisation-related goods and services by 50% by 2050 compared to the trend scenario. Consumption is focussed on hardware: the share of ICT goods in total consumer demand for ICT goods and services doubles by 2050 compared to the trend scenario.
2. **More but Softer (MbS)**: In this scenario, private households in Germany will also increase their demand for digitalisation-relevant goods and services by 50% by 2050 compared to the trend scenario. However, this development is driven by the demand for ICT services: Their share of total consumer demand for ICT goods and services doubles by 2050 compared to the trend scenario.
3. **Less and Softer (LaS)**: In this scenario, private households in Germany reduce their demand for digitalisation-relevant goods and services by 20% by 2050 compared to the trend scenario. As in the "More but Softer" scenario, structural changes in demand towards a less commodity-orientated demand are assumed: The share of ICT services in total consumer demand for ICT goods and services doubles by 2050 compared to the trend scenario.
4. **Material-Lighter ICT Hardware (MLIH)**: This scenario illustrates the effects of efficiency increases in the domestic production of ICT goods. It is assumed that domestic producers of ICT goods will be able to reduce their material inputs by 7.5% by 2050 compared to the trend projection.
5. **Greener ICT (GICT)**: This scenario also depicts the effects of efficiency increases in domestic production. This time, however, it is assumed that domestic producers of ICT goods and ICT services will be able to reduce their material inputs by 7.5 % by 2050 compared to the trend projection. It is also assumed that the producers of ICT goods and services in Germany will be able to save additional energy by 2050. Compared to the trend projection, this results in a 15% reduction in energy demand among producers by 2050.
6. **Less, Softer and Greener (LSaG)**: This scenario considers the combined effects of efficiency increases in production and developments in demand and consumption in private households. For this purpose, the scenario settings for "3) Less and Softer" are combined with those of scenario "5) Greener ICT".

The use of raw materials for digitalisation in Germany develops in parallel in all scenarios until 2024 (Abraham *et al.*, 2023a for details). From 2024 onwards, the scenarios differ, with *Trend*, *Material-Lighter ICT Hardware* and *Greener ICT* being similar, as are *Less and Softer* and *Less, Softer and Greener*. Primary raw material use decreases over the entire period, from around 95 million tonnes to less than 59 million tonnes in the *Less, Softer and Greener* scenario in 2050. The *More, Bigger and Faster* scenario has the highest primary raw material use, with a difference of around 17.6 million tonnes compared to the *Less, Softer and Greener* scenario in 2050. This corresponds to an increase of around 30 percent.

The development of raw material consumption for digitalisation ( $RMC_{Dig.}$ ) in Germany in the *Material-Lighter ICT Hardware* scenario cannot be visibly distinguished from the development projected in the trend scenario. In the *Greener ICT* scenario, the raw material consumption of digitalisation in Germany is marginally reduced compared to the trend scenario. In 2050, this is 1% less than the reference value of the trend scenario.

The digitalisation-related use of raw materials in the German economy ( $RMI_{Dig.}$ ) also develops almost identically in the scenarios up to 2024 (Abraham *et al.*, 2023a). The scenarios differ from 2024 onwards. The use of primary raw materials increases over the entire period, from around 157 million tonnes in 2020 to around 170 million tonnes in the *More, Bigger and Faster* scenario in 2050.

The carbon footprint of German digitalisation shows a decrease in all scenarios over the entire period up to 2050 (Abraham *et al.*, 2023a). It amounts to just under 43 million tonnes in 2025 and falls to around 14 million tonnes in 2050 in the *Less, Softer and Greener* scenario with the greatest decrease. The *More, Bigger and Faster* scenario is characterised by the highest CO<sub>2</sub> emissions overall (Abraham *et al.*, 2023a). The difference between this scenario and *Less, Softer and Greener* amounts to around 4 million tonnes in 2050.

A comparison of the raw material consumption of German digitalisation by product group shows an increase in the differences over time. Hardware is particularly striking, as it differs the most from the trend scenario. The *More, Bigger and Faster* scenario shows the highest deviations, while *Material-Lighter ICT Hardware* shows the lowest. In 2050, the difference in hardware amounts to over 7.5 million tonnes.

The simulated increases in efficiency in the *Material-Lighter ICT Hardware* and *Greener ICT* scenarios reduce the raw material intensity and CO<sub>2</sub> emissions of German digitalisation only insignificantly. This is in contrast to the other scenarios, which simulate alternative demand and consumer developments. This is due to the fact that the particularly raw material and CO<sub>2</sub>-intensive hardware is mainly imported.

### **Summary - Modelling digital change up to the year 2050**

The GRAMOD model was used to model future development paths of digitalisation in Germany. A trend scenario predicts a doubling of the production level of ICT goods and services worldwide from 2020 to 2050, resulting in weak but stable economic growth for Germany with a decoupling of global CO<sub>2</sub> emissions and raw material consumption. The overall economic carbon footprint and raw material consumption decrease in the long term, while the use of raw materials in the German economy increases slightly.

In addition to the trend scenario, six alternative future scenarios were analysed, which vary efficiency increases in the production of ICT goods and the development of private demand. The *More, Bigger and Faster* scenario predicts an increase in raw material consumption of 19% in 2050 compared to the trend scenario, while the *Less, Softer and Greener* scenario envisages a decrease in raw material consumption and use.

The carbon footprint of digitalisation varies on a similar scale to raw material consumption, with an increase of 18.2% in the *More, Bigger and Faster* scenario and a decrease of 8.1% in the *Less, Softer and Greener* scenario in 2050 compared to the trend scenario.

Both alternative scenarios assume significant variations in private demand. The results suggest that the analysed footprint indicators will be driven in particular by the intermediate demand of the German economic sectors in the future.

The "DigitalResources" project did not develop any specific scenarios for the future production-side demand for goods and services relevant to digitalisation. Future research projects could fill this gap. Ideally, such projects should derive the expected production structures for selected sectors (such as agriculture, the automotive industry or healthcare services) and then parameterise them in detail in the input-output structures of the GRAMOD model.

### **Design fields for more sustainable digitalisation**

Digitalisation is a complex system with high resource requirements and greenhouse gas emissions (Chapters 3, 4, 5-6). The "DigitalResources" research project has identified nine design fields that have the potential to reduce resource requirements and environmental impacts. These fields cover the entire life cycle of ICT goods and services, including production, demand, utilisation and recycling. One cross-cutting field is "Data situation and transparency",

which influences all other fields. The fields address the implementation of sustainability principles, including efficiency, consistency and sufficiency. A comprehensive transformation is required to make digitalisation sustainable. Exemplary measures for various stakeholders have been identified for each design field. These measures can also have an impact on other design fields, e.g. measures relating to the circular economy can influence supply chains.

The "circular economy" design field aims to reduce the consumption of raw materials and extend the useful life of products. The manufacture of ICT devices requires the use of certain raw materials, which are often mined under poor social and environmental conditions. Digitalisation in Germany is heavily dependent on production processes in Asia, which use considerable amounts of fossil fuels. A more efficient design of digital devices and services could reduce the resource consumption of digitalisation, but often leads to an increase in consumption, the so-called rebound effects. It is necessary to minimise these effects and create conditions that lead to real efficiency and sustainability effects.

Digitalisation can improve energy efficiency ("Industry 4.0"), but also causes an increase in energy demand, particularly through ICT devices, data centres and data transmission processes. Life cycle analyses show that the majority of energy demand is caused by the use of ICT devices and the operation of data centres. For more sustainable digitalisation, the energy requirements of devices and services must be reduced and the proportion of renewable energies in the electricity mix increased.

The "Relevant sectors" design field shows that the hardware product group has the greatest resource requirements and carbon footprint. A more detailed breakdown of this product group in future analyses could identify relevant sub-sectors and players. ICT devices and digital services are currently in high demand and use. More sustainable consumption and purchasing behaviour could reduce the demand for raw materials and energy as well as the associated greenhouse gas emissions.

The cross-sectional field of "Data situation and transparency" shows that calculation and evaluation methods must be standardised, the data situation improved and the information published and made available. This field affects all areas of digitalisation and all identified design fields.

Despite their often sustainable advertising, digital trends have a large ecological footprint. In order to understand the environmental impact of digital applications and take measures to reduce the environmental footprint, more comprehensive impact assessments are required in all areas of digitalisation. Systematic monitoring can help to monitor the progress and impact of digitalisation and identify options for a more sustainable design.

Working on the topics in the design fields requires the cooperation of many actors from politics, business, research and civil society. One example is the "energy requirements" design field, where policymakers could create framework conditions for energy-efficient data centres, companies could provide data on energy requirements and research could support the development of standards and solutions. On this basis, consumers could include energy efficiency as a sustainability criterion in their decisions.

The next step would be to prioritise the aforementioned areas of design and for all relevant stakeholders to work together to develop concrete solutions for making digitalisation more sustainable.



### Conclusion and further research needs

Based on previous analyses, research needs were identified in order to enable the sustainable design of digitalisation:

- ▶ **Resource efficiency and circular economy approaches:** A holistic assessment of the substitution of primary raw materials with secondary raw materials is required in order to evaluate the maximum usable quantities of secondary raw materials through recycling.
- ▶ **Identification of recycling potential:** A holistic assessment of the substitution of primary by secondary raw materials is required in order to evaluate the maximum usable quantities of secondary raw materials through recycling.
- ▶ **Energy efficiency and renewable energies:** As digitalisation is a significant driver of global energy consumption, innovative technologies and strategies are needed to minimise the energy consumption of ICT products.
- ▶ **Sustainable supply chains and procurement:** The creation of sustainable supply chains for digital devices and services requires further research efforts. Sustainability criteria should be integrated into procurement processes in order to manufacture and distribute ICT products in an environmentally friendly manner.
- ▶ **Education, awareness and rebound effects:** It is important to raise awareness of the environmental impact of digitalisation and to develop educational programmes that convey the importance of resource efficiency and sustainable use of digital technologies. Analysing rebound effects, where increases in efficiency paradoxically lead to increased consumption, is also important.
- ▶ **Foresight approaches:** Foresight approaches to anticipate future developments should be utilised more frequently and supported by research efforts. This enables a forward-looking perspective that can be integrated into the planning of research activities.
- ▶ **Independent scenario processes:** With the GRAMOD model, an independent assessment approach has been developed that enables the simulation of alternative future developments. This approach should be used to parameterise detailed sectoral development scenarios.

The need for research into the sustainable design of digitalisation spans various disciplines, including engineering, social sciences, economics and environmental protection. The promotion of interdisciplinary research and the creation of partnerships are crucial. A key instrument could be stakeholder dialogue, which brings together different actors to define common goals, develop solutions and create framework conditions. This dialogue could promote a common understanding of the need for action and options for action, enable innovative approaches to solutions and help to identify different priorities and concerns and address potential conflicts at an early stage.

## 1 Hintergrund

Die Digitalisierung durchdringt immer intensiver alle Bereiche unseres Lebens. Von der Kommunikation über Wohnen, Arbeiten und Produktion bis hin zur gesellschaftlichen Organisation. Der fundamentale Wandel, den die Digitalisierung überall hervorruft, stellt uns vor gesellschaftliche, wirtschaftliche und politische Herausforderungen. Die Zugänglichkeit, das Verständnis und die Benutzung von digitalen Technologien werden zunehmend zur Voraussetzung für die erfolgreiche Teilhabe an der Arbeitswelt, an der Bildung, aber auch am gesellschaftlichen Alltag. So entwickeln sich durch die Digitalisierung beispielweise neue Konsummuster wie das Streaming von Musik, Filmen und Videospielen. Die weltweite Kommunikation und Zusammenarbeit nimmt zu und wird durch weltweiten Datenaustausch, Videotelefonie und Chats ermöglicht. Es entstehen E-Government-Angebote wie Online-Bürgerserviceplattformen, die die Kommunikation zwischen staatlichen Institutionen und Bürger\*innen vereinfachen, oder digitale personenbezogene Dokumente wie der Online-Ausweis oder der digitale Impfpass. Diese Entwicklungen befeuern den Bedarf an internetfähigen Produkten, Technologien und zugehöriger Infrastruktur. Die damit einhergehende stärkere Vernetzung von Konsum-, Produktions-, Handels- und Verwaltungsprozessen kann Prozessoptimierungen und Effizienzsteigerungen bewirken. Zeitgleich ergeben sich neue Herausforderungen: Wie stellen wir den Zugang zur notwendigen Infrastruktur sicher? Wie organisieren wir in einem zunehmend digitalen Umfeld den Daten- und Arbeitsschutz? Und wie gewährleisten wir in einer digitalen Welt die soziale Gerechtigkeit?

Zu den wichtigsten Themen der Digitalisierung, die zunehmend auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene zu bearbeiten sind, gehören insbesondere ihre negativen Auswirkungen auf die Umwelt und ihre nachhaltige Gestaltung und Entwicklung – wie auch vom Wissenschaftlichen Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (**WBGU**) in dem Hauptgutachten „Unsere gemeinsame digitale Zukunft“ (WBGU, 2019) angesprochen. Nur durch die Ermittlung negativer und positiver Einflüsse von IKT auf die Umwelt lassen sich die Potenziale eines zielgerichteten Einsatzes digitaler Technologien für den Klima- und Ressourcenschutz voll ausschöpfen (Umweltbundesamt, 2019a).

Zwar ermöglichen digitale Technologien und Anwendungen Effizienzsteigerungen in vielen – insbesondere unternehmerischen und technischen – Prozessen und damit die Schonung von natürlichen Ressourcen durch Effizienzsteigerungen. Sie verursachen aber durch einen zunehmend hohen Bedarf an natürlichen Ressourcen für ihre Herstellung bzw. Bereitstellung selbst und somit einen wachsenden **ökologischen Fußabdruck**. So kommen Andrae und Edler (2015) zu dem Ergebnis, dass der weltweite Energiebedarf des IT-Sektors bereits im Jahr 2030 einen Anteil von 21 % am Gesamtenergieverbrauch ausmachen wird. Zum Vergleich: Derzeit sind es ca. 11 % (Andrae & Edler, 2015). Speziell in Deutschland sind in den letzten Jahren steigende Energiebedarfe der Rechenzentren, vor allem durch Cloud-Computing, zu verzeichnen (Hintemann, 2018). Zudem steigen die Bedarfe an benötigter Hardware (z. B. elektronische Endgeräte) und Infrastruktur (z. B. Übertragungsnetzwerke) seit zwei Jahrzehnten kontinuierlich an (WBGU, 2019). Auch die fortschreitende digitale Zusatzausstattung von bisher analogen Objekten – häufig mit dem Zusatz „Smart“ versehen (z. B. Smart-Home) beansprucht natürliche Ressourcen. Es ist davon auszugehen, dass im Jahr 2050 dreimal so viel Kupfer wie 2010 und im Jahr 2035 viermal so viel Lithium wie 2013 benötigt wird (WBGU, 2019). Hinzu kommen die Bedarfe an diversen Edelmetallen und verschiedenen Kunststoffen sowie Glas, die beispielsweise für die Produktion von elektronischen Endgeräten unabdingbar sind (WBGU, 2019). Bereits heute gehen über 40 % der Weltjahresproduktion von Antimon, Beryllium,

Gallium, Indium und Tantal in die Produktion von digitalen Geräten ein<sup>8</sup>. Insgesamt basieren die meisten digitalen Technologien und Infrastrukturen auf nicht erneuerbaren Rohstoffen. Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV) bezeichnet daher die Rohstoffgewinnung für Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) sowie deren ökologische und soziale Folgen als Kernproblem der Digitalisierung (BMUV, 2020b). Die Extraktion von Metallen wie Gold, Kobalt, Zinn und Kupfer sowie von seltenen Erden erfolgt unter hohem Ressourcen- und Energieaufwand. Für das Herauslösen von Edelmetallen aus dem Gestein kommen oft gefährliche Chemikalien zum Einsatz. Sie können in Luft und Wasser gelangen und dabei Ökosysteme schädigen. Die zunehmenden Mengen Elektroschrott in Kombination mit immer noch unzureichendem Recycling führen zu einer erhöhten Umweltbelastung (WBGU, 2019).

Angesichts der schon heute überschrittenen planetaren Belastungsgrenzen reicht es daher nicht, nur die mit der Digitalisierung einhergehenden Effizienzsteigerungen und Chancen für eine ressourcenschonende und nachhaltige Entwicklung zu betrachten. Vielmehr gilt es zu untersuchen, wie ressourcenintensiv der digitale Wandel selbst ist. Hierbei sind insbesondere Angaben zum absoluten Ressourcenbedarf bzw. zur Ressourcenintensität der Digitalisierung notwendig. Dies erfordert einen Perspektivwechsel: Statt einzelner Lösungen und Einsatzmöglichkeiten sowie relativer Veränderungen in der Ressourceninanspruchnahme müssen absolute und aggregierende Zahlen über Sektoren und Anwendungsbereiche im Blickpunkt stehen.

Genau hier setzt das Forschungsvorhaben „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität<sup>9</sup> des digitalen Wandels in Deutschland“ (**DigitalRessourcen**) an. Ziel dieses Forschungsvorhabens war es, das Wissen über die **Ressourcenintensität** des digitalen Wandels in Deutschland zu verbessern und Handlungsoptionen im Hinblick auf eine nachhaltige, umwelt- und ressourcenschonende Gestaltung der Digitalisierung und ihrer zukünftigen Entwicklung abzuleiten.

Bei der Datenanalyse und Datenberechnung sollten sowohl eine Mikro-Perspektive (*Case-Studies* zu Lebenszyklusdaten von Produkten, Technologien, Infrastrukturen etc.) als auch eine Meso- bzw. Makro-Perspektive eingenommen werden (makroökonomische Berechnungen sowie Modellierungen bzw. Simulationen unterschiedlicher Szenarien). Das Vorhaben sollte auf unterschiedlichen Ebenen (Mikroebene, Makro-/Mesoebene) untersuchen, wie der Einsatz natürlicher Ressourcen (Rohstoffe) für das komplexe Themenfeld Digitalisierung quantifiziert und welche Datenbasis bzw. welches Datenmodell dafür verwendet werden kann. Die wichtigste Frage war dabei nicht, wie die Digitalisierung mit ihren vielfältigen Einsatzmöglichkeiten zu Effizienzsteigerungen beitragen kann (Stichwort „Industrie 4.0“) – dieses Thema ist bereits Gegenstand einschlägiger Untersuchungen. Vielmehr sollte das „System Digitalisierung“ selbst im Hinblick auf seine Ressourcenintensität quantifiziert werden.

Hierzu berechnet und simuliert das Vorhaben „DigitalRessourcen“ den Einsatz natürlicher Ressourcen (Rohstoffe/Material, Wasser, Land) und die damit zusammenhängenden Treibhausgasemissionen, die das „System Digitalisierung“ verursacht. Grundlage sind **Modellrechnungen** auf sektorspezifischer und volkswirtschaftlicher Ebene bis zum Jahr 2050.

---

<sup>8</sup> Deutsches Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess). Dritte Fortschreibung (Progress III), Juni 2020  
[https://www.bmu.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Ressourceneffizienz/progress\\_iii\\_programm\\_bf.pdf](https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Ressourceneffizienz/progress_iii_programm_bf.pdf) (Stand: 14.07.2020).

<sup>9</sup> Definition „natürliche Ressource“: Ressource, die Bestandteil der Natur ist. Hierzu zählen erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, physischer Raum (Fläche), Umweltmedien (Wasser, Boden, Luft), strömende Ressourcen (z. B. Erdwärme, Wind-, Gezeiten- und Sonnenenergie) sowie die Biodiversität. Es ist hierbei unwesentlich, ob die Ressourcen als Quellen für die Herstellung von Produkten oder als Senken zur Aufnahme von Emissionen (Wasser, Boden, Luft) dienen  
<https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf> (Stand: 29.08.2023).

Auf Mikroeben werden zehn **Fallstudien** für spezifische digitale Produkte und Anwendungsfälle mit einer LCA-Methodik untersucht. Den Analysearbeiten voran gehen eine Beschreibung des „Systems Digitalisierung“ und seiner **System- und Betrachtungsgrenzen** sowie eine **Bestandsaufnahme** des bereits vorhandenen Wissens. Das Forschungsvorhaben leitet schließlich **Gestaltungsfelder** ab und schlägt erste beispielhafte Gestaltungsmaßnahmen vor, die z. B. in einem Folgevorhaben weiter vertieft werden könnten.

Das Vorhaben ist im Kontext vieler anderer laufender Forschungsaktivitäten in unterschiedlichen Disziplinen zum Thema Digitalisierung zu sehen und versteht sich als integralen Bestandteil bzw. Baustein. Ohne das Thema selbst im Detail zu behandeln, ist auch ein Bezug zu laufenden Forschungsarbeiten im Kontext der sozial-ökologischen Forschung erkennbar, insbesondere zur Frage, wie die Digitalisierung eine sozial-ökologische Transformation unterstützen kann.

Dieses Forschungsvorhaben wurde im Auftrag des Umweltbundesamtes mit Mitteln des Ressort-Forschungsplans des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz von Ramboll Management Consulting GmbH, Fraunhofer-Institut für Intelligente Analyse- und Informationssysteme IAIS, GWS Gesellschaft für Wirtschaftliche Strukturforchung mbH und dem Deutschen Institut für Normung e.V. im Zeitraum 01.09.2020 – 31.12.2023 durchgeführt.

## 2 Bestandsaufnahme

### 2.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

In diesem Kapitel erfolgt eine Bestandsaufnahme bisheriger Arbeiten im Kontext des Themas dieses Forschungsvorhabens und somit eine Analyse des „Standes der Diskussion“.

Auf Basis einer Desktoprecherche sollten insbesondere solche (aktuellen) Arbeiten recherchiert und ausgewertet werden, die einen engen Bezug zur Schnittstelle der Themen „Digitalisierung“ und „Ressourcenschonung“ aufweisen. Einerseits sollte damit ein Überblick zur derzeitigen wissenschaftlichen und umwelt- bzw. ressourcenpolitischen Diskussion des vorliegenden Themas Digitalisierung erarbeitet werden (Überblick, national wie international). Andererseits sollten spezifische wissenschaftliche Arbeiten recherchiert werden, die sich mit dem Thema „Ressourcennutzung und Digitalisierung“ bereits beschäftigt haben und hierbei etwaige quantitative Ergebnisse im Hinblick auf Ressourcen-/Rohstofffragen erzielt und veröffentlicht haben (insbesondere Arbeiten zu den Themen Lebenszyklusanalysen, Ökobilanzen, Sachinventare, Produktbilanzen, etc.). Neben der Mikroebene war dabei auch die Mesoebene (z. B. sektorspezifische Analysen) und die Makroebene (Volkswirtschaften, inkl. Lieferketten) zu berücksichtigen. Der Fokus in diesem Kapitel lag insgesamt auf quantitative Fragen der Ressourcen- bzw. Rohstofffinanzierung. Europäische bzw. internationale Arbeiten waren mit einzubeziehen.

### 2.2 Vorgehensweise

Zunächst verschaffte eine Desktoprecherche einen Überblick über die derzeitige wissenschaftliche und umwelt- bzw. ressourcenpolitische Diskussion auf nationaler und internationaler Ebene. Zudem wurde nach Arbeiten gesucht, die sich mit dem Thema „Ressourcennutzung und Digitalisierung“ bereits beschäftigt haben und quantitative Ergebnisse zu Ressourcen- und Rohstofffragen enthalten. Im Fokus standen hierbei Ökobilanzen, Sachinventare und Produktbilanzen auf der Mikroebene sowie sektorspezifische Analysen und volkswirtschaftliche Betrachtungen auf der Meso- und Makroebene. Zusätzlich wurden zu einzelnen Themen Treffen mit Experten\*Expertinnen abgehalten, weitere relevante Informationen gesammelt und bisherige Ergebnisse diskutiert.

Für die Darstellung des Diskussionsstandes wurden mehrere Informationsquellen analysiert und analysiert: politische Agenden, Positionspapiere von Ministerien und Forschungsanstalten, europäische und nationale rechtliche Rahmenbedingungen inklusive Standardisierungs- und Normungsaktivitäten sowie wissenschaftliche Publikationen unterschiedlicher Disziplinen.

Zur Identifizierung der verfügbaren quantitativen Ergebnisse diente eine fokussierte Literaturanalyse. Sie behandelte nationale und internationale Quellen (z. B. UBA-Berichte, Berichte und Daten auf EU-Ebene, etc.) sowie einschlägige Publikationen verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen (z. B. „industrielle Ökologie“). Dazu kamen aktuelle Erkenntnisse über die Themenbereiche hinaus, beispielsweise Diskussionen bei Konferenzen oder Workshops. Die so erhobenen Informationen bilden eine wichtige Grundlage für die weiteren Arbeiten dieses Vorhabens und wurden daher ggf. weiterverwendet, fortgeführt und aktualisiert.

## 2.3 Politischer Rahmen und wissenschaftlicher Stand

### 2.3.1 Politischer Rahmen

Auf internationaler, europäischer und nationaler Ebene gibt es zahlreiche politische Programme und Aktionspläne zu den Themen Digitalisierung und Ressourcen. Sie gelten für unterschiedliche Bereiche der Gesellschaft (u. a. Wirtschaft, Wissenschaft und Rechtsprechung) und bieten konkrete Orientierung. Entsprechend ist eine Betrachtung der wichtigsten politischen Leitplanken unabdingbar, damit sich derzeitige Entwicklungen einordnen und vor allem Zukunftsszenarien ableiten lassen.

Durch die Covid-19-Pandemie bekam die Digitalisierung seit 2020 in allen Lebens- und Arbeitsbereichen einen kräftigen Schub. Umso dringlicher ist ein schonender Umgang mit natürlichen Ressourcen, damit ambitionierte Nachhaltigkeits- und Klimaschutzziele bestehen bleiben können.

Im Februar 2022 begann darüber hinaus die Invasion russischer Truppen in die Ukraine. Seither dauert der Angriffskrieg Russlands an und hat zu einer „Zeitenwende“ geführt, speziell in der internationalen Energie- und Wirtschaftspolitik. Die bewusste Abkehr von günstiger fossiler Energie aus Russland brachte insbesondere in Europa Fragen der Energiesicherheit auf die Agenda – genau wie das Gebot des Energiesparens. In Deutschland führte der zeitgleiche Ausstieg aus Atomstrom darüber hinaus zu einem höheren Kohlebedarf im Energiemix: Bereits stillgelegte Kohlekraftwerke gingen wieder in Betrieb, sodass die Stromerzeugung zunächst höhere Treibhausgasemissionen verursacht. Danach wurden 2022 ehrgeizigere Strategien aufgesetzt, damit der Wechsel zu einer Strom- und Wärmeversorgung aus mehrheitlich erneuerbaren Energiequellen schneller vonstattengeht.

Zeitgleich führten die Folgen der Covid-19-Pandemie und des Ukrainekriegs zu gestörten Produktionsprozessen und somit zur höchsten Inflationsrate seit rund 30 Jahren, die auch 2023 weiter andauert – mit entsprechenden ökonomischen und sozialen Folgen. Vor allem die stark gestiegenen Energie- und Rohstoffpreise haben verdeutlicht, wie vordringlich eine ressourceneffiziente Digitalisierung sowie eine zirkuläre Wirtschaft sind.

#### Internationale Ebene

Die wichtigste Basis der derzeitigen internationalen Bestrebungen im Bereich der Umwelt- und Nachhaltigkeitspolitik bildet die **Agenda 2030 für Nachhaltige Entwicklung**. Sie wurde im September 2015 von den Vereinten Nationen verabschiedet. Die darin enthaltenen 17 Ziele (SDG, *engl. sustainable development goals*), konkretisiert in 169 Unterzielen, adressieren die großen Herausforderungen unserer Zeit und sollen durch politische Maßnahmen umgesetzt werden.

Seitdem arbeiten viele Gruppen verschiedener Akteure\*Akteurinnen an der Ausgestaltung und Umsetzung der Agenda 2030. So auch das **Forum Umwelt und Entwicklung**, welches an der Schnittstelle zwischen internationaler und deutscher Umweltpolitik arbeitet. Es veröffentlichte im November 2019 einen „**Leitfaden für eine nachhaltige Digitalisierung**“ und schuf eine internationale Plattform, auf der alle Gruppen von Akteuren\*Akteurinnen über nachhaltige Digitalisierung und den vorgeschlagenen Leitfaden diskutieren können. Den Kern des Leitfadens bilden Vorschläge zu Grundbedingungen für eine nachhaltige Digitalisierung, inklusive konkreter Ideen zu einzelnen Elementen der digitalen Welt. Thema ist neben den Chancen der Digitalisierung auch der erhöhte Ressourcen- und Energiebedarf. Explizit wird argumentiert, dass eine nachhaltige Digitalisierung nur mit effizienten, sauberen, fairen und dezentralisierten erneuerbaren Energien gelingen kann. Zusätzlich wird die Politik aufgerufen, mit globalen

Strategien und einem rechtlichen Rahmen die Reduktion der Energie- und Ressourcenintensität von IT- und Kommunikationstechnologien voranzutreiben – inklusive Ökodesign-Vorgaben und klaren Produktkennzeichnungen. Ein besonderer Schwerpunkt liegt dabei auf der Lebens- und Nutzungsdauer von Elektronikprodukten. Die Autoren\*Autorinnen des Leitfadens schlagen ein Kennzeichnungssystem vor, das Kunden\*Kundinnen transparent und nachvollziehbar über die Lebensdauer (z. B. von erweiterbaren Teilen), Haltbarkeit, Reparierbarkeit und Modularität eines Produkts informiert. Außerdem wird angeregt, ein allgemeines Recht auf Reparierbarkeit gesetzlich zu verankern. Zusätzlich soll geplante Obsoleszenz als Straftatbestand der „vorsätzlichen Täuschung“ gelten und durch Verbraucherschutzgesetze geahndet werden. Mit Bezug auf die Nachhaltigkeitsziele 14 „Leben unter Wasser“ und 15 „Leben an Land“ soll der Ressourcengebrauch auf ein global gerechtes und vertretbares Maß reduziert werden, insbesondere in Ländern des Globalen Nordens. Demnach könnte eine Änderung der wirtschaftlichen Prioritäten den Ressourcenbedarf für die Digitalisierung deutlich senken. Daraus ergeben sich bereits potenzielle Gestaltungsfelder, die im Verlauf des Vorhabens, aufgegriffen werden.

Daneben diskutiert die **International Telecommunication Union (ITU)** die Relevanz der Digitalisierung für die internationalen Nachhaltigkeitsziele. Die ITU ist eine Sonderorganisation der Vereinten Nationen, die sich auf internationale Kommunikationsnetzwerke und Standards für Netze und Technologien konzentriert. In ihrem 2019 erschienenen Bericht (ITU, 2019) beschreibt die ITU insbesondere, wie Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) den Klimaschutz und die Anpassung daran unterstützen können. Die Autoren\*Autorinnen stellen konkret dar, wie IKT den Klimawandel überwachen und mit digitaler Technik und Infrastruktur beispielsweise die Energieeffizienz von Gebäuden oder Rechenzentren verbessern könnte. Besondere Herausforderungen sind demnach der Energiebedarf, der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und der Abfall durch Digitalisierung und IKT (*E-Waste*). Gleichzeitig sind laut ITU verschiedene digitale Innovationen für die Erreichung der weltweiten Klima- und Nachhaltigkeitsziele unverzichtbar. Dazu gehören z. B. künstliche Intelligenz (KI) oder die 5G-Technologie. Zusammen mit anderen internationalen Organisationen will die ITU künftig die Potenziale neuer Technologien für Umwelt- und Klimaschutz untersuchen und auf eine umwelt- und klimaverträgliche Digitalisierung hinarbeiten. Dieses Forschungsvorhaben beobachtet die erklärten Ziele der ITU und besonders ihren Einfluss. Laufende Normungs- und Standardisierungsaktivitäten kommen insbesondere in den politischen Handlungsempfehlungen des Vorhabens zum Tragen, um mögliche weitere Bedarfe in diesem Feld zu identifizieren und zu adressieren.

### **European Green Deal**

Auf europäischer Ebene bildet der im Dezember 2019 präsentierte *European Green Deal* (Europäische Kommission, 2019) den Rahmen für eine nachhaltige wirtschaftliche Entwicklung. Das übergeordnete Ziel besteht darin, die Netto-Treibhausgasemissionen bis 2050 auf null zu reduzieren und somit Klimaneutralität zu erreichen und das Wirtschaftswachstum und negative Umweltauswirkungen von der Ressourcennutzung abzukoppeln. Die Relevanz des *European Green Deal* für die weiteren Arbeiten in diesem Vorhaben zeigt sich insbesondere in Bezug auf die durchgeführten Simulationen (Kapitel 6). Im Folgenden werden einige für dieses Vorhaben relevante Strategien oder Aktionspläne im Kontext des *European Green Deal* kurz beschrieben.

Im März 2020 wurde die (europäische) **Industriestrategie** verabschiedet, im Mai 2021 aktualisiert. Sie schreibt unter anderem eine Modernisierung und Dekarbonisierung von energieintensiven Industrien fest. Zusätzlich soll nachhaltige und intelligente Mobilität gefördert werden, unter anderem durch eine bessere Vernetzung mithilfe digitaler Lösungen. Auch Allianzen für industrielle Clouds, Plattformen und Rohstoffe werden vorgeschlagen. Dies würde

mittelfristig die Ressourceninanspruchnahme durch den digitalen Wandel verstärken, aber gleichzeitig zu effizienterem und nachhaltigerem Wirtschaften beitragen. Ein neuer Schwerpunkt seit 2021 sind kleine, mittlere und Start-up-Unternehmen, die Innovationen vorantreiben (Europäische Kommission, 2021a).

Als Antwort auf den US-amerikanischen *Inflation Reduction Act* (IRA) hat die EU-Kommission am 01.02.2023 den „**Green Deal Industrial Plan**“ (GDIP) vorgestellt (Europäische Kommission, 2023a). Er soll die Wettbewerbsfähigkeit der europäischen CO<sub>2</sub>-neutralen Industrie stärken und die Klimaneutralität beschleunigen. Dadurch soll die EU-Produktionskapazität von CO<sub>2</sub>-neutralen Technologien und Produkten im Sinne der ehrgeizigen europäischen Klimaziele wachsen.

Eine im Rahmen des GDIP gestartete Initiative ist der **Net Zero Industry Act (NZIA)** (Europäische Kommission, 2023b). Hierin benennt die EU-Kommission strategische *Net-Zero*-Technologien, etwa Batterien, Speicher und Netze, und legt explizite Produktionsziele dafür fest. Der NZIA soll darüber hinaus als Rechtsrahmen für einfache, schnelle Genehmigungsverfahren dienen und Normen für die Verbreitung von Technologien im gesamten EU-Binnenmarkt unterstützen.

Bereits das „**Europäische Klimagesetz**“ aus dem Juli 2021 verankerte für die EU das Ziel der Klimaneutralität sowie ein Zwischenziel: die Senkung der Netto-Treibhausgasemissionen bis 2030 um mindestens 55 % gegenüber 1990.<sup>10</sup>

Außerdem ist die Richtlinie hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen (*Corporate Social Responsibility Directive, CSRD*) im Januar 2023 in Kraft getreten (Europäische Kommission, 2023d). Die Richtlinie soll bei der Umsetzung des *European Green Deals* unterstützen. Bestimmte Unternehmen von öffentlichem Interesse müssen bereits seit einigen Jahren über ihre Nachhaltigkeitsinformationen berichten. Diese Berichtspflicht wird ab 2024 erheblich und auf mehr Unternehmen ausgeweitet. Ziel ist es, die Rechenschaftspflicht europäischer Unternehmen über Nachhaltigkeitsaspekte zu erhöhen und erstmals verbindliche Berichtsstandards auf EU-Ebene einzuführen. Hierdurch soll sich eine stärkere Messbarkeit und Vergleichbarkeit sowie mehr Transparenz für Anleger\*innen und Verbraucher\*innen ergeben.

Der **Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft** von März 2020 wiederum soll die europäische Wirtschaft auf eine grüne Zukunft vorbereiten – durch die Abkehr von linearen Prozessen und Geschäftsmodellen und den Übergang hin zu kreislauforientierten Lösungen. Der Schwerpunkt liegt auf Branchen mit hohem Kreislaufpotential (Elektronik, IKT und Batterien), was die Relevanz für das vorliegende Vorhaben bedingt.

Die EU-Kommission hat unter dem Aktionsplan für Kreislaufwirtschaft am 30. März 2022 ein neues „**Kreislaufwirtschaftspaket**“ (Europäische Kommission, 2022a) vorgelegt, um nachhaltige Produkte in der EU zum Standard zu machen, kreislauforientierte Geschäftsmodelle zu fördern sowie die Verbrauchenden in der grünen Transformation zu stärken. So sollen nahezu alle Produkte innerhalb der EU während ihres gesamten Lebenszyklus umweltfreundlicher, kreislauffähiger und energieeffizienter sein. Harmonisierte Standards, die von europäischen und internationalen Normungsorganisationen erarbeitet werden, sollen die Grundlage für nachhaltige, zirkuläre Produkte bilden. Alle im Produktpass enthaltenen Informationen sollen auf offenen Standards und einem interoperablen, maschinenlesbaren Format basieren.

Beispielsweise hat die EU-Kommission mithilfe der **Batterieallianz** eine Modernisierung der Rechtsvorschriften für Batterien vorgeschlagen. Im Kern sollen Batterien über ihren gesamten

---

<sup>10</sup> Absatz 26 Europäisches Klimagesetz



Lebenszyklus nachhaltig, leistungsfähig und sicher sein. Konkrete Vorschläge betreffen den Gehalt an Rezyklaten sowie die Sammlung, Behandlung und Verwertung. Die von 45 % auf 65 % im Jahr 2025 erhöhte Sammelquote wirkt sich konkret auf die Szenarien im Forschungsvorhaben aus. Der geplante Batteriepass, der Herkunft und Nachhaltigkeit nachverfolgbar machen soll, wird der erste „**Digitale Produktpass**“ sein. Batterieherstellende müssen künftig im digitalen Batteriepass sämtliche Emissionen ihrer Produkte dokumentieren – von der Herstellung über die Nutzung bis hin zur Entsorgung. Gleichzeitig macht der Batteriepass den Batteriezustand transparent, sodass sich Batterien einfacher ins *Second Life* überführen lassen. Die Standards für den Batteriepass könnten auch für weitere digitale Produktpässe in anderen Produktkategorien nützlich sein.

Aus dem Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft geht u. a. auch der Kommissionsvorschlag für ein **Recht auf Reparatur** (Europäische Kommission, 2023c) vom 22.03.2023 hervor. Für Verbrauchende soll es damit einfacher und kostengünstiger werden, Produkte wie u. a. Mobiltelefone innerhalb wie außerhalb der gesetzlichen Garantie zu reparieren, statt diese zu ersetzen. Darüber hinaus sollen der Handwerks- bzw. Reparaturbereich angekurbelt sowie Anreize für nachhaltigere Geschäftsmodelle geschaffen werden.

Auch ein europäischer Qualitätsstandard für Reparaturdienstleistungen soll entstehen – für alle Reparaturbetriebe in der EU, die sich zu Mindestqualitätsstandards (etwa in Bezug auf die Lebensdauer oder die Verfügbarkeit von Ersatzteilen) verpflichten. Eine *Matchmaking*-Reparaturplattform im Internet soll Verbrauchenden die Kontaktaufnahme zu Reparaturbetrieben und Verkäufern instandgesetzter Waren in ihrer Region vereinfachen.

Letztlich bilden der *European Green Deal* und die daran geknüpften Strategien einen Rahmen, der ausgestaltet werden muss: mithilfe von Verordnungen, Richtlinien und Gesetzen sowie verbindlichen Standards und Normen auf europäischer und nationaler Ebene. Doch bereits jetzt ist ein klarer Trend zu mehr Digitalisierung und Vernetzung zu erkennen. Außerdem soll eine stärkere Kreislaufwirtschaft die Inanspruchnahme von Ressourcen reduzieren. Diese Trends wirken sich auf die Ressourceninanspruchnahme des digitalen Wandels in Europa und Deutschland aus und finden entsprechend Eingang in das Forschungsvorhaben.

So veröffentlichten DIN, DKE und VDI am 19.01.2023 auf Grundlage des Europäischen Aktionsplans für die Kreislaufwirtschaft eine „**Normungsroadmap Circular Economy**“ (DIN *et al.*, 2023). Sie soll Normungsbedarfe in Deutschland identifizieren und Normungslücken schließen – mit dem Ziel, zirkuläres Wirtschaften voranzutreiben. Eines der Schwerpunktthemen ist „Digitalisierung, Geschäftsmodelle und Management“.

### **EU-Aktivitäten im Bereich Digitalisierung**

Die **Europäische Digitale Strategie** der Europäischen Kommission vom Februar 2020 befasst sich mit der digitalen Zukunft Europas (Europäische Kommission, 2020b). Sie enthält drei Kernbereiche:

- ▶ Technologie im Dienst der Menschen;
- ▶ faire und wettbewerbsfähige digitale Wirtschaft; und
- ▶ offene demokratische und nachhaltige Gesellschaft.

Innerhalb dieser drei Kernpunkte werden *Supercomputing*, KI, Cybersicherheit und Vertrauen sowie fortgeschrittene digitale Kompetenzen gefördert. Die entsprechende Sensibilisierung soll sich künftig auf das Verhalten der Konsumierenden auswirken. Das Thema digitale Wirtschaft wird in den Szenarien und Modellen der folgenden Kapitel vertieft und berücksichtigt.

Im März 2021 stellte die Europäische Kommission den **Digitalen Kompass** (Europäische Kommission, 2021b) vor, der zum digitalen Wandel Europas bis 2030 beitragen soll. Der Fokus liegt auf einer verstärkten Digitalisierung im öffentlichen und privaten Bereich, was sich auch auf die Ressourcenintensität auswirken wird. Die größten Veränderungen betreffen dabei die Infrastruktur (u. a. Gigabit-Anbindung für alle europäischen Haushalte sowie flächendeckende Versorgung mit 5G-Netzwerken). Die verstärkte Nutzung von Big Data und KI in Unternehmen wird den Bedarf an IKT, Datenvolumen und entsprechenden Ressourcen verändern.

Im Rahmen ihrer Digitalstrategie hat die EU-Kommission mehrere Legislativprojekte bearbeitet: beispielsweise den Rahmen für **sichere digitale Identitäten** (Juni 2021), den **European Chips Act** (Februar 2022), ein Datengesetz für Fairness im digitalen Umfeld (**Data Act**; Februar 2022), eine neue Cybersicherheitsstrategie (**Cyber Resilience Act** – CRA; September 2022) sowie Gesetze für digitale Märkte (**Digital Markets Act** – DMA) und digitale Dienste (**Digital Services Act** – DSA; November 2022).

Besonders wichtig für die Ressourceneffizienz ist auch der Beschluss zur **Einführung einheitlicher Ladekabel für elektronische Geräte** (Europäische Kommission, 2022b). Ab 2024 haben elektronische Kleingeräte in der EU ein Einheitsladekabel nach USB-C-Standard. Einheitliche Ladegerät für mehrere Geräte sparen Ressourcen und reduzieren Elektroschrott.

#### **EU-Aktivitäten im Bereich IKT**

Der IKT-Sektor trägt bereits heute maßgeblich zu Treibhausgasemissionen und Ressourcen-/Energieverbrauch bei. Mit unterschiedlichen Methoden lassen sich die Umweltwirkungen zwar messen, aber bis jetzt fehlt ein einheitlicher Bewertungsrahmen. Daran arbeiten Normungsgremien wie das Europäische Institut für Telekommunikationsnormen (ETSI), der Standardisierungssektor der ITU (ITU-T), die Internationale Elektrotechnische Kommission (IEC) und die Internationale Organisation für Normung (ISO). Sie sind daher eine wichtige Informationsquelle für die Fallstudien in diesem Vorhaben. Neben Energiemanagement und Treibhausgasemissionen spielen weitere Umweltbereiche wie Wasser oder die Rohstoffinanspruchnahme für die Sachbilanzen eine Rolle. Die bessere Transparenz kann sich auf das Verhalten der Konsumierenden auswirken, was im weiteren Vorhaben berücksichtigt werden muss.

Der **fortlaufende Plan für die IKT-Normung** bildet die Brücke zwischen EU-Politik und IKT-Normungsaktivitäten. Die jährlich von der Europäischen Kommission aktualisierten Dokumente zeigen den maßgeblichen Beitrag von Normung und Standardisierung zu den politischen Zielen der EU. Im fortlaufenden Plan von 2021 spielt als eines von vier Handlungsfeldern das Thema nachhaltiges Wachstum eine entscheidende Rolle. Hier werden auch die Umweltwirkungen der zunehmenden Digitalisierung betrachtet, die vor allem in die Fallstudien einfließen werden. Die übergeordneten Konzepte und Ziele hingegen haben Einfluss auf die makroökonomischen Entwicklungen.

Die Ausgabe 2023 des fortlaufenden Plans für IKT-Normung (Europäische Kommission, 2023e) berücksichtigt die Erkenntnisse aus der Covid-19-Pandemie, als digitale Anwendungen einen starken Schub erfuhren. Darüber hinaus werden das Metaverse, Quantentechnologien sowie Digitale Zwillinge neu untersucht. Eines der Themen mit höchster Priorität ist der Digitale Produktpass.

#### **EU-Gesetzgebung im Bereich Digitalisierung und Ressourcen**

Politische Strategien lassen sich durch Normung und Standardisierung (als nicht verpflichtende Handlungsempfehlungen für Unternehmen) konkretisieren und umsetzen. Einige der beschriebenen politischen Ziele wiederum sind Gegenstand von Gesetzen oder Verordnungen.

Sowohl themenrelevante Standards und Normen als auch Gesetze und Verordnungen bieten Ansatzpunkte für das laufende Forschungsvorhaben: Sie haben unmittelbaren Einfluss auf die Zukunftsszenarien oder geben Impulse für die Identifikation und Ausarbeitung der Gestaltungsfelder und Politikempfehlungen. Hier stehen Bereiche im Fokus, die die Nutzung von Ressourcen über deren Lebenszyklus (Extraktion, Verwendung und Verwertung) hinweg oder aber die Tendenzen der Digitalisierung beeinflussen.

Die **Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG** nimmt direkten Einfluss auf den Einsatz von Ressourcen sowie die Wiederverwendbarkeit und das Recycling von Produkten. Energierelevante Produkte (und damit digitale Geräte) und ihr erheblicher Ressourcengebrauch stehen im Fokus. Dabei wird die Ressourceneffizienz als bedeutender Umweltparameter benannt. Beispielsweise fordert Art. 11 (Anforderungen an Bauteile und Baugruppen) relevante Angaben zur Materialzusammensetzung sowie zum Verbrauch von Materialien und/oder Ressourcen. Die Richtlinie spezifiziert, dass die Verbesserung von Umweltaspekten eines Produkts u. a. anhand von Kriterien wie dem Verbrauch an Energie, Wasser und anderen Ressourcen während des Produktlebenszyklus zu beurteilen ist (Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union, 2009).

Die produktspezifische **RoHS-Richtlinie 2011/65/EU** betrifft gefährliche Substanzen in Elektrogeräten. Im Kern sieht sie das Verbot von bestimmten gefährlichen Substanzen bei der Herstellung von Elektrogeräten vor. Sie beeinflusst direkt die Herstellung (und damit die Wiederverwendbarkeit) von Elektrogeräten und letztlich die Infrastruktur der Digitalisierung. Gleichzeitig fördert sie die Ressourceneffizienz durch eine bessere Recyclingfähigkeit von Elektroaltgeräten (EAG): Dank weniger gefährlichen Substanzen in den Geräten können diese auch anders als durch Verbrennung verwertet werden. Somit gelangen mehr Materialien in den Kreislauf zurück. Genaue Zahlen zu den Mengen an gefährlichen Substanzen, die die Richtlinie zu vermeiden hilft, sind nicht vorhanden.

Die **WEEE-Richtlinie 2012/19/EU** nimmt durch eine Sammel- und Recyclingquote erheblichen Einfluss auf das Recycling von IKT-Hardware. 2019 wurde die Mindestsammelquote von Elektro- und Elektronik-Altgeräten auf 65 % erhöht (Art. 7 (1)), wobei die meisten EU-Mitgliedstaaten diese Vorgabe aktuell verfehlen. Deutschland erreichte 2018 ca. 45 %, also die vor 2019 geltende Quote. Künftig soll die Richtlinie die Sammlung und das Recycling von IKT-Endgeräten und somit die Kreislaufwirtschaft stärken.

Die beschriebenen rechtlichen Vorgaben wirken sich teilweise direkt auf das Verhalten verschiedener Akteure\*Akteurinnen in den jeweiligen Bereichen aus – mit positiven oder negativen Folgen bei der Ressourceninanspruchnahme. Dabei gilt allerdings zu berücksichtigen, dass es in vielen Fällen ein Wechselspiel mit anderen Bereichen gibt (u. a. Konsumverhalten im Allgemeinen, wirtschaftliche und technologische Entwicklung, demografischer Wandel etc.). Dies ist in den Berechnungen für die makroökonomischen Berechnungen und Simulationen zu berücksichtigen.

### **Nationale Programme und Strategien**

Viele Aspekte aus internationalen und europäischen Absichten, Plänen und Strategien finden sich in unterschiedlicher Form in nationalen Programmen wieder.

Die 17 Nachhaltigkeitsziele der **Agenda 2030** werden in Deutschland durch die **Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie** umgesetzt. Ein vorrangiges Ziel ist der Ressourcenschutz, den Deutschland 2017 als festen Bestandteil der G20-Gespräche im Rahmen des seitdem hier stattfindenden Ressourceneffizienz-Dialogs verankern konnte. Weitere Beispiele für nationale politische Instrumente im Ressourcen- oder Umweltschutz sind die **Rohstoffstrategie** der Bundesregierung (2020), das **Abfallvermeidungsprogramm** (2013), das

**Klimaschutzprogramm 2030** (Oktober 2019) sowie das **Klimaschutz-Sofortprogramm 2022** (BMWK, 2022). Dieses schreibt höhere nationale Minderungsziele für die Jahre 2030 (mind. 65 % gegenüber 1990) und 2040 (mind. 88 %) sowie das Ziel der Netto-Treibhausgasneutralität bis 2045 fest. Da die neuen Klimaschutzziele durch beschleunigte Sektorenkopplung zu einem insgesamt höheren Strombedarf führen, soll der Ausbau von Wind- und Solarenergie dem entsprechen.

Bereits 2012 legte Deutschland als einer der ersten Staaten Ziele, Leitideen und Handlungsansätze zum Schutz der natürlichen Ressourcen fest. Dazu verabschiedete es das **Deutsche Ressourceneffizienzprogramm (ProgRess)**. Dessen Weiterentwicklung für 2020 bis 2023 (ProgRess III), federführend vom BMUV bearbeitet, soll die Ressourceneffizienz entlang der gesamten Wertschöpfungskette steigern. Zu den Schwerpunkten gehören, die Produktion zu digitalisieren, Umweltaspekte in die Industrie 4.0 zu integrieren und Standardisierungs- und Normungsbedarfe zu identifizieren. Viele der Maßnahmen beabsichtigen nicht nur mehr Ressourceneffizienz durch Digitalisierung, sondern betreffen auch eine ressourcenschonende und umweltgerechte Digitalisierung. So ist beispielsweise der Aufbau einer *Open-Data*-Plattform zum Ressourcenschutz vorgesehen. Sie soll dabei helfen, Fortschritte, Fehlentwicklungen und Handlungsbedarfe in der Ressourcenpolitik zu erkennen. Außerdem soll sie die öffentliche Datenbasis für einzelne Stoffströme sowie für deren Umweltrelevanz erweitern. ProgRess III soll zudem die Richtlinie zur Nutzungsdauer, Aussonderung und Verwertung von IT-Geräten und Software in der Bundesverwaltung überarbeiten, den Blauen Engel für den IT-Bereich weiterentwickeln und Umweltzeichen für ressourceneffiziente Software schaffen (BMUV, 2020b). Welche direkten und indirekten Auswirkungen dies auf die Ressourceneffizienz haben wird, werden die folgenden Arbeiten des Forschungsvorhabens im Detail betrachten und quantifizieren.

Derzeit (Stand: Dezember 2023) ist in Deutschland unter Federführung des BMUV eine **Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS)** in Vorbereitung, die im Laufe des Jahres 2024 verabschiedet werden soll. Auch das Thema Digitalisierung wird in der NKWS behandelt werden.

Auch Normung und Standardisierung sind im Deutschen Ressourceneffizienzprogramm prominent verankert. Im Juli 2020 haben DIN und DKE (Deutsche Kommission Elektrotechnik Elektronik Informationstechnik in DIN und VDE) eine gemeinsame interne Aktionsgruppe gegründet, um die insgesamt 118 Maßnahmen von ProgRess III genauer zu prüfen. Anlass waren die folgenden zwei Kernaussagen aus dem Deutschen Ressourceneffizienzprogramm:

- ▶ „Aktivitäten im Bereich von Normung und Standardisierung, die einer Integration von Ressourcen- und Umweltaspekten in Industrie 4.0 / Automatisierung / IT / Building Information Modelling (BIM) dienen, sollten daher deutlich forciert werden.“ (ProgRess III, S. 45, Maßnahme 34).
- ▶ „Die Bundesregierung wird an die Normungsinstitutionen herantreten, um bestehende Rezyklatstandards zu stärken und um neue Standards beispielsweise für Kunststoffe sowie Edel- und Sondermetalle zu ergänzen.“ (ProgRess III, S. 53, Maßnahme 54).

DIN und DKE haben daher in dem Positionspapier „Call for Action – Normung als strategischer Partner zur Umsetzung von ProgRess III“ dargelegt, wie Normung und Standardisierung die Umsetzung von ProgRess III unterstützen können. Zudem enthält das Positionspapier erste Handlungsempfehlungen im Bereich Normung, etwa die Schaffung bzw. Überarbeitung von Kriterien und Verfahren für die Reparierbarkeit von Produkten oder die Entwicklung einer Kennzeichnung für den Anteil von Recyclingkunststoffen.

Neben Progress mit einem allgemeinen Schwerpunkt auf Ressourcen spielt auch die **Energieeffizienzstrategie 2050 (BMWi)** eine wichtige Rolle im Forschungsvorhaben. Die Bundesregierung verfolgt damit das Ziel, den Primärenergieverbrauch gegenüber 2008 zu halbieren und Deutschland zur weltweit energieeffizientesten Volkswirtschaft zu machen. Konkret sollen Energiewende und Klimaschutz wirksam und kosteneffizient unterstützt werden. Mit Blick auf die Digitalisierung will die Strategie den Energiebedarf senken und weitere Aspekte der Ressourceneffizienz in Angriff nehmen. Die Maßnahme zu nachhaltigem Verbraucherverhalten und nachhaltiger Ressourcennutzung soll Hemmnisse in rechtlichen, ökonomischen und informatorischen Rahmenbedingungen identifizieren und diesen entgegenwirken. Auch soll das Prinzip der Kreislauf- bzw. Stoffstromwirtschaft in Produktionsprozessen stärker verankert werden und bislang nicht ausgeschöpfte Emissionsminderungspotenziale zugänglich machen (BMW, 2019). Die Energieeffizienzstrategie 2050 nennt also nicht nur Energie- und Ressourceneffizienzpotenziale durch die Digitalisierung, sondern auch konkrete Ansatzpunkte für die Ressourcenschonung bei der Digitalisierung. Diese Ansatzpunkte beziehen sich z. B. auf die Nutzungsdauer von IKT-Hardware bei Verbrauchenden oder auf die Wiederverwendung von Ressourcen für die Produktion von Hardware. Die genannten Aspekte fließen auch in die Fallstudien bzw. Zukunftsszenarien des Forschungsvorhabens ein.

Die **Breitbandstrategie** (2009) bezieht sich hauptsächlich auf den digitalen Wandel. Mit ihr legt die Bundesregierung vier strategische Säulen zum Erreichen der Breitbandausbauziele fest. Kernthemen umfassen flächendeckend leistungsfähige Breitbandanschlüsse sowie Quoten für den angestrebten privaten Breitbandausbau. Der Breitbandausbau benötigt zunächst Ressourcen für die Infrastruktur. Daher sind eine Analyse sowie konkrete Vorschläge und Maßnahmen für eine möglichst ressourcenschonende Umsetzung der Strategie notwendig.

Mit Bezug auf die Digitalisierung und deren konkrete Umweltwirkungen spielt die **Umweltpolitische Digitalagenda** des BMUV eine wichtige Rolle. Ihre Grundlage bilden verschiedene Maßnahmen aus bestehenden Strategien und Programmen der Bundesregierung und des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV). Das erste Maßnahmenpaket mit dem Titel „Zukunftsprogramm Umweltgerechte Digitalisierung“ sieht vor, dass Energiebedarf und Ressourcengebrauch digitaler Technologien sinken sollen: „Die Maßnahmen sollen die Lücken schließen, die insbesondere das europäische Regelwerk mit Blick auf Hardware, Software und Clouddienste lässt. Sie sollen dafür sorgen, dass die EU-Ökodesign-Richtlinie auch Smartphones erfasst. Oder dafür, dass elektronische Produkte durch verbindliche Updates, Ersatzteile und Reparaturdienstleistungen langlebiger werden. Mit einem Register für Rechenzentren soll der Energieverbrauch der digitalen Infrastruktur besser kontrolliert und reduziert werden. Kriterien für nachhaltige künstliche Intelligenz ergänzen das Programm“ (BMUV, 2020c).

Die Umweltpolitische Digitalagenda ist Teil der **Green-IT-Initiative** des Bundes. Diese verfolgt schon seit 2008 u. a. das Ziel, den durch IT verursachten Energieverbrauch und die entsprechenden Treibhausgasemissionen zu reduzieren. Dazu kommen Maßnahmen für eine ressourcenschonende Beschaffung und Nutzung von IKT, beispielsweise in Form konkreter Anforderungen für den Einsatz von IKT innerhalb der Bundesverwaltung.

Mit dem „**Fast-Track-Ökodesign**“ will das BMUV die Energie- und Ressourceneffizienz durch das Produktdesign steigern. Dafür soll die Ökodesign-Richtlinie auch für Smartphones, Tablets und Netzwerkkomponenten gelten. Veraltete Kriterien sollen an neue Entwicklungen angepasst werden (z. B. bei Computern). Doch nicht nur für Energieeffizienz, sondern auch für Materialien oder Ressourcen soll es Kriterien geben. Der gesamte Lebenszyklus von Hardware soll betrachtet und die Reparatur erleichtert werden. Demnach ließen sich zahlreiche Teilbereiche

der Digitalisierung verbessern (Software, Hardware, Rechenzentren etc.). Schließlich werden auch konkrete Maßnahmen definiert: etwa die Förderung von Klimaschutz in Rechenzentren über die Kommunen und die Forschung zu Kennzahlen des Energie- und Ressourcengebrauchs (BMUV, 2020b).

Das UBA-Forschungsvorhaben „Ressourcenpolitik“ (**PolRess I**) entstand zwischen Januar 2012 und Mai 2015 im Auftrag des Umweltbundesamtes und des Bundesumweltministeriums (Jacob *et al.*, 2015). Es hatte zum Ziel, die sich entwickelnde Debatte um die Ressourcenpolitik in Deutschland aus politikwissenschaftlicher, juristischer und ökonomischer Perspektive zu analysieren und zu begleiten, Impulse zu setzen und zur Vernetzung der Interessensgruppen beizutragen. Im April 2016 startete das Folgeprojekt **PolRess II** (Jacob *et al.*, 2019), welches die Implementierung und Fortschreibung des Deutschen Ressourceneffizienzprogramms ProgRess wissenschaftlich begleiten sollte. Es analysierte relevante Gruppen von Akteuren\* Akteurinnen und deren Standpunkte in Bezug auf Handlungsbedarfe in der Ressourcenpolitik.

Der Aktionsplan „**Natürlich.Digital.Nachhaltig**“ des Bundesministeriums für Bildung und Forschung (BMBF) soll Digitalisierung und nachhaltige Entwicklung durch bildungs- und forschungspolitische Aktivitäten zusammenführen. Neben den Chancen, welche digitale Technologien und Prozesse für die Nachhaltigkeit bieten, werden auch deren Energie- und Ressourcengebrauch betrachtet. Der Plan steht im Kontext der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie der Bundesregierung und des BMBF-Programms „Forschung für Nachhaltige Entwicklung“ (FONA). Gleichzeitig hat der Aktionsplan Bezug zur Hightech-Strategie 2025, der Strategie für Künstliche Intelligenz (KI) und der Digitalstrategie des BMBF. Die nachhaltige Gestaltung digitaler Technologien ist eines der drei Schwerpunktthemen. Dazu heißt es: „Wir fördern Methoden und Technologien, die den Energie- und Ressourcenverbrauch digitaler und digitalisierter Infrastrukturen und Anwendungen reduzieren und die Wiederverwertung der eingesetzten Produkte bereits in der Entwicklung mitberücksichtigen.“ Mithilfe technologischer Innovationen sollen digitalisierte Infrastrukturen, Systeme und Endgeräte nachhaltig, energie- und ressourcenschonend gestaltet werden. Dies soll negative Folgen der Digitalisierung begrenzen und damit Menschen, Gesellschaft und Umwelt schützen. Im Mittelpunkt der betrachteten digitalen Technologien stehen nachhaltige Soft- und Hardware sowie Speichertechnologien.

Das „**Gesetz zur Verbesserung des Onlinezugangs zu Verwaltungsleistungen**“ (Onlinezugangsgesetz – OZG) (BMI, 2023) verpflichtet Bund, Länder und Kommunen, bis Ende 2022 ihre Verwaltungsleistungen über Verwaltungsportale digital anzubieten. Die 2023 anstehende Novellierung des OZG 2.0 bildet einen wichtigen Meilenstein auf dem Weg, die Verwaltungsdigitalisierung als Daueraufgabe für Bund und Länder nachhaltig zu verankern.

Das „**Gesetz über die unternehmerischen Sorgfaltspflichten zur Vermeidung von Menschenrechtsverletzungen in Lieferketten (Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz – LkSG)**“ (Lieferkettengesetz) (LkSG, 2021) regelt seit Januar 2023 die unternehmerische Verantwortung für Menschenrechte (z. B. Schutz vor Kinderarbeit, Recht auf faire Löhne) und Umwelt in den globalen Lieferketten.

Mit der „**Zukunftsstrategie Forschung und Innovation**“ (BMBF, 2023b) als Nachfolgeprogramm der Hightech-Strategie 2025 will die Bundesregierung unter Federführung des BMBF die Innovationskraft Deutschlands stärken, den Forschungstransfer unterstützen sowie digitale und technologische Souveränität anstreben. Ein Fokus liegt auf verstärkter Energie- und Ressourceneffizienz. Die Potenziale der Digitalisierung sollen Nachhaltigkeit fördern, während zugleich infolge digitaler Nachhaltigkeitsinnovationen der Ressourcengebrauch sinken soll. Geplante Maßnahmen sind international interoperable

Normen, technologische Standards sowie rechtliche Rahmenbedingungen, die eine sichere internationale Wertschöpfung und geschlossene Kreislaufwirtschaft ermöglichen. Zukünftige ressourcen- und energieeffiziente Kommunikationssysteme (wie perspektivisch 6G) sollen über die gesamte Lebensdauer gedacht werden und Daten und Energieverbrauch so weit wie möglich entkoppeln.

Ein weiteres übergeordnetes Programm bildet die im August 2019 gestartete **Initiative „KI-Leuchttürme für Umwelt, Klima, Natur und Ressourcen“** des BMUV. Die Initiative soll zur Umsetzung der KI-Strategie der Bundesregierung beitragen. Das Ziel: Deutschland und Europa zu einem führenden Standort für KI-Technologien zu machen und dabei eine verantwortungsvolle und gemeinwohlorientierte Entwicklung und Nutzung von KI zu gewährleisten. Die Förderinitiative stellt 40 Mio. Euro für Projekte bereit, die mit KI-Innovationen „aktuelle ökologische Herausforderungen bewältigen“ und „beispielgebend für eine umwelt-, klima- und naturgerechte Digitalisierung“ sind. Explizit unterstützt der Förderschwerpunkt „Ressourceneffiziente KI“ Projektvorhaben für Technologien, die den Energie- und Ressourcenbedarf von KI-Anwendungen einschließlich Infrastruktur wie Rechenzentren reduzieren. Beispiele wären das umweltorientierte, energieeffiziente Programmieren von KI-Algorithmen. Durch KI kann die Nutzungsdauer von Hardware verlängert sowie Energie- und Ressourcengebräuche durch das KI-Verfahren oder Zielsysteme für die Energie- und Ressourceneffizienz von KI-Systemen überwacht und bewertet werden (Bundesregierung, 2021a).

Im **Koalitionsvertrag 2021–2025 „Mehr Fortschritt wagen“** (Bundesregierung, 2021b) nehmen sich die Ampel-Parteien (SPD, Bündnis 90/Die Grünen, FDP) mehr Nachhaltigkeit in der Digitalisierung vor. „Durch die Förderung digitaler Zwillinge (z. B. die Arbeit an einem virtuellen Modell eines analogen Produktes) helfen wir den Verbrauch an Ressourcen zu reduzieren. Wir werden Rechenzentren in Deutschland auf ökologische Nachhaltigkeit und Klimaschutz ausrichten, u. a. durch Nutzung der Abwärme. Neue Rechenzentren sind ab 2027 klimaneutral zu betreiben. Öffentliche Rechenzentren führen bis 2025 ein Umweltmanagementsystem nach EMAS (*Eco Management and Audit Scheme*) ein. Für IT-Beschaffungen des Bundes werden Zertifizierungen wie z. B. der Blaue Engel Standard. Ersatzteile und Softwareupdates für IT-Geräte müssen für die übliche Nutzungsdauer verpflichtend verfügbar sein. Dies ist den Nutzer\*innen und Nutzern transparent zu machen“ (Bundesregierung, 2021a, S. 15).

Als ersten Meilenstein beschloss die neue Bundesregierung im August 2022 die **„Digitalstrategie Deutschland – Gemeinsam digitale Werte schöpfen“** (BMDV, 2022). Diese bildet das gemeinsame Dach für die digitalen Ziele und Schwerpunkte aller Bundesressorts, die gemeinsam an diesem Querschnittsthema arbeiten. So soll der Glasfaser- und Mobilfunkausbau als Basis für eine leistungsfähige, nachhaltige und sichere digitale Entwicklung in Deutschland weiter zügig voranschreiten. Bis 2030 soll eine flächendeckende energie- und ressourceneffiziente Versorgung mit Glasfaseranschlüssen gesichert sein. Zugleich soll auch die Digitalisierung selbst mit energieeffizienten, ressourcenschonenden und innovativen Technologien („*Clean & Green Tech*“) und dem Schließen von Stoffkreisläufen nachhaltig und klimaverträglich gestaltet werden. Digitale Technologien sind dabei ganzheitlich zu betrachten, damit soziale und ökologische Rebound-Effekte ausbleiben. Mit der Initiative „Digitale Nachhaltigkeitsinnovationen“ entsteht ein neuer Förderschwerpunkt zu Digitalisierung und Nachhaltigkeit. Förderprogramme für Umwelt, Klima, Natur und Ressourcenschutz (z. B. KI-Leuchttürme) werden weiterentwickelt und ausgebaut, um die Potenziale von digitalen Lösungen unter anderem im Bereich *Green ICT/Clean IT* zu heben und den Transfer von der Forschung in die Anwendung zu stärken. Wichtig ist der Bundesregierung auch die Transparenz gegenüber Verbrauchenden. Diese sollen u. a. darüber informiert werden, wie sie den

Energieverbrauch von digitalen Plattformen und Geräten reduzieren und welche Lebensdauer und Reparierbarkeit sie erwarten können. Ähnlich wie beim EU-Vorschlag zum Recht auf Reparatur will auch Deutschland den Zugang zu Ersatzteilen und Reparaturanleitungen sicherstellen. Hersteller\*innen müssen während der üblichen Nutzungszeit eines Produkts Updates dafür bereitstellen. Wie gut die Digitalisierung und die Umsetzung der Digitalstrategie voranschreiten, beobachtet der „Beirat Digitalstrategie Deutschland“, bestehend aus 19 Personen aus Wirtschaft, Wissenschaft und Zivilgesellschaft.

Im April 2023 ist das **Energieeffizienzgesetz (EnEfG)** (Bundesregierung, 2023) unter Federführung des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK) vom Regierungskabinett verabschiedet worden. Es soll u. a. die ressourceneffiziente Digitalisierung unterstützen. So müssen neu gebaute Rechenzentren künftig einen Teil ihrer Abwärme nutzen und ihren Stromverbrauch zunehmend aus erneuerbaren Quellen decken. Ein Energieeffizienzregister für Rechenzentren veröffentlicht künftig Informationen über den Stromverbrauch, den Anteil an erneuerbaren Energien sowie die Abwärmemengen.

Auf EU-Ebene war bereits zuvor eine **Überarbeitung der Europäischen Energieeffizienzrichtlinie (EED)** verabschiedet worden (Europäischer Rat, 2023). Vorgesehen ist unter anderem, dass sehr große Rechenzentren einmal im Jahr bestimmte Informationen melden müssen.

### **Nationale Gesetzgebung im Bereich Digitalisierung und natürliche Ressourcen**

Neben den politischen Maßnahmen und den Impulspapieren sei an dieser Stelle auch die Umsetzung in Form von Gesetzen oder Normen erwähnt. Ähnlich wie auf europäischer Ebene liegt der Fokus hier auf dem Ende des Lebenszyklus. Das Forschungsvorhaben kann diese Vorgaben für Zukunftsszenarien, Gestaltungsfelder oder Politikempfehlungen nutzen. Besonders erwähnenswert ist hier das **Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG)**. Es schreibt Abfallvermeidungsprogramme vor (§33 (3) (d)), die die Wiederverwendung von Produkten sowie Reparatursysteme insbesondere für Elektro- und Elektronikgeräte unterstützen. Da dies IKT-Geräte betrifft, besteht ein indirekter Einfluss auf die Digitalisierung. Im Forschungsvorhaben werden diese Aspekte nochmals gezielt prüfen.

Im September 2019 gaben das damalige Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV), der Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) und das UBA die Publikation „**Umweltinformationen für Produkte und Dienstleistungen**“ heraus. Sie bietet einen guten Überblick über Normen und Standards, die national und international relevant sind, und beschreibt die Instrumente der produktbezogenen Umweltinformation. Der Schwerpunkt liegt auf freiwilligen Ansätzen für Unternehmen zusätzlich zu rechtlich verpflichtenden Informationen. Auch bilanzierende Instrumente zur Erhebung quantitativer umweltbezogener Daten entlang des Produktlebenszyklus sind Thema. Sie sind vor allem für die Fallstudien Lebenszyklusdaten (Kapitel 4) relevant und werden dort im Detail betrachtet.

### **Konkrete Gestaltungsansätze und Empfehlungen**

Die UBA-Publikationen **Digitalisierung nachhaltig gestalten** (Umweltbundesamt, 2019a) sowie Energie- und Ressourceneffizienz digitaler Infrastrukturen: Ergebnisse des Forschungsprojektes **Green Cloud-Computing** (Köhn *et al.*, 2020) enthalten konkrete Ansatzpunkte und politische Umsetzungsempfehlungen für eine nachhaltige Digitalisierung. Die erstgenannte Publikation betont, dass die Digitalisierung ein umweltpolitisches Querschnittsthema ist. Sie fordert ein nachhaltiges Handeln in allen Bereichen, in denen die Digitalisierung eine Rolle spielt. Dieses Impulspapier beschreibt umweltpolitische Chancen und Herausforderungen durch die Digitalisierung. Es enthält zwölf umweltpolitische Handlungsempfehlungen, die Digitalisierung und Nachhaltigkeit zusammenführen und die



Chancen der Digitalisierung bestmöglich für den Umwelt- und Ressourcenschutz nutzbar machen sollen. Außerdem weist das UBA darauf hin, dass das Umweltressort selbst zum umweltpolitischen Handlungsziel werden muss. Wieder liegt der Fokus darauf, die Digitalisierung in der Arbeit des Umweltressorts mit dem Nachhaltigkeitsgedanken zu vereinen, beginnend mit Umweltmonitoring und Umweltinformationen.

Der Bericht zum *Green-Cloud-Computing* wiederum beschreibt in vier Hauptpunkten politische Handlungsempfehlungen für eine energieeffiziente und ressourcenschonende digitale Infrastruktur: Erstens sollen Umweltwirkungen von digitalen Infrastrukturen mithilfe eines Energieausweises sowie des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks pro Serviceeinheit oder pro Übertragungseinheit sichtbar werden. Zweitens sollen Energieeffizienz und Ressourcenschutz beim Ausbau von Breitband- und Mobilfunknetzen eine Rolle spielen. Dieser Ausbau wird, wie oben beschrieben, sowohl auf internationaler Ebene (ITU) sowie auf nationaler Ebene (Breitbandstrategie) für die digitale Transformation der Gesellschaft forciert, was zunächst den Ressourcengebrauch erhöht. Dem soll künftig mit energieeffizienten Glasfasernetzen, nationalem Roaming und modernen 5G-Infrastrukturen entgegengewirkt werden. Drittens sollen Rechenzentren umweltgerecht geplant, betrieben und entsorgt werden. Hierbei sind Aspekte wie Abwärmenutzung, Auslastung, Cloud-Infrastruktur (GAIA-X), energie- und ressourceneffiziente Rechenzentrumsleistung und Entsorgung von Rechenzentren-Elektronik zu berücksichtigen. Viertens sollen Verbrauchende dabei unterstützt werden, ihren Daten- und Hardwarekonsum zu reduzieren. Maßnahmen sind die benutzerdefinierte Auflösung von Videoinhalten, die Deaktivierung von *Autoplay*-Videos sowie Anreize zur Einsparung von Daten und zur Reduzierung von Elektronikschrott (Köhn *et al.*, 2020). Beide Publikationen enthalten somit konkrete Handlungsfelder, an die das Forschungsvorhaben anknüpfen kann. Außerdem betonen sie allgemein die Relevanz einer umweltverträglichen Digitalisierung und nennen Beispiele für die Umsetzung, die wiederum in die Fallstudien sowie die makroökonomischen Modellierungen Eingang finden können.

Dass den Potenzialen der Digitalisierung ein intensiver Ressourcen- und Energieverbrauch entgegensteht, ist längst in der politischen Debatte angekommen. So diskutierte z. B. im März 2023 die Bundestagsfraktion Bündnis 90/Die Grünen in ihrer ganztägigen Digitalkonferenz über das Thema „**Nachhaltig by design – für eine klimaneutrale digitale Zukunft**“ (Bündnis 90/Die Grünen, 2023). Die Digitalisierung habe für eine Förderung von Klima- und Ressourcenschutz innovative Potenziale, doch diesen stehe der stetig wachsende Energieverbrauch durch Rechenzentren sowie der umweltschädliche Rohstoffabbau für digitale Endgeräte gegenüber. „Wäre das System Internet selbst ein Staat, so Wirtschaftsminister Dr. Robert Habeck in seiner Keynote, läge es beim Ausstoß von Treibhausgasen auf Platz sechs aller Länder. Ohne politische Steuerung finde die Digitalisierung nicht im Einklang mit Klima- und Umweltschutz statt“. Im Ergebnis plädierten Teilnehmende z. B. für eine maßvolle Steuerung der Nachfrage nach digitalen Gütern. Der Schlüssel zu mehr Nachhaltigkeit liege in der vorgeschalteten, umweltfreundlichen Softwaregestaltung. Ein Energieeffizienzlabel für Software könne Anreize für datensparsames, nachhaltiges Verhalten der Verbrauchenden schaffen. Das Recht auf Reparatur müsse zügig umgesetzt werden.

### **Zusammenfassende Erkenntnisse**

Ausgehend von internationalen Bestrebungen für eine nachhaltigen Entwicklung hat sich mit Blick auf Digitalisierung und Ressourcen in den letzten Jahren politisch und rechtlich viel verändert. Zum Teil gibt es bereits detaillierte Programme mit konkreten Maßnahmen – bis hin zu Gesetzen und Verordnungen. In anderen Fällen handelt es sich lediglich um erste Konzepte.

Für die Arbeiten im Forschungsvorhaben sind vor allem politische und rechtliche Vorgaben relevant, die die Szenarien in den makroökonomischen Berechnungen und Simulationen (Kapitel 5 und 6) betreffen. Dabei stehen zwei übergeordnete Faktoren besonders im Blick: Einerseits wird die Digitalisierung – in Form von IKT, Rechenzentren und digitalen Netzwerken – massiv gefördert (u. a. EU-Digitalstrategie, Breitbandstrategie). Damit steigt zunächst der Ressourcenbedarf, den die Modellierungen beachten müssen. In den Programmen genannte Zielgrößen und Parameter werden im Zuge der weiteren Arbeiten gesondert erhoben und genutzt. Auf der anderen Seite gibt es zahlreiche Bestrebungen, Wirtschaft und Gesellschaft nachhaltiger zu gestalten, explizit auch in den Bereichen Ressourceneffizienz und Klimaschutz. Diese Ansätze können hier als Leitplanken für die voranschreitende Digitalisierung fungieren und finden Eingang in das weitere Vorhaben. Im Blick stehen besonders jene Ansätze, die sich direkt mit der Digitalisierung und deren Teilbereichen befassen (Batteriegesetz, fortlaufender Plan für IKT etc.). Doch auch allgemeinere Vorgaben werden berücksichtigt (z. B. Klimastrategie, ProgRes etc.).

Neben der deskriptiven Darstellung werden quantitative Kenngrößen sowie konkrete Einflussparameter in jenen Kapiteln vertieft, für die sie besonders relevant sind. Dies gilt insbesondere für die Entwicklung der Szenarien in den makroökonomischen Berechnungen und Simulationen (Kapitel 5 und 6). Zusätzlich lassen sich aus den bisherigen Ergebnissen – im Anschluss an eine Synthese mit den Erkenntnissen zum wissenschaftlichen Stand – Gestaltungsfelder ableiten, aus denen schließlich Maßnahmenvorschläge zu erarbeiten sind. Zu diesem Zweck werden die Weiterentwicklung und Implementierung der verschiedenen Programme und Maßnahmen beobachtet.

### 2.3.2 Erörterung des wissenschaftlichen Stands

Der folgende Abschnitt stellt den wissenschaftlichen Stand bezüglich Beschreibung, Quantifizierung und Diskussion von potenziellen Umweltwirkungen im Zusammenhang mit der Digitalisierung oder IKT dar (vgl. Erläuterung zu „Systemwissen“ im Kapitel 1). Auf graue Literatur wurde bewusst verzichtet, da Schlussfolgerungen – insbesondere für quantitative Ergebnisse – in diesem Kontext sehr sensibel sind und sich in ihrer Qualität und Repräsentativität stark unterscheiden können. Zusätzlich beschränkt sich die Beschreibung des wissenschaftlichen Stands auf bereits publizierte Erkenntnisse. Die Einordnung in die gesamtwissenschaftliche Debatte über sozio-ökologische und ökonomische Effekte erfolgt im Zuge des Endberichts.

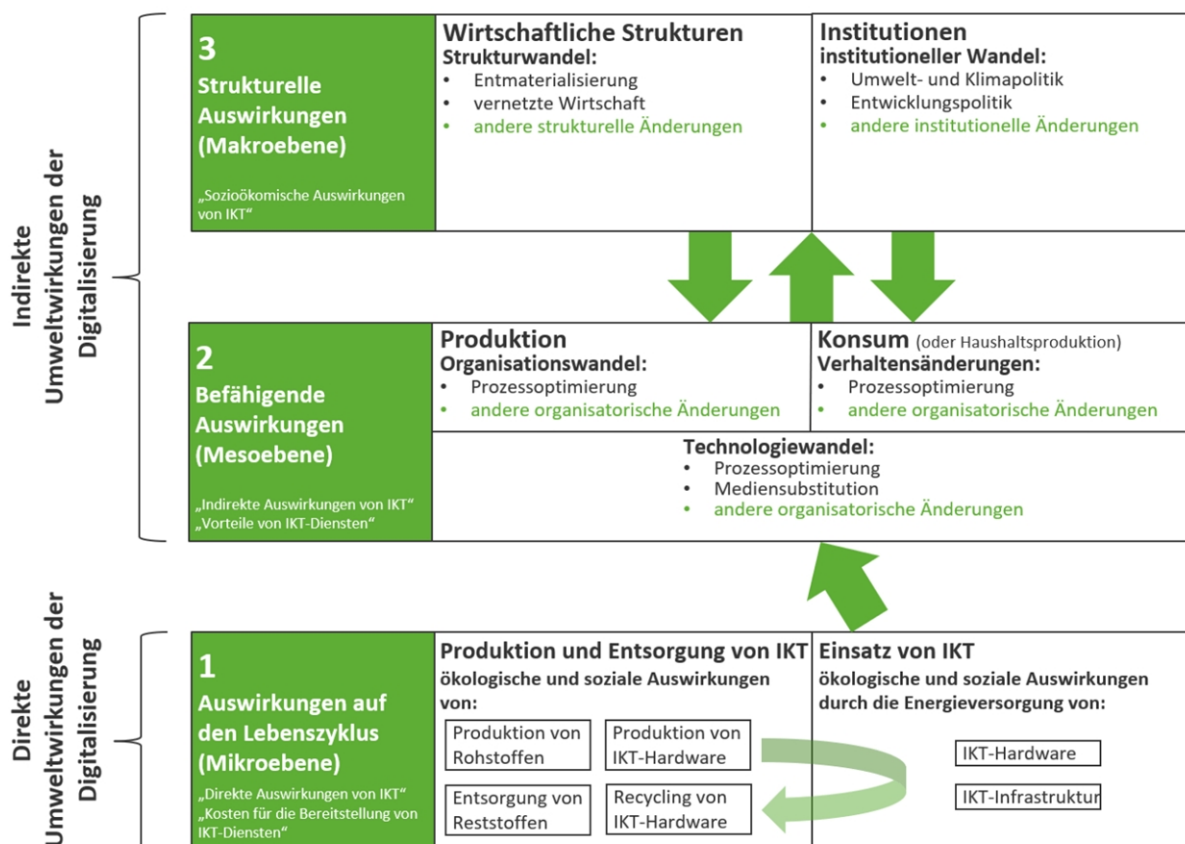
Die Beschreibung, Quantifizierung und Diskussion von potenziellen Umweltwirkungen durch Digitalisierung oder IKT ist Gegenstand zahlreicher Publikationen, Projekte, Arbeiten, etc.

Für eine systematische Erschließung und Einordnung relevanter wissenschaftlicher Erkenntnisse wird ein geeigneter konzeptioneller Bezugsrahmen empfohlen. Es bietet sich an, die vielfältigen Folgen der Digitalisierung in direkte, indirekte und strukturelle Effekte einzuordnen. Diese Vorgehensweise hat sich im wissenschaftlichen Diskurs zu Umweltwirkungen der Digitalisierung weitgehend etabliert (Liu *et al.*, 2019). Ursprünglich führten Berkhout und Hertin diese Klassifizierung in einem OECD-Bericht von 2001 ein. Seitdem wurde der Rahmen immer wieder verwendet, neu interpretiert und umbenannt. Die jüngste Weiterentwicklung ist das neue „LES-Modell“ (siehe Abbildung 1). Es baut auf der ursprünglichen Logik auf, vermeidet aber normative Annahmen und versucht, rein deskriptiv zu sein. Außerdem ist es ausbaufähig, da es nicht beabsichtigt, alle möglichen Auswirkungen der IKT zu kategorisieren.

Im Wesentlichen werden hierbei die folgenden drei Wirkungsebenen unterschieden (Hilty & Aebischer, 2015):

- ▶ **Auswirkungen auf den Lebenszyklus:** Bezieht sich auf die Auswirkungen der physischen Prozesse, mit denen die Rohstoffe für IKT-Hardware produziert, IKT-Hardware hergestellt, der Strom für IKT-Systeme bereitgestellt (einschließlich Strom für Nicht-IKT-Infrastrukturen wie Kühlung), IKT-Hardware recycelt und schließlich nicht recycelter Abfall entsorgt werden. Die Analyse erfolgt mit der Lebenszyklusbewertung (LCA).
- ▶ **Befähigende Auswirkungen:** Bezieht sich auf (menschliche) Handlungen, die durch die Anwendung von IKT ermöglicht werden. In diesem Kontext ist es wichtig, die Auswirkungen dieser Handlungen auf den Ressourcenbedarf zu verstehen. Das Modell unterscheidet zwischen drei Arten von Auswirkungen, die jeweils auf Substitution beruhen und sowohl in der Produktion als auch im Konsum auftreten können: Prozessoptimierung, Mediensubstitution und Externalisierung von Kontrolle.
- ▶ **Strukturelle Auswirkungen:** Bezieht sich auf Auswirkungen der IKT, die zu dauerhaften, auf der Makroebene beobachtbaren Veränderungen führen. Die Strukturen entstehen aus der Gesamtheit der Wirkungen auf der Mikroebene und beeinflussen sich wiederum gegenseitig. Der Schwerpunkt liegt hier auf zwei Arten von sozialen Strukturen: wirtschaftlichen Strukturen, die durch die Akkumulation von Kapital entstehen, und Institutionen. Institutionen im weiteren Sinne umfassen alles Immaterielle, d. h. Gesetze, Politiken, soziale Normen usw.

**Abbildung 1: Konzeptionelle Einordnung potenzieller Umweltwirkungen der Digitalisierung**



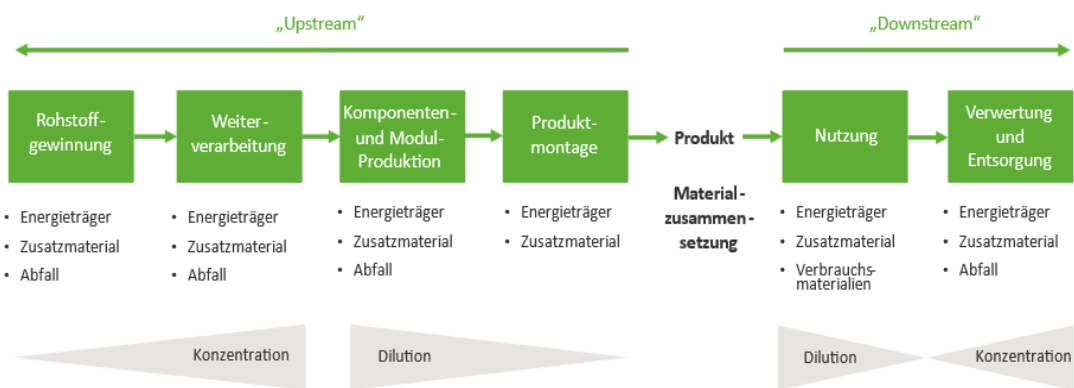
Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 nach Hilty und Aebischer (2015)

Der in Abbildung 1 gezeigte Ansatz ist angelehnt an das „*Life cycle impacts, Enabling impacts, and Structural impacts*“-ModelA (LES Model) von Hilty und Aebischer (2015). Es unterscheidet zwischen direkten Umweltwirkungen der Digitalisierung (1. Ebene: Auswirkungen auf den Lebenszyklus) und indirekten Umweltwirkungen der Digitalisierung (2. Ebene: Befähigende Auswirkungen und 3. Ebene: Strukturelle Auswirkungen). Während das LES Model nach Hilty und Aebischer (2015) lediglich Effekte auf Makro und Mikroebene zuordnet und diese nur auf die indirekten Umweltwirkungen bezieht, wird in diesem Forschungsvorhaben das Model weitergedacht und eine Unterteilung in Mikro-, Meso- und Makroebene vorgenommen. Dabei bleiben die strukturellen Auswirkungen auf der 3. Ebene (Makroebene). Die befähigenden Auswirkungen der 2. Ebene werden als Mesoebene eingestuft und die Auswirkungen auf den Lebenszyklus als Mikroebene (Hilty; Aebischer, 2015). Das liegt darin begründet, dass auf der 1. Ebene z. B. die Produktion einzelner Rohstoffe, Produkte und die Entsorgung einzelner Produkte betrachtet wird, wohingegen die 2. Ebene die gesamte Organisation betrachtet. Die 3. Ebene betrachtet sozioökonomische Effekte (Makroebene). Die Aufschlüsselung in drei Ebenen erweist sich manchmal als schwierig (Rivera *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2019). Des Weiteren wird in Abbildung 1 bewusst auf die Einordnung von negativen direkten Effekten und erwünschten positiven Effekten verzichtet. Die Zuordnung ist komplex und allgemein akzeptierte wissenschaftliche Konventionen hierzu existieren nicht. Dies gilt noch stärker für die strukturellen Effekte, da hier komplexe Ursache-Wirkungs-Ketten zu berücksichtigen sind und die Forschung hierzu erst in jüngster Zeit begonnen hat (z. B. systematische Analyse von Rebound-Effekten) (Liu *et al.*, 2019). Daher werden die potenziellen Umweltwirkungen der Digitalisierung im Folgenden lediglich in direkte und indirekte Effekte untergliedert, wie in Abbildung 1 dargestellt (vgl. auch Bitkom (2020)). Diese Unterscheidung ist zum einen in der wissenschaftlichen Debatte weitestgehend etabliert (Rivera *et al.*, 2014). Zum anderen gibt sie zugleich geeignete Betrachtungsgrenzen für die Fallbeispiele auf Mikroebene und die makroökonomischen Modellierungen vor.

### **Wissenschaftliche Erkenntnisse zu direkten Umweltwirkungen der Digitalisierung**

Direkte Umweltwirkungen sind stets über die jeweiligen Lebenszyklen von IKT-Produkten oder anderen elektronischen Produkten wie z. B. Sensoren, Aktoren und Akkumulatoren zu betrachten. Diese Produkte bilden die materielle Basis der Digitalisierung (Köhler *et al.*, 2018). Der Bedarf an natürlichen Ressourcen (Rohstoffen) und der Ausstoß von Treibhausgasen sind vor allem auf die energie- und materialintensiven Prozesse zurückzuführen, mit denen die Rohstoffe gewonnen und verarbeitet werden. Deshalb sind die virtuellen Ressourcenbedarfe in den vorgelagerten („*upstream*“) und nachgelagerten („*downstream*“) Wertschöpfungsstufen deutlich größer als die Mengen, die letztlich in den IKT-Produkten gebunden sind (vgl. Abbildung 2) (Hilty & Aebischer, 2015; Köhler *et al.*, 2018). Beispielsweise ist der spezifische Rohstoffinput bei der Herstellung eines Laptops 270-mal so hoch wie das eigentliche Produktgewicht (Dehoust *et al.*, 2013; 2020). Auch die Entsorgung beansprucht Ressourcen, wie Abbildung 2 veranschaulicht.

**Abbildung 2: Produktbezogene Ressourcenbedarfe entlang der Wertschöpfungskette**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 nach Hilty und Aebischer (2015)

Direkte Ressourcenbedarfe oder assoziierte Umweltwirkungen wie der Ausstoß von Treibhausgasen durch die Digitalisierung sind Gegenstand zahlreicher Studien. Der Schwerpunkt liegt hauptsächlich auf Endgeräten und Produkten für den Privatgebrauch (z. B. Smartphones, Tablet-PCs, Notebooks) (Arushanyan *et al.*, 2014; Liu *et al.*, 2019; Itten *et al.*, 2020). Die Informations- und Datenbasis für Übertragungsnetzwerke und Rechenzentren wird zwar kontinuierlich besser (Schödwel & Zarnekow, 2018). Direkte Umweltwirkungen von Rechenzentren, Datenübertragungsnetzen und neu aufkommenden Innovationstechnologien (z. B. Blockchain, 5G, Sensortechnologie) müssen aber noch genauer untersucht werden – besonders im Hinblick auf andere Ressourcen als Energie (Liu *et al.*, 2019). Zum Beispiel untersuchte eine Studie das Materialinventar von mobilen Übertragungsnetzwerken in Deutschland. Das Ergebnis: Wegen fehlender Daten sind nur grobe Abschätzungen möglich (Kristof & Hennicke, 2010; Liu *et al.*, 2019). Das könnte an methodischen Einschränkungen liegen. So lassen Top-Down-Analysen (d. h. makroökonomische Bewertungen) keine Rückschlüsse auf spezifische Teilsysteme (z. B. mobile Datenübertragungstechnik) des IKT-Sektors zu. Bei *Bottom-up*-Analysen (v. a. Ökobilanzen) wiederum fehlen detaillierte und aktuelle Sachinventardaten. Folglich betrachten die meisten wissenschaftlichen Studien veraltete Technologien wie 2G und 3G. Sie können daher keine Aussagen über aktuell eingesetzte Technologien machen. Dies ist bei der Quantifizierung digitaler Anwendungen auf Mikroebene zu berücksichtigen.

Je nach betrachtetem Produkt oder System entstehen die direkten Ressourcenbedarfe in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen. So konzentrieren sich die Ressourcenbedarfe vieler Endgeräte eindeutig auf die Phasen der Rohstoffentnahme bis zur Herstellung (Manhart *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2019). Bei Rechenzentren wiederum trägt die Nutzungsphase bzw. der Betrieb deutlich stärker zum abiotischen Ressourcenbedarf oder anderen Umweltwirkungen bei (Köhn *et al.*, 2020). Während der Rohstoffentnahme und Herstellungsphase für IKT-Produkte verursachen bestimmte Bauelemente und mikroelektronische Komponenten den größten Teil des fossilen und abiotischen Ressourcenbedarfs (Liu *et al.*, 2019). Nachweislich sind dies integrierte Schaltkreise (v. a. Prozessoren und Speicherchips), Displays, Leiterplatten und Batterien (Liu *et al.*, 2019). Rechenzentren umfassen neben den genannten Komponenten weitere ressourcenrelevante Infrastrukturen: z. B. Heizung, Lüftung und Klimatisierung, unterbrechungsfreie Stromversorgung und Beleuchtung (Liu *et al.*, 2019). Weil diese sogenannten Support-Systeme aber eine deutlich längere Lebensdauer haben, verbrauchen die IKT-Komponenten in den Rechenzentren wahrscheinlich mehr natürliche Ressourcen (Liu *et al.*, 2019). Übereinstimmende Anzeichen und Prognosen deuten zudem darauf hin, dass sich der anwendungsbezogene Strombedarf von den sichtbaren und greifbaren Endgeräten (z. B.

Smartphones) hin zu den „unsichtbaren“ Netzwerken und Rechenzentren verlagert (Prakash *et al.*, 2014; Andrae & Edler, 2015; Stobbe *et al.*, 2015; Cook, 2017).

Spezifische Massenbilanzen sowie Extrapolationen auf globale Materialbedarfe existieren beispielsweise für Smartphones und Tablet-PCs (Manhart *et al.*, 2016; Köhler *et al.*, 2018). Zahlreiche Fallbeispiele in der Literatur verdeutlichen, wie unterschiedlich und vielfältig die Materialien in digitalen Endgeräten sind und wie viele wertvolle Ressourcen durch unzulängliche Entsorgung verloren gehen (Köhler *et al.*, 2018). Außerdem dürften sich die Geräte je nach Modell und Betrachtungszeitpunkt aus unterschiedlichen Materialien zusammensetzen, was die Gültigkeit vorhandener Daten deutlich einschränkt (Manhart *et al.*, 2016). Das Forschungsvorhaben muss diese Einschränkungen berücksichtigen und wo möglich ansprechen.

Mengenangaben zum direkten Bedarf an stofflichen und energetischen Ressourcen sind insbesondere in Erhebungen und Statistiken zu Elektroschrott (WEEE) sowie in ökobilanziellen Studien zu IKT und deren Anwendungen zu finden. Während Ökobilanzen methodenbedingt alle assoziierten Ressourcenbedarfe erfassen, nennen Informationen zum Elektroschrott nur den im Produkt physisch messbaren Gehalt (z. B. relative Massenverteilung der in Elektronikschrott enthaltenen Materialien). Die Angaben aus Ökobilanzen beziehen sich auf spezifische Anwendungsfälle. Daher eignen sie sich nur begrenzt für Hochrechnungen und nationale bzw. globale Abschätzungen (Köhler *et al.*, 2018).

Ergänzend zu Ökobilanzen lassen sich auch sektorspezifische „Top-down“-Abschätzungen des Materialbedarfs heranziehen. Sie zeigen, dass der IKT-, Unterhaltungs- und Mediensektor im Jahr 2015 etwa 0,5 % des weltweiten jährlichen Verbrauchs an relevanten Materialien (z. B. Eisen, Stahl, Kunststoffe, Karton, Glas, Keramik, Aluminium, Kupfer) ausmacht (Malmodin *et al.*, 2018). Bei einigen besonderen Rohstoffen (Indium, Gallium und Germanium) war der Digitalisierungssektor sogar für 80 bis 90 % am globalen Gesamtverbrauch verantwortlich (Malmodin *et al.*, 2018). Eine umfassende Abschätzung des Materialbestands von Rechenzentren in Deutschland ergab für das Jahr 2008, dass dort ca. 12.000 t Elektronik, 17.000 t Kupfer, 7.000 t Aluminium, 11.000 t Kunststoffe und 58.000 t Metalle gebunden waren. Zu beachten ist, dass dies die virtuellen Ressourcenbedarfe (siehe oben und Abbildung 2) nicht berücksichtigt (Hintemann & Fichter, 2010; Malmodin *et al.*, 2018). Daher sind die Untersuchung und Quantifizierung von virtuellen Ressourcenbedarfen der Digitalisierung ein zentrales Ziel des Forschungsvorhabens.

Neben den erwähnten Rohstoffen hat die Digitalisierung bzw. die IKT-Produktion auch wesentlichen Einfluss auf die Ressourcen Wasser und Land. Haupttreiber für den Wasserbedarf und das anfallende Abwasser sind der Abbau von Rohstoffen sowie die Herstellung von Halbleitern (Liu *et al.*, 2019). Doch die Messung des Wasserbedarfs und der Landnutzung ist methodisch schwierig und mit Unsicherheiten behaftet. Deshalb gibt es kaum verlässliche und repräsentative Daten zur Land- und Wassernutzung im Zusammenhang mit der Digitalisierung (Liu *et al.*, 2019). Dieses Vorhaben wird dazu systematisch Zahlen erarbeiten (vgl. Kapitel 3).

Zwar werden die digitalen Technologien und deren direkte Energie- und Materialbedarfe kontinuierlich effizienter (z. B. durch Miniaturisierung von Digitalgeräten oder effizientere Mobilfunknetze). Doch diese Effizienzgewinne werden von überlagerten Entwicklungen kompensiert bzw. z. T. überkompensiert (Hilty & Aebischer, 2015; Hintemann, 2018; Köhler *et al.*, 2018; Itten *et al.*, 2020), in Einzelfällen sogar überkompensiert. Zu diesen Entwicklungen gehören u. a. höhere Rechenleistung, zunehmende Speicherkapazitäten und exponentiell steigende Datenübertragungsmengen (Global e-Sustainability Initiative, 2012). Diese Entwicklungen lassen sich nur im Kontext weiterer indirekter Effekte der Digitalisierung (z. B.

Substitution von analogen Artefakten) ganzheitlich beurteilen. Jedenfalls verursacht die fortschreitende digitale Zusatzausstattung von bisher analogen Objekten – häufig mit dem Zusatz „Smart“ (z. B. Smart-Home) versehen – zunächst einen zusätzlichen Ressourcenbedarf und damit einhergehende Treibhausgasemissionen, ungeachtet nachgelagerter Einsparpotenziale durch die Anwendung (Köhler *et al.*, 2018; Bitkom, 2020). Daher kann nur eine fundierte und sektorübergreifende quantitative Hochrechnung aufzeigen, ob der zukünftige absolute Bedarf an IKT zu einer kritischen Rohstoffanspruchnahme führt (Malmodin *et al.*, 2018).

### **Wissenschaftliche Erkenntnisse zu indirekten Umweltwirkungen der Digitalisierung**

Zu den indirekten Umweltwirkungen der Digitalisierung gehören veränderte Produktions- und Konsummuster. Diese beeinflussen neben dem IKT-Sektor vor allem jene Sektoren, in denen digitale Lösungen zum Einsatz kommen. Ein prominentes Beispiel hierfür ist der Trend hin zu cloudbasierten Dienstleistungen statt dezentraler Rechenkapazitäten (Thomond, 2013). Das zentralisierte *Cloud-Computing* hat meist niedrigere spezifische Ressourcen- und Energiebedarfe als konventionelle Lösungen (wie z. B. der Betrieb eigener kleiner Rechenzentren am jeweiligen Standort) (Global e-Sustainability Initiative, 2012; Itten *et al.*, 2020).

Grundsätzlich können die indirekten Umwelteffekte positiv oder negativ ausfallen. Die direkten Effekte der Digitalisierung hingegen sind stets negativ, also mit einem Bedarf an Ressourcen oder mit Emissionen in die Umwelt verbunden. Wenn digitale Technologien ganzheitlich beurteilt werden sollen, sind daher anwendungsfallspezifische Erhebungen notwendig, die direkte und indirekte Effekte gleichermaßen berücksichtigen und quantifizieren. Bisher kommen viele derartige wissenschaftliche Arbeiten vordergründig zu dem Schluss, dass die positiven indirekten Effekte der Digitalisierung (z. B. Ressourceneinsparungen oder vermiedene Emissionen) die negativen direkten Umweltwirkungen übersteigen (Bieser & Hilty, 2018). Bezogen auf Treibhausgasemissionen etwa lautet eine Annahme: Das Reduktionspotenzial von digitalen Technologien in unterschiedlichsten Sektoren ist siebenmal höher als die direkten Emissionen durch IKT selbst (Global e-Sustainability Initiative, 2012). Insgesamt sind die Erkenntnisse zum Klimaschutzpotenzial durch IKT jedoch uneinheitlich (Liu *et al.*, 2019). Unklar bleibt außerdem, wie sich systemische und langfristige Prozesse, die auf den Einsatz digitaler Technologien zurückzuführen sind, in der Gesamtbilanz niederschlagen (Liu *et al.*, 2019; Itten *et al.*, 2020; Neumann, 2020). In diesem Zusammenhang häufig angeführte Langzeitprozesse werden als Rebound-Effekte der Digitalisierung zusammengefasst. Prominente Beispiele hierfür sind Veränderungen des Kaufverhaltens durch Onlinehandel oder gesteigerter Konsum als Folge von finanziellen Einsparungen. Diese ökonomischen Rebound-Effekte verursachen in den bisher analysierten Fällen meist eine zusätzliche Umweltbelastung (Rivera *et al.*, 2014).

Die jeweilige Erhebungsmethode beeinflusst die geschätzten indirekten Umweltwirkungen deutlich (Bieser & Hilty, 2018; Liu *et al.*, 2019). So kommt eine Studie, die auf einem statischen Kalkulationsmodell basiert, zu folgendem Schluss: IKT-Anwendungen könnten im Jahr 2030 bis zu 20 % der globalen Treibhausgasemissionen vermeiden, wobei der direkte IKT-bedingte Fußabdruck nur 2 % der globalen Emissionen entspricht (Global e-Sustainability Initiative, 2015). Laut einer dynamischen sozio-ökonomischen Modellierung hingegen steht zu erwarten, dass sich die negativen und positiven Auswirkungen der Digitalisierung über verschiedenste Anwendungsbereiche hinweg letztlich ausgleichen (Hilty *et al.*, 2006). Systemdynamische qualitative Ursache-Wirkungs-Modelle legen zudem nahe, dass die Ressourceninanspruchnahme sowie der Energiebedarf durch IKT keine identifizierbaren Abhängigkeiten oder korrelierende Entwicklungspfade (z. B. Wirtschaftswachstum) aufweisen. Vielmehr hängen sie maßgeblich von der politischen Gestaltung der Rahmenbedingungen, den etablierten Marktkräften sowie der soziokulturellen Gesellschaftsentwicklung ab (Neumann, 2020). Für eine Bewertung der

indirekten bzw. systemischen Effekte der Digitalisierung ist die Frage zu klären, wie die Digitalisierung wirtschaftliche Prozesse, soziale Aspekte und Lebensstile sowie die Wechselwirkungen zwischen diesen verändert (vgl. Kapitel 3.3 und 3.4). Nicht zuletzt diese Forderung macht die Analyse von indirekten Umweltwirkungen komplex und anspruchsvoll (Liu *et al.*, 2019).

Mit Blick auf die indirekten Umweltwirkungen der Digitalisierung fällt insgesamt auf, dass der Beitrag der Digitalisierung zur Vermeidung von Treibhausgasen vielfach diskutiert und bewertet wird (Global e-Sustainability Initiative, 2012, Thomond 2013). Ein Konsens zu den indirekten Effekten der Digitalisierung lässt sich bisher – abgesehen von einzelnen Anwendungsfällen – nicht ausmachen (Köhler *et al.*, 2018). Die am häufigsten untersuchten Anwendungsbereiche sind virtuelle Mobilität (z. B. Telearbeit), virtuelle Güter (z. B. digitale Medien) und intelligenter Transport (z. B. Routenoptimierung) (Bieser & Hilty, 2018). Diese Anwendungen lassen sich grundsätzlich in zwei Bereiche untergliedern: zum einen Dematerialisierung und Substitution (z. B. E-Books, Videostreaming), zum anderen Optimierung und Innovation (z. B. autonomes Fahren, smarte Textilien und Wearables) (Liu *et al.*, 2019). Das Forschungsvorhaben hat einige konkrete Anwendungsfälle untersucht (vgl. Kapitel 4).

### **Zusammenfassung und Einordnung des wissenschaftlichen Stands**

Insgesamt ist festzuhalten, dass sich die wissenschaftlichen Arbeiten und der öffentliche Diskurs zur Digitalisierung größtenteils auf Treibhausgase und damit die Klimawirkung konzentrieren (Manhart *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2019). Beachtenswert ist dabei, dass die direkten Treibhausgasemissionen der IKT seit 2007 global kontinuierlich ansteigen (Belkhir & Elmeligi, 2018). Steht jedoch die Ressourcenintensität im Mittelpunkt, geht es meist um den Bedarf an Energie oder potenziell kritischen Rohstoffen (Köhler *et al.*, 2018). Allerdings lässt sich die Ressourcennutzung in einen unmittelbaren Bezug zu den gemeldeten Treibhausgasen setzen: Es besteht ein direkter kausaler Zusammenhang zwischen Treibhausgasemissionen und anderen Umweltwirkungen (z. B. Feinstaubemissionen) einerseits und den benötigten Ressourcen für IKT andererseits (Cabernard, 2019). Gemäß einer Analyse des Typs „Multi-Regional Input-Output“ (MRIO) verteilt sich nach Cabernard (2019) die direkte Relevanz für die globalen IKT-bedingten Treibhausgasemissionen im Referenzjahr 2015 wie folgt: Eisen und Stahl (24 %), Kunststoffe (23 %), Chemikalien (13 %), Aluminium (6 %), Keramik (4 %), Petroleum (4 %), Glas (4 %), Papier (3 %) und andere Materialien (19 %). Ein offensichtlicher Anknüpfungspunkt, mit dem sich die Ressourcenintensität der Digitalisierung genauer erschließen lässt, ist die weitere Aufschlüsselung der „anderen Materialien“. Besonders wichtig sind dabei Technologiemetalle (z. B. Indium, Gallium oder seltene Erden): Trotz ihrer geringen Masse verursachen sie schwerwiegende Umweltwirkungen (Kristof & Henricke, 2010; Liu *et al.*, 2019; Zimmermann *et al.*, 2020). Auch die globale Verteilung der Treibhausgasemissionen, die bei Entnahme und Verarbeitung der Ressourcen entstehen, ist interessant: Die absolute Mehrheit aller Treibhausgase wird in der Produktionsregion China (61 %) erzeugt, gefolgt von den Regionen Asien-Pazifik exkl. China (19 %), Mittlerer Osten (5 %), USA (4 %), Amerika exkl. USA (4 %), Europa (4 %) und Afrika (3 %) (Cabernard, 2019). Doch nicht nur Menge und geografische Verteilung der Ressourcenbedarfe sind wichtig. Auch die Art der Rohstoffe spielt eine entscheidende Rolle für die Beurteilung der Ressourcenintensität und Nachhaltigkeit der Digitalisierung (WBGU, 2019).

Eine ganzheitliche Abschätzung des globalen Ressourcenbedarfs der Digitalisierung ist bisher nicht möglich. Grund sind die lediglich punktuellen Daten auf Mikroebene und die unzureichenden Informationen und Prognosen zum Absatz von IKT-Produkten (Köhler *et al.*, 2018). Zudem haben die vorhandenen Studien unterschiedliche Systemgrenzen, sodass sie nur eingeschränkt vergleichbar sind (Bitkom, 2020). Sie beruhen vielfach auf vereinfachenden



Annahmen: Die Kritikalität von Rohstoffen wird kaum berücksichtigt und es wird oftmals davon ausgegangen, dass in Zukunft ausreichende Mengen an Rohstoffen für die benötigte Hardware bereitstehen werden (Bieser *et al.*, 2020). Gesicherte Prognosen zum Rohstoffbedarf der Digitalisierung werden zudem durch die hoch dynamischen Entwicklungen erschwert (WBGU, 2019). Daher sind systematische Erhebungen zur globalen Ressourcenintensität der Digitalisierung bisher rar (Köhler *et al.*, 2018). Die Abschätzungen erfolgen meist rückblickend (retrospektiv), was vornehmlich an den angewandten Methoden sowie der Datenverfügbarkeit liegt. Prospektive Studien wiederum lassen Ressourcenaspekte zumeist außer Acht (Köhler *et al.*, 2018). Letztlich besteht großer Bedarf an wissenschaftlich fundierten Erhebungen, die zu einer besseren Transparenz und Datenverfügbarkeit im Hinblick auf die Ressourcenintensität der Digitalisierung beitragen (Köhler *et al.* 2018). Ein weiterer Aspekt, der in zukünftige Studien Eingang finden sollte, sind die Eigenschaften von Software. Obwohl es sich bei Softwareprodukten um immaterielle Güter handelt, kann ihre Nutzung erhebliche Material- und Energieströme hervorrufen. Die Eigenschaften von Software bestimmen darüber, welche Hardwarekapazitäten und wie viel elektrische Energie für Endgeräte, Netzwerke und Rechenzentren nötig sind (Hilty *et al.*, 2015). Der Zusammenhang zwischen Softwareeigenschaften einerseits und Ressourcenbedarf bei Herstellung und Betrieb von IKT-Systemen andererseits ist bisher wissenschaftlich wenig untersucht (Hilty *et al.*, 2015).

#### **Auswahl jüngerer Forschungsaktivitäten und Schnittstellen zum Vorhaben<sup>11</sup>**

Wie aus den vorhergehenden Abschnitten ersichtlich, lässt die wissenschaftliche Fachliteratur einige kritische Fragen offen. Sie gilt es zu beantworten, damit sich die Ressourcenintensität des digitalen Wandels quantifizieren und prognostizieren lässt. Mit dem Ziel, bestimmte Aspekte dieser Fragen zu beantworten, wurden unlängst einige Forschungsprojekte aufgelegt. Sie haben demzufolge einen direkten Bezug zum Forschungsvorhaben.

Zum Beispiel untersucht das Projekt **UTAMO** („Umweltbezogene Technikfolgenabschätzung von Mobilfunknetzen und Endgeräten“)<sup>12</sup> im Auftrag des UBA den Energiebedarf von Mobilfunknetzen und deren umweltbezogene Auswirkungen bis 2030. UTAMO wurde vom Fraunhofer-Institut für Zuverlässigkeit und Mikrointegration IZM durchgeführt. Mit seinen für Ergebnisse für 2021 konnte es – etwa anhand einer Fallstudie – Datenlücken schließen, die für DigitalRessourcen relevant sind, oder die Szenarienbildung und Simulationsrechnungen unterstützen. Darüber hinaus konnten die Ergebnisse von UTAMO zukünftige Entwicklungspfade im Mobilfunksektor skizzieren, mit denen sich die Ressourcenintensität des digitalen Wandels vorhersagen und Handlungsfelder identifizieren lassen.

Auch die Ergebnisse des Projekts **Green Cloud-Computing** „Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloudcomputing“ (Gröger *et al.*, 2021) können die Datenlage verbessern. Schwerpunkt ist das zunehmende Cloud-Computing. *Green Cloud-Computing* wurde zwischen 2017 und 2020 vom Öko-Institut im Auftrag des Umweltbundesamtes durchgeführt und beantwortet Fragen wie „Wie wirkt sich die Verlagerung von Diensten aus dezentralen Rechenzentren in eine Cloud auf die Ressourceninanspruchnahme aus?“. Hierzu berechnen die Projektpartner beispielhaft die Umweltwirkungen des Cloud-Computing. Politische Handlungsempfehlungen, die im Projekt identifiziert wurden, werden in Kapitel 7 dargestellt. Im November 2020 startete das Öko-Institut das Projekt **“Greening Cloud Computing and Electronic Communications Services and Networks: Towards Climate**

<sup>11</sup> Aufgrund der hohen Aktualität der Thematik sowie der laufenden Forschungsarbeiten in DigitalRessourcen kann diese Zusammenstellung an jüngst abgeschlossenen oder kürzlich gestarteten Projekten keinen Anspruch auf Vollständigkeit erheben, sondern lediglich einen Auszug des aktuellen Stands der Recherche darstellen.

<sup>12</sup> [https://www.izm.fraunhofer.de/de/abteilungen/environmental\\_reliabilityengineering/projekte/utamo.html](https://www.izm.fraunhofer.de/de/abteilungen/environmental_reliabilityengineering/projekte/utamo.html) (Stand: 12. Oktober 2023).

**Neutrality by 2050**“ (Bilsen *et al.*, 2022). Das Projekt knüpft thematisch an das Projekt *Green Cloud-Computing* an. Es soll Maßnahmen für mehr Energieeffizienz und eine stärkere Kreislaufführung in Rechenzentren und elektronischen Kommunikationsnetzwerken untersuchen. Dazu sollen Messmethoden und Indikatoren identifiziert werden, mit denen sich Energieeffizienz und Treibhausgasemissionen von Rechenzentren und elektronischen Kommunikationsnetzwerken bestimmen lassen. Das Projekt kann somit Inhalte bereitstellen, die für die Fallstudien, das Simulationsmodell sowie die Formulierung von Handlungsoptionen zur nachhaltigen Gestaltung der Digitalisierung nützlich sind.

An dieser Stelle zu nennen ist auch das Projekt **CO:DINA** „Transformationsroadmap Digitalisierung und Nachhaltigkeit“ (Ramesohl *et al.*, 2023). Es wird im Zeitraum Mai 2020 bis April 2023 vom Wuppertal Institut in Zusammenarbeit mit dem Institut für Zukunftsstudien und Technologieberatung GmbH (IZT) und in Kooperation mit dem UBA durchgeführt. Das Projekt zielt darauf ab, Wechselwirkungen zwischen Technologie, Gesellschaft und Umwelt zu identifizieren. Letztlich soll es Handlungsempfehlungen für eine nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung geben. Außerdem soll ein Austausch zwischen Politik, Wirtschaft, Wissenschaft und Gesellschaft gefördert werden. CO:DINA verfolgt dabei die Forschungslinien „Digitalisierung und Wachstums(un)abhängigkeit“, „Digitale Souveränität und Nachhaltigkeit“, „Digital-ökologische Staatskunst“, „Systemdesign nachhaltiger Digitalisierung“ und „Transparente Wertschöpfungsketten“ unter der Leitung verschiedener Fachleute im Projekt. Bisher wurden zwei Positionspapiere veröffentlicht, die sich mit der sozial-ökologischen Gestaltung der Digitalisierung befassen und eine erste Einordnung der Thematik ins aktuelle soziale und politische Geschehen vornehmen. Des Weiteren ist der Austausch mit Experten\*Expertinnen aus den Bereichen Politik, Wissenschaft und Wirtschaft geplant. Somit ist CO:DINA im Kontext des Forschungsvorhabens insbesondere für die Formulierung von Gestaltungsfeldern sowie für Handlungs- und Politikempfehlungen relevant.

Hier anzuführen sind auch die Arbeiten und Projekte der gemeinnützigen Organisation „*The Shift Project*“ (The Shift Project, 2019). Eine ihrer Arbeitsgruppen beschäftigt sich beispielsweise mit einem Modell zur Berechnung des ökologischen Fußabdrucks von digitalen Datenströmen. Darauf basierend wurde die Browsererweiterung „CARBONALYSER“ (The Shift Project, 2019) entwickelt. Mit dieser Anwendung können Nutzende den Energiebedarf und die CO<sub>2</sub>-Emissionen berechnen, die durch Datenströme bei der Browsernutzung entstehen.

Das Projekt **Analyse und Bewertung von Politikmaßnahmen und ökonomischen Instrumenten des Ressourcenschutzes für die Weiterentwicklung von ProgReSS** eignet sich zur Identifizierung von Handlungsfeldern für einen ressourcenschonenden digitalen Wandel. Das Projekt wurde von 2017 bis 2019 von der Freien Universität Berlin, dem Fraunhofer-Institut für System- und Innovationsforschung und dem Forum Ökologisch-Soziale Marktwirtschaft im Auftrag des UBA durchgeführt. Es benennt im Bericht „Handlungsfelder zur Steigerung der Ressourceneffizienz“ Handlungsfelder, die Potenziale für mehr Ressourceneffizienz bieten. Dazu gehört insbesondere ein Handlungsfeld mit konkreten Maßnahmen für eine längere Nutzungsdauer von IKT-Geräten (Umweltbundesamt, 2021). Der Abschlussbericht mit dem Titel „Optionen für ökonomische Instrumente des Ressourcenschutzes“ beschreibt Handlungsoptionen und politische Instrumente für sämtliche Ressourcen der Handlungsfelder (Ostertag *et al.*, 2021b). Eine Kurzdarstellung findet sich im *Policy Paper* „Optionen für ökonomische Politikinstrumente zur Steigerung der Ressourceneffizienz“ (Ostertag *et al.*, 2021b).

Über diese Zusammenstellung hinaus gibt es eine Vielzahl an Projekten in weiter gefassten angrenzenden Themenbereichen. Das sind Projekte, deren Ergebnisse zumindest in Teilen potenzielle Schnittmengen zum Forschungsvorhaben aufweisen, wie zum Beispiel Daten für die

Fallstudien, makroökonomischen Berechnungen und Simulationen oder Informationen zu Handlungsfeldern und -optionen. Diese Projekte befassen sich etwa mit technischen Lösungen für die Energiewende (wie z. B. die vier Kopernikus-Projekte<sup>13</sup> des BMBF) und mit der Verbesserung der Energieeffizienz von digitaler Technologie (z. B. diverse Projekte unter den Förderinitiativen „Kompakte und robuste Leistungselektronik der nächsten Generation“, „Zuverlässige, intelligente und effiziente Elektronik für die Elektromobilität“ und der Förderrichtlinie „*Digital GreenTech – Umwelttechnik trifft Digitalisierung*“ (BMBF, 2023a) des BMBF). Des Weiteren gibt es Forschungsvorhaben zu internationalen Partnerschaften für nachhaltige Innovationen (z. B. Projekte unter der Fördermaßnahme CLIENT II<sup>14</sup> des BMBF), soziotechnischen Transformationen (z. B. das H2020-Projekt „*Governance of Sociotechnical Transformations*“ (GoST) (Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ, 2022)) und der sozial-ökonomischen Sicht auf Rebound-Effekte (z. B. Projekte der Fördermaßnahme „Rebound-Effekte aus sozial- ökologischer Perspektive“ (BMBF, 2022c) und der Fördermaßnahme „Nachwuchsgruppen in der Sozial-ökologischen Forschung“ (BMBF, 2015) des BMBF). Weitere Forschungsaktivitäten beschäftigen sich mit innovativen Technologien für Ressourceneffizienz (z. B. Projekte unter den Fördermaßnahmen „r4 – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe“ (BMBF, 2022a) und „r+Impuls – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Impulse für industrielle Ressourceneffizienz“<sup>15</sup> des BMBF), der Optimierung von Produktionsprozessen und Verringerung des Energieverbrauchs in der Produktion (z. B. das H2020-Projekt E2COMATION (Europäische Kommission, 2020a) sowie Kreislaufwirtschaft im Elektronik- und Elektroproduktsektor (z. B. das H2020-Projekt CIRC4Life (Europäische Kommission, 2018))).

### 2.3.3 Fazit politischer und wissenschaftlicher Diskussionsstand

Generell zeigt die Analyse des politischen und wissenschaftlichen Diskussionsstands, dass das breite Themenfeld Digitalisierung und Ressourceneffizienz bzw. Nachhaltigkeit Gegenstand zahlreicher Instrumente, Maßnahmen und Studien ist. Bei genauerem Hinsehen fällt aber auf, dass der Aspekt der Ressourcenschonung und des Klimaschutzes durch Digitalisierung überwiegt. Ein Grund dafür ist, dass der anfängliche Ressourcenbedarf digitaler Technologien (vgl. direkte Auswirkungen in Abbildung 1 zuvor) im Vergleich zum Einsparpotenzial (vgl. befähigende Auswirkungen) oftmals als geringfügig oder vernachlässigbar gilt. Außerdem sind viele der direkten Umweltwirkungen der Digitalisierung für die Anwender\*innen nicht sichtbar (z. B. Energiebedarf in Datenzentren für die Nutzung von Cloud-Diensten). Und schließlich fehlt ein umfassendes Systemwissen darüber, wie sich unterschiedlichste Anwendungsfelder und Bereiche der Digitalisierung auf die absolute Ressourcenintensität (siehe Veranschaulichung in Abbildung 3) – also auf die aggregierten Bedarfe an Ressourcen – auswirken. Dass nur wenige Instrumente und wissenschaftliche Arbeiten diesen Aspekt untersuchen, unterstreicht die Relevanz des Forschungsvorhabens.

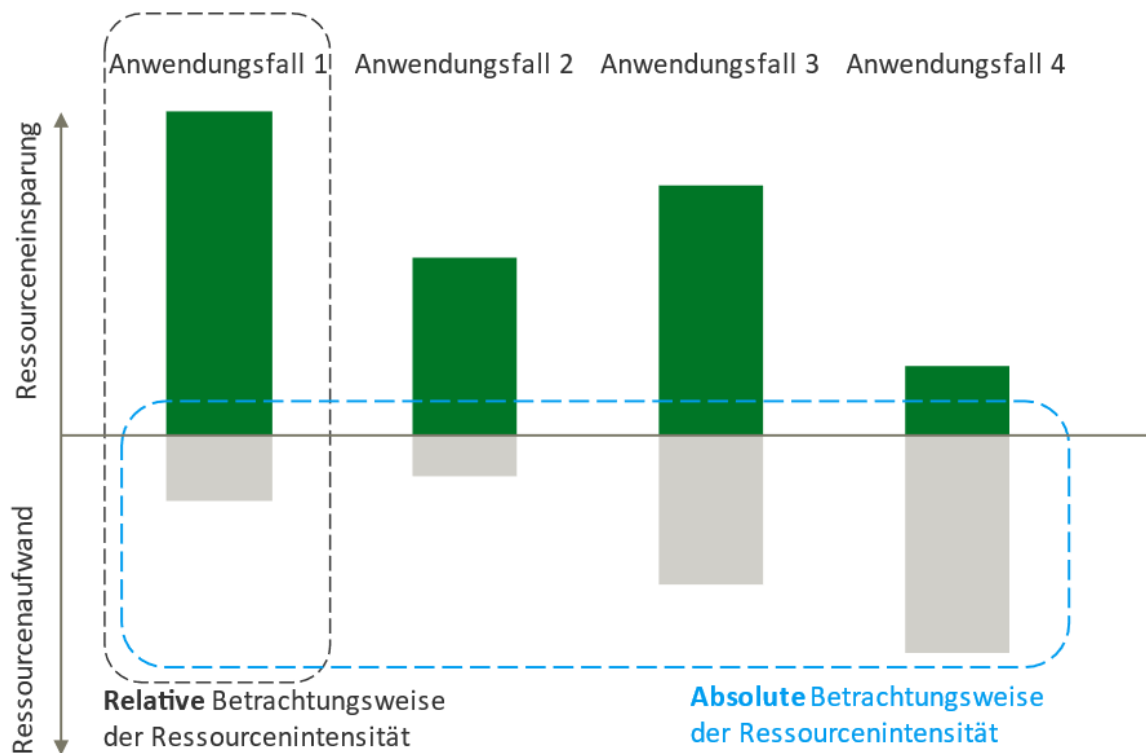
---

<sup>13</sup> [https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/energiewende/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende\\_node.html](https://www.bmbf.de/bmbf/de/forschung/energiewende-und-nachhaltiges-wirtschaften/energiewende/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende/kopernikus-projekte-fuer-die-energiewende_node.html) (Stand: 12. Oktober 2023).

<sup>14</sup> <https://bmbf-client.de/impressum> (Stand: 12. Oktober 2023).

<sup>15</sup> <https://r-plus-impuls.de/rplus-de/?VB=4> (Stand: 15. Dezember 2022).

**Abbildung 3: Illustrative Darstellung unterschiedlicher Perspektiven auf die Ressourcenintensität der Digitalisierung**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Insbesondere fehlt es an quantitativen Informationen zu den unterschiedlichen Teilsystemen der Digitalisierung und deren Einfluss auf die Ressourcennutzung. Folglich gibt es auch noch kaum Umsetzungsmaßnahmen in Wirtschaft und Forschung, welche die (absolute) Ressourcenintensität der eigentlichen digitalen Technologien und Infrastrukturen reduzieren. Wie bereits erwähnt liegt der Fokus zumeist auf den Ressourceneinsparpotenzialen durch den fallspezifischen Einsatz digitaler Technologien (z. B. Analysen von Ressourceneffizienzpotenzialen in der Industrie<sup>16</sup>). Die Identifikation und ggf. Weiternutzung von Daten und Informationen aus einschlägigen Analysen zur Ressourceneffizienz im Zusammenhang mit digitalen Technologien ist Bestandteil der Bestandsaufnahme auf Mikroebene (siehe Kapitel 2.4.1) sowie der Fallstudien (siehe Kapitel 4).

Vorrangig wurden politische Strategien und einige Standardisierungsaktivitäten identifiziert, deren Ergebnisse in der weiteren Bearbeitung berücksichtigt werden. Sie dienen insbesondere als Grundlage für die Identifikation und Beschreibung der Gestaltungsfelder sowie für die Erarbeitung der politischen Empfehlungen. Außerdem wirkt sich der politische Rahmen inklusive der daraus resultierenden Gesetze und Standards auf die Zukunftsszenarien aus.

Dennoch gibt es eine Vielzahl an derzeit anlaufenden Aktivitäten, die sich mit der Ressourcenintensität der Digitalisierung bzw. einer umweltgerechten Digitalisierung befassen. Beispielhaft zu nennen sind hier neben den oben beschriebenen Positions- und Strategiepapieren Veranstaltungen wie der Workshop „Digitalisierung zur Steigerung von Ressourceneffizienz“. Er wurde gemeinsam vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie

<sup>16</sup> Die Ressourceneffizienzpotenziale durch Industrie 4.0 werden u. a. vom VDI Zentrum Ressourceneffizienz untersucht. Vgl. [https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie\\_Ressourceneffizienz\\_durch\\_Industrie\\_4.0.pdf](https://www.ressource-deutschland.de/fileadmin/Redaktion/Bilder/Newsroom/Studie_Ressourceneffizienz_durch_Industrie_4.0.pdf) (Stand: 22.012022).

(BMWi), vom Bundesverband der Deutschen Industrie e. V. (BDI) und vom Institut der deutschen Wirtschaft (IW) organisiert (28. Januar 2021). Zwar lag auch hier der Fokus auf Ressourceneinsparungen durch die Digitalisierung, aber insbesondere bei den Diskussionen klang auch die Ressourcenintensität der Digitalisierung an. Arbeitsgruppen an Forschungsinstituten oder Universitäten, die sich mit der Schnittstelle von Ressourcennutzung und Digitalisierung beschäftigen, liefern weitere Impulse für das Forschungsvorhaben. Das Projektteam steht mit den Forschenden im Austausch (z. B. WU Wien).

## 2.4 Recherche zu quantitativen Vorarbeiten

Wie bereits in Kapitel 2.3.2 dargelegt, haben sich einige wissenschaftliche Arbeiten explizit mit dem Thema „Ressourcennutzung und Digitalisierung“ beschäftigt. Nach der allgemeinen Darstellung des wissenschaftlichen Stands zu diesem Thema sollen an dieser Stelle die wesentlichen Vorarbeiten für die nachfolgenden Kapitel erschlossen und diskutiert werden.

### 2.4.1 Mikroebene

Insgesamt soll das Vorhaben den aktuellen Forschungsstand umfassend und zielgerichtet erfassen und diskutieren. Hierbei gilt es zu bedenken, dass viele der wissenschaftlich abgesicherten Erkenntnisse (vgl. Erläuterungen in Kapitel 2.3.2) auf quantitativen Erhebungen (insbesondere Lebenszyklusanalysen/Ökobilanzen, Inventarisierungen, Produktbilanzen etc.) beruhen. Somit bildet die weiterführende Recherche zu quantitativen Studien auf Mikroebene eine wichtige Vorarbeit für die nachfolgenden Kapitel.

Die Ergebnisse und Schlussfolgerungen dieser Studien werden im Rahmen der folgenden Bestandsaufnahme nicht näher erläutert, sondern bei Bedarf – d. h. bei Verwendung – in den nachfolgenden Kapiteln aufgegriffen. Vielmehr geht es hier um valide Aussagen zur Verfügbarkeit von Daten zu bestimmten Produkten und Elementen der Digitalisierung mit dem Ziel, die Fallstudien auswählen und Daten vergleichen zu können. Darüber hinaus liefert die systematische Auswertung der verfügbaren quantitativen Ergebnisse wichtige Eckpunkte für die Diskussion und Ableitung von System- und Betrachtungsgrenzen im Forschungsvorhaben.

Mit dem Ziel, den Forschungsstand umfassend zu erfassen und zu systematisieren, wurde eine fokussierte Literaturrecherche durchgeführt. Sie berücksichtigt sowohl nationale als auch internationale Publikationen verschiedener wissenschaftlicher Disziplinen<sup>17</sup>. Die Literaturrecherche ergab insgesamt ein breites, heterogenes Spektrum an Daten und Informationsquellen. Dazu gehören neben Berichten von Bundesbehörden auch Studien der EU-Kommission sowie von wissenschaftlichen Instituten, Datenbankeinträge, Daten von privaten Interessengruppen, Konferenzbeiträge, im Peer-Review geprüfte Zeitschriftenartikel sowie graue Literatur. Als ergänzende Suchbegriffe kamen einschlägige Schlagwörter sowie deren Kombinationen mit entsprechenden Produkt- oder Systembezeichnungen (z. B. Rechenzentrum) zum Einsatz.

---

<sup>17</sup> Gesucht wurden diese bei: UFORDAT; Publikationssuche des Umweltbundesamtes; SpringerLink; Google (Scholar); Researchgate; einschlägigen LCA-Datenbanken (ProBas, GaBi, Ecoinvent); Online Public Access Catalogue (OPAC); internen Literaturdatenbanken sowie Querverweisen in identifizierten Quellen.

Weitere Suchfilter waren:

- ▶ Veröffentlichungsjahr (bzw. letzte Aktualisierung bei Datenbanken: 2010 oder neuer).
- ▶ Geografischer Bezug: global.
- ▶ Daten- und Informationsquellen: wissenschaftliche Publikationen, öffentlich zugängliche Forschungsergebnisse und Berichte sowie Konferenzbeiträge, Ökobilanzdatenbanken, Herstellerinformationen und produktspezifische Daten.

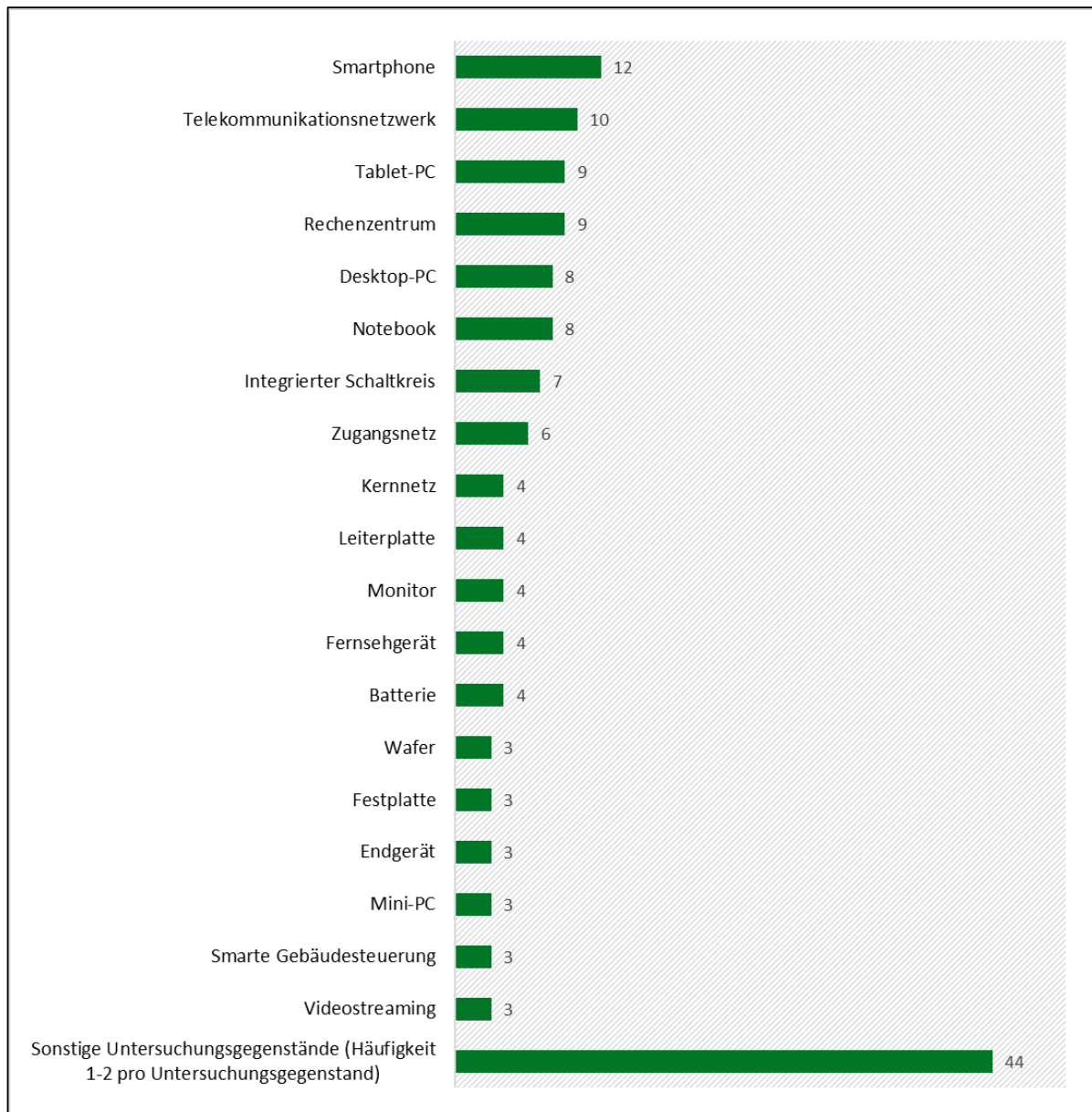
Die identifizierten Quellen wurden anschließend tabellarisch für die weiterführende Auswertung aufbereitet. Im Rahmen der beschriebenen Recherche wurden 89 Daten- und Informationsquellen analysiert. Hiervon wurden **44 Daten- und Informationsquellen als inhaltlich relevant** eingestuft. Für diese Einstufung musste die jeweilige Quelle eine Neugewinnung bzw. gezielte Aufbereitung von quantitativen Ergebnissen aufweisen. Dies bedeutet konkret, dass die jeweilige Quelle methodisch keine reine Literaturanalyse sein durfte, sondern mindestens bestehende Ergebnisse und Daten ergänzt, neu interpretiert oder abgeändert hat. In den meisten Fällen handelte es sich um methodische Ansätze aus dem Bereich der Ökobilanzierung (d. h. komplette Ökobilanzen oder Sachbilanzen). Nachfolgend werden zentrale Auswertungsergebnisse der als relevant eingestuften Quellen präsentiert und kurz diskutiert. Hierbei wird zwischen für das Forschungsvorhaben inhaltlich relevanten Auswertungsergebnissen sowie zusätzlichen Metainformationen unterschieden. Aufgrund der Vielzahl und Heterogenität der Quellen erfolgen an dieser Stelle keine weiterführende Diskussion und Interpretation.

#### **Systeme und Elemente der Digitalisierung**

Abbildung 4 zeigt einen Überblick über die jeweils betrachteten Produkte, Systeme und Elemente im Zusammenhang mit dem digitalen Wandel. Je größer die Fläche, desto häufiger wird dieser Untersuchungsgegenstand in den Quellen adressiert und mit quantitativen Ergebnissen hinterlegt. Diese Übersicht dient insbesondere der gesicherten Auswahl von repräsentativen und mit Daten belegten Fallstudien (Kapitel 4).

Weiterhin gibt die Übersicht Aufschluss darüber, inwieweit die materielle Basis der Digitalisierung, also IKT-Produkte und Systeme, bereits in der Literatur behandelt ist. Eine Systematisierung der Digitalisierung bzw. die Ableitung von geeigneten Betrachtungsgrenzen kann sich daher ebenfalls an dieser Erhebung orientieren. Zuletzt lassen sich anhand der Auflistung von bisher erfolgten Untersuchungsgegenständen potenzielle Datenlücken mit Blick auf das ganzheitliche System „Digitalisierung“ aufdecken.

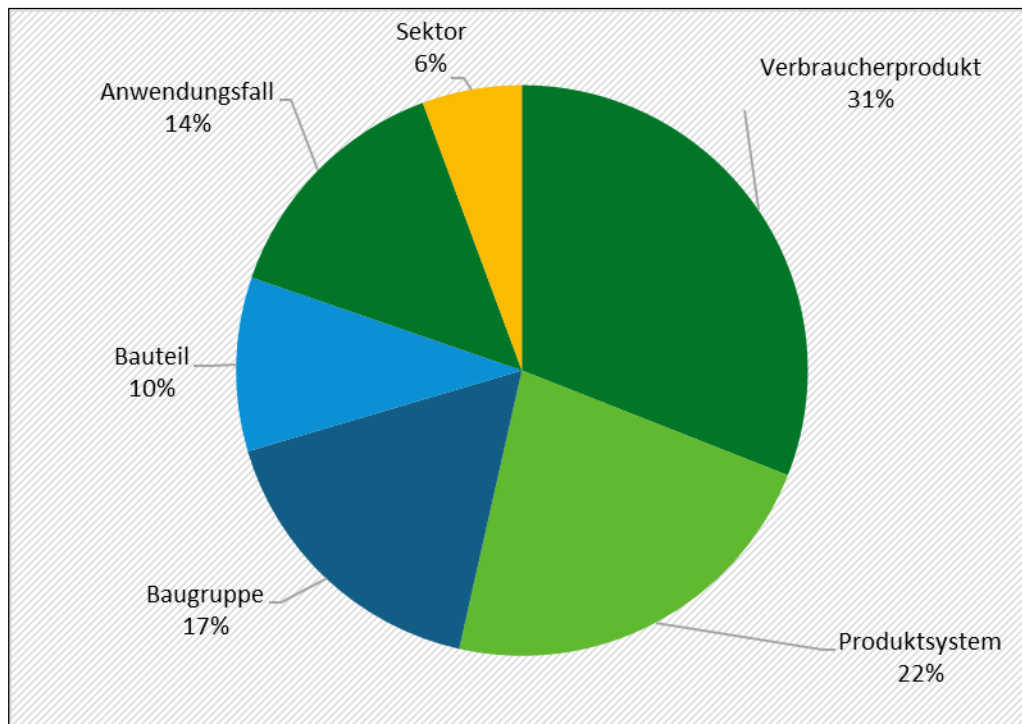
**Abbildung 4: Mengenmäßige Verteilung der Untersuchungsgegenstände**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die in Abbildung 4 aufgeführten Untersuchungsgegenstände wurden zudem klassifiziert. Die Klassifizierung gibt Aufschluss darüber, auf welcher Aggregationsebene die quantitativen Ergebnisse hauptsächlich vorliegen (siehe Abbildung 5). Diese Einordnung ist für die Bestimmung der System- und Betrachtungsgrenzen (Kapitel 2.4) essenziell. Damit lässt sich beispielsweise eine sinnhafte Aggregationsebene für die Fallstudien identifizieren. So können vielfach diskutierte Produkte, Anwendungsfälle, Technologien oder Sektoren in Bezug zueinander gebracht werden. Die Verteilung hängt stark von den Quellenarten ab. Meist kamen ökobilanzielle Methoden zum Einsatz. Ökobilanzstudien konzentrieren sich oft auf konsumentennahe Produkte (31 %) oder konkrete Anwendungsbereiche (14 %) (siehe Abbildung 5). Diese Beobachtung ist wichtig und vielversprechend für die folgenden Arbeiten: Laut der Wissenschaft trägt die Herstellung ebendieser Verbraucherprodukte stark zur Ressourcenintensität der Digitalisierung bei (vgl. Kapitel 2.3.2).

**Abbildung 5: Klassifizierung der Untersuchungsgegenstände**



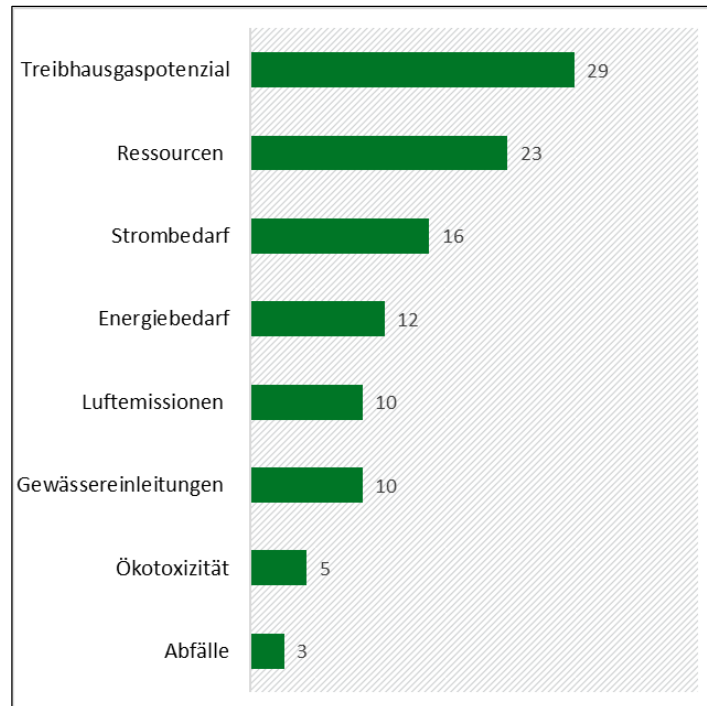
Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

**Indikatoren für die Analyse der Ressourcenintensität sowie weiterer Umweltwirkungen**

Abbildung 6 gibt Aufschluss über die am häufigsten untersuchten Umweltindikatoren. Hierbei wird nicht unterschieden, in welcher Granularität die jeweiligen Bereiche abgedeckt sind. Für die weitere Interpretation und spätere Selektion von Indikatoren für die Erhebungen auf Mikro- und Makroebene ist zu berücksichtigen, dass die hier genannten Indikatoren untrennbar miteinander verbunden sind. So hängen die Treibhausgaspotenziale kausal mit dem Bedarf an Rohstoffen und Energie zusammen. Sie stellen daher eine andere Perspektive auf die Ressourcenintensität dar, jedoch keinen alternativen Umweltindikator. Gleiches gilt auch für die anderen hier genannten Indikatoren bzw. Indikatorgruppen (z. B. Luftemissionen) (vgl. Erläuterungen zu Sachbilanzen im Kontext von Ökobilanzen in Kapitel 3.5.2). Schließlich bestätigt diese Auswertung die Erkenntnisse aus Kapitel 2, da das Treibhausgaspotenzial auch hier der dominierende Indikator in Bezug auf die Umweltwirkungen der Digitalisierung ist. Eine Erweiterung des wissenschaftlichen Diskurses um zusätzliche Ressourcenindikatoren erscheint daher wichtig.



**Abbildung 6: Häufigkeit untersuchter Indikatoren für die Analyse der Ressourcenintensität sowie weiterer Umweltwirkungen**

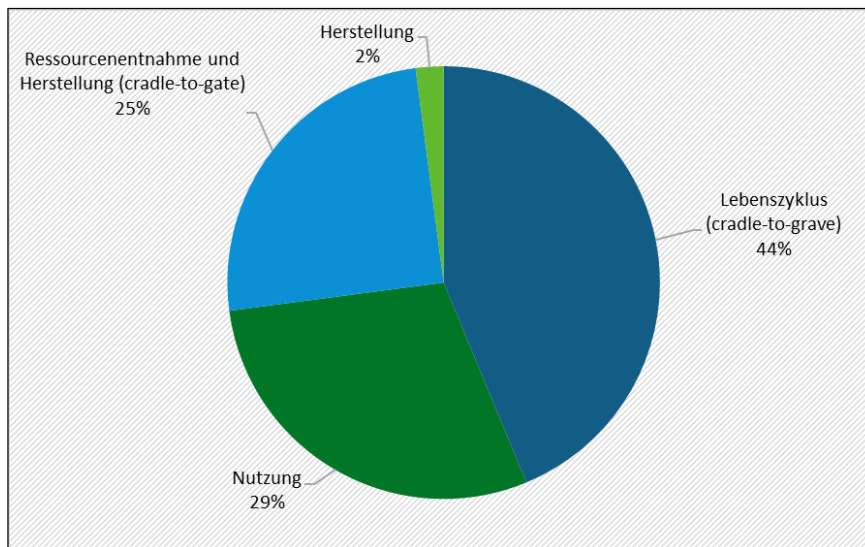


Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### Untersuchte Lebenszyklusphasen

Abbildung 7 zeigt, wie oft die quantitativen Erhebungen die verschiedenen Lebenszyklusphasen umfassen. Die oft angewandte Methodik der Ökobilanzierung bildet weitestgehend alle Lebenszyklusphasen der untersuchten Produkte oder Systeme ab. Daraus lässt sich in jedem Fall schließen, dass die aus Ressourcen- und Umweltsicht relevanten Lebenszyklusphasen ausreichend von den bisherigen Studien abgedeckt sind. Allerdings wird bei größeren und weniger gut abgrenzbaren Teilbereichen bzw. -systemen der Digitalisierung (z. B. Datenübertragungsnetzwerken) oft (bei 29 % aller relevanten Erhebungen) nur die Nutzungsphase betrachtet. Diese häufige Eingrenzung lässt sich inhaltlich und methodisch damit erklären, dass diese Lebenszyklusphase für die Umweltwirkungen von verhältnismäßig langlebigen Infrastrukturelementen ausschlaggebend ist. Dennoch wäre eine Inventarisierung des Materialbestands solcher Infrastrukturen im Rahmen einer Fallstudie eine wichtige Ergänzung zu den bestehenden Analysen.

**Abbildung 7: Häufigkeit der untersuchten Lebenszyklusphasen**

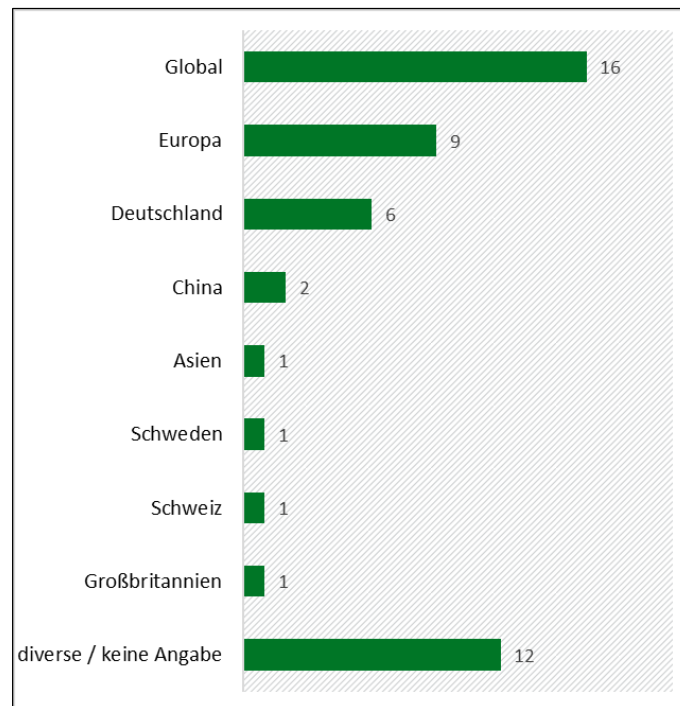


Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### Geografischer Bezug

Auch der geografische Bezug der quantitativen Ergebnisse ist eine wichtige Begleitinformation für die Interpretation der aggregierten Umweltindikatoren und für deren Verwendbarkeit (siehe Abbildung 8). Die erhobenen Daten beziehen sich meist auf einen globalen Kontext. Dies steht im Einklang mit der Erkenntnis, dass sich Entnahme und Verarbeitung der Ressourcen auf unterschiedliche Länder verteilen (vgl. Kapitel 0). Im Hinblick auf die Fallstudien und die makroökonomische Modellierung ist davon auszugehen, dass die Hintergrunddaten von Ökobilanzen nicht immer geografisch repräsentativ sind (z. B. entsprechende Gewichtung der primären Produktionsländer). Dies hat mit der teilweise unzureichenden Datenverfügbarkeit für bestimmte Erzeugnisse zu tun.

**Abbildung 8: Geografischer Bezug**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

#### Weitere Metainformationen

Die relevanten Daten- und Informationsquellen lassen sich zudem anhand der nachfolgenden Aspekte charakterisieren:

- ▶ **Offenlegung von Sachbilanzen (Lebenszyklusdaten):** ja (36 %); nein (44 %); teilweise (20 %).
- ▶ **Angewandte Methode: Ökobilanz (n = 28);** Literaturanalyse (n = 11); Messung (n = 1); Sonstiges / keine Angabe (n = 2).
- ▶ **Art der Daten- bzw. Informationsquelle:** wissenschaftliche Veröffentlichung (n = 13); Forschungsbericht – öffentlicher Auftraggeber (n = 11); Datenbank (n = 5); Studie – privater Auftraggeber (n = 4); Herstellerinformation (n = 4); Umweltproduktdeklaration (n = 3).

Der Anteil von Veröffentlichungen im Auftrag des Umweltbundesamtes an den relevanten Daten- und Informationsquellen beträgt etwa 20 % (n = 9).

#### Synthese der Recherche auf Mikroebene

Die ausgewählten Quellen decken die unterschiedlichsten Bereiche und Teilsysteme der Digitalisierung ab. Die Quellen nutzten meist eine Ökobilanz als Methode, vereinzelt aber auch strukturierte Literaturanalysen. Das Hauptaugenmerk der meisten Studien lag auf dem Energieverbrauch und den klimarelevanten Emissionen (CO<sub>2</sub>-Äquivalente). In diesem Kontext sei auch darauf hingewiesen, dass die Ökobilanzierung von IKT-Produkten noch mit großen Mängeln und methodischen Unsicherheiten behaftet ist. Dies liegt an der Komplexität der Produkte und der zu treffenden Annahmen. Schnelle technologische Fortschritte im Bereich der Digitalisierung (z. B. Halbleiterfertigung) bringen eine zusätzliche Ungenauigkeit und Variabilität in den Resultaten mit sich, denn Ökobilanzdaten hinken dem technischen Fortschritt deutlich hinterher (Arushanyan *et al.*, 2014).

Studien, die komplexe Produkte oder Produktsysteme betrachten, haben in der Regel keinen eindeutigen geografischen oder zeitlichen Bezug, denn beide Aspekte variieren stark und hängen größtenteils von den verfügbaren Informationen und Datensätzen ab. Die Datensätze von Ökobilanzstudien enthalten somit geografische und zeitliche Variationen.

Konzeptionell gehören die identifizierten Erkenntnisse auf Mikroebene vorwiegend zu den direkten Umweltwirkungen der Digitalisierung. Dementsprechend werden die indirekten Effekte der Digitalisierung von bisherigen Ökobilanzen nur unzureichend abgebildet. Dies liegt nicht zuletzt an den methodisch bedingten Einschränkungen. Sofern indirekte Effekte behandelt werden, handelt es sich meist um sogenannte Substitutionseffekte z. B. im Bereich der digitalen Medien.

Die Umweltwirkungsgruppe „Ressourcen“ enthält zum einen aggregierte Ressourcenindikatoren aus Ökobilanzen (z. B. abiotischer oder fossiler Ressourcenbedarf, Frischwasserbedarf, kumulierter Energiebedarf) und zum anderen vollständig aufgeschlüsselte Sachbilanzen. Diese Sachbilanzen nennen und quantifizieren einzelne Elemente, Energiebedarfe und Materialien. Auch Wasserbedarfe fallen im Rahmen dieser Auswertung in die Kategorie „Ressourcen“. Ähnlich verhält es sich mit den berichteten Luftemissionen. Hier handelt es sich oft um aggregierte Ökobilanzindikatoren (z. B. Treibhausgaspotential, Feinstaub, Versauerungspotenzial). In wenigen Fällen werden die Luftemissionen komplett aufgeschlüsselt.

Sowohl absolute als auch relative Ergebnisse (z. B. vergleichende Ökobilanzen) aus den identifizierten und systematisierten quantitativen Erhebungen hängen stark von den zugrunde liegenden Annahmen (geografischer Bezug, Systemgrenzen, Allokation) und Randbedingungen (Erhebungsmethode, zeitlicher und geografischer Bezug, Datenverfügbarkeit) ab. Daher wird an dieser Stelle von einer Darlegung und Diskussion der jeweiligen Ergebnisse abgesehen. Die systematische Erfassung von potenziell relevanten Vorarbeiten und den jeweiligen Ergebnissen erlaubt jedoch eine angemessene Verwendung der Resultate für die Fallstudien Lebenszyklusdaten (Kapitel 4).

#### **2.4.2 Meso- und Makroebene**

Die Bestandsaufnahme zu wissenschaftlichen Vorarbeiten auf der Meso- und Makroebene recherchiert nationale und internationale Studien und bereitet die daraus gewonnenen Erkenntnisse für das Forschungsvorhaben auf. Diese Studien setzen sich aus sektoraler oder gesamtwirtschaftlicher Perspektive empirisch fundiert mit dem Nexus aus Digitalisierung und Ressourceninanspruchnahme auseinander. Sowohl in den recherchierten Vorarbeiten als auch in den makroökonomischen Berechnungen und der Simulation muss gesamtwirtschaftlichen Makrobefunden stets eine Analyse auf der Ebene von Teilbereichen der Wirtschaft vorangehen – also eine Auseinandersetzung mit der Mesoebene. Aus methodischer Sicht ist die Frage nach dem Ressourcenbedarf des digitalen Wandels auf volkswirtschaftlicher Ebene primär eine Materialflussrechnung. Somit ist sie der um Umweltaspekte erweiterten (multi-regionalen) Input-Output-Analyse zuzuordnen.

Ausgangspunkt der Desktop-Recherchen waren zwei für Deutschland maßgebliche Vorarbeiten: erstens eine nicht veröffentlichte UBA-Studie zur systemischen Betrachtung des Nexus und zweitens das WBGU-Hauptgutachten „Unsere gemeinsame digitale Zukunft“ (WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, 2019; Neumann, 2020). Im Folgenden werden die zentralen Erkenntnisse aus dieser Bestandsaufnahme ohne einen Anspruch auf Vollständigkeit dargestellt. Vorab sei jedoch darauf hingewiesen, dass die aktuellen Studien eher die Energie- und Ressourceneffizienz-Potenziale der Digitalisierung

erforschen.<sup>18</sup> Ein aktuelles Beispiel ist die Studie des IW Köln, die das Ressourcen-Einsparpotenzial auf 7 % schätzt (Neligan *et al.*, 2021). Im vorliegenden Forschungsvorhaben hingegen wird in den folgenden Arbeitsschritten in erster Linie der Ressourcenbedarf der Digitalisierung im Fokus stehen. Somit sind die erwähnten Forschungsergebnisse komplementär zum Forschungsvorhaben einzustufen.

Arbeiten zum Thema lassen sich in der Regel einem der folgenden Diskurse zuordnen: (a) Digitalisierung als ökonomisch-ökologische Win-win-Situation: *Green Growth*; (b) Umweltwirkungen der Digitalisierung in Form von Wachstums- und Rebound-Effekten; (c) Digitalisierung und globale Verteilungsgerechtigkeit; (d) Suffizienzgesellschaft infolge der Digitalisierung (Kassenböhmer *et al.*, 2019).

Im vorliegenden Forschungsvorhaben konzentrieren sich die makroökonomischen Berechnungen und die Simulationen (Kapitel 5 und 6) auf den Zusammenhang zwischen Digitalisierung und Ressourcenbedarf. Es ist damit primär dem Diskurs (b) zuzuordnen. Wissenschaftliche Arbeiten, die primär dem Diskurs zu den (Ressourcen-)Effizienzpotenzialen der Digitalisierung (a) zuzuordnen sind, sind hingegen weniger wichtig für die nachfolgenden Arbeitsschritte: gemäß dem Auftrag sollen die Betrachtung und Analyse dieser Potenziale (Stichwort „Industrie 4.0“) nicht im Mittelpunkt stehen.

Doch die Arbeiten lassen sich nicht nur nach primärer Diskurszugehörigkeit einordnen. Die tabellarische Übersicht (Tabelle 1) am Ende dieses Abschnitts enthält weitere Charakterisierungen wie folgt:

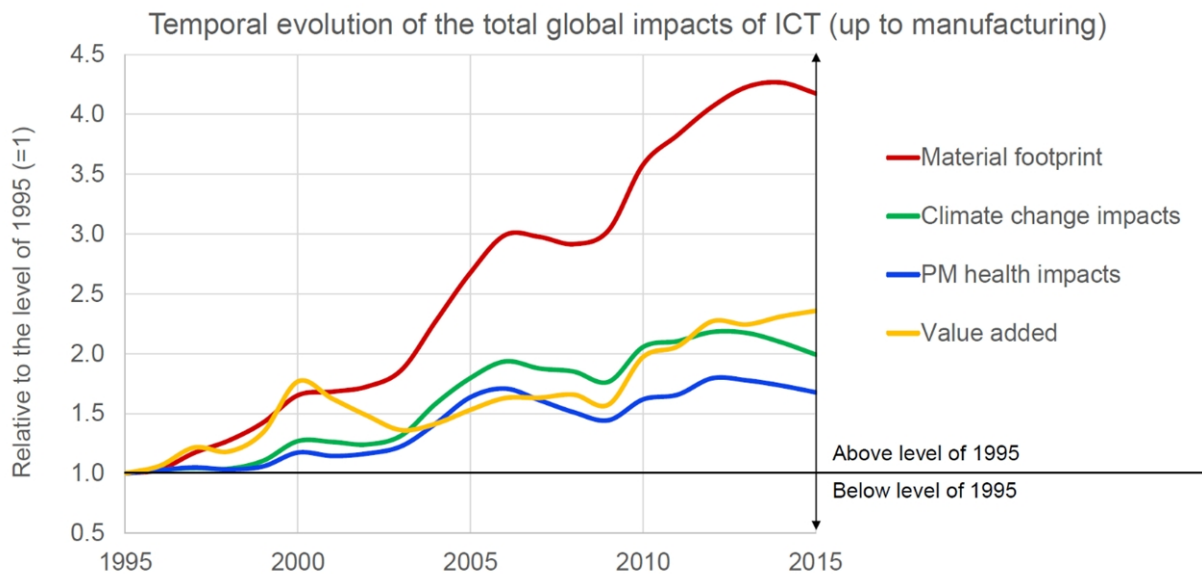
- ▶ Ist die Methodik ausschließlich qualitativ oder wurden auch quantitative Forschungsergebnisse erzielt?
- ▶ Wird der Nexus „Digitalisierung und Ressourcennutzung“ aus der Ex-post- und/oder aus der Ex-ante-Perspektive analysiert?
- ▶ Was ist der räumliche Bezug der wissenschaftlichen Arbeit?

Auf eine Unterscheidung nach Studien, die eine Mesoperspektive einnehmen, und solchen, die primär makroökonomisch fundiert sind, wird hingegen verzichtet. Alle betrachteten Arbeiten haben vielmehr gemeinsam, dass die Digitalisierung als mesoökonomisches Phänomen des sektoralen Strukturwandels begriffen wird. Erst durch die intensive Beschäftigung mit der Mesoebene werden somit Analyseergebnisse und Aussagen zur Makroebene möglich (Bottom-up-Ansatz). Vor diesem Hintergrund wäre der Erkenntnisgewinn aus einer Meso-Makro-Spalte in Tabelle 1 sehr begrenzt.

---

<sup>18</sup> Diese Fokussierung wurde u. a. in zwei Fachveranstaltungen deutlich, an denen die Forschungsnehmer teilgenommen haben: Am 07.12.2020 wurden im Rahmen der 24. Konferenz des „Netzwerks Ressourceneffizienz“ erste Ergebnisse einer bitkom-Studie zum Thema Klimaeffekte der Digitalisierung vorgestellt. Am 28.01.2021 wurden im Rahmen eines mit „Digitalisierung zur Steigerung der Ressourceneffizienz“ titulierten Workshops erste Ergebnisse des IW-Gutachtens präsentiert und diskutiert.

**Abbildung 9: Globale Wirkungen der IKT-Bereiche**



Quelle: Cabernard (2019)

Besonders wichtig sind auch die wissenschaftlichen Arbeiten, die im Rahmen des WBGU-Hauptgutachtens „Unsere gemeinsame digitale Zukunft“ genutzt und erstellt wurden (Andrae & Edler, 2015; Köhler, Gröger & Liu, 2018; WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, 2019). Die umfangreichen und detaillierten Studien-Ergebnisse, insbesondere diejenigen zu Themen an der direkten Schnittstelle zwischen Umwelt und Digitalisierung, lassen sich natürlich nicht ansatzweise innerhalb eines Absatzes angemessen zusammenfassen. Daher sei an dieser Stelle nur auf zwei besonders alarmierende Studienergebnisse verwiesen: Erstens wird erwartet, dass sich in Folge der Digitalisierung der Kupferbedarf bis 2050 gegenüber 2010 verdreifachen wird (WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen, 2019). Zweitens soll sich der globale Stromverbrauch von Festnetz, WLAN und Mobilfunknetzen innerhalb dieses Jahrzehnts in etwa verfünffachen (*expected case scenario*) – sogar ein Anstieg um den Faktor 20 erscheint nicht ausgeschlossen (*worst case scenario*) (Andrae & Edler, 2015; Köhler *et al.*, 2018).

Es gibt eine noch nicht veröffentlichte UBA-Studie, die die Entwicklung des Energiebedarfs und der Ressourcen-Inanspruchnahme im IKT-Bereich systemdynamisch modelliert. Sie beschreibt die Zusammenhänge, die zur Verbreitung von Informations- und Kommunikationstechnologien führen, und deren Dynamik (Neumann, 2020). Die Digitalisierung – die hier alle digitalen Prozesse umfasst – ist dabei besonders wichtig. Die Studie enthält qualitative Ursache-Wirkungs-Modelle, die Auskunft darüber geben, wie IKT-Entwicklungen, sozio-ökonomische Entwicklungen und rohstoffbezogene Ursache-Wirkungs-Beziehungen voneinander abhängig sind. Quantitative Aussagen enthält die Studie hingegen nicht, weder aus einer Ex-post- noch aus einer Ex-ante-Perspektive.

Nicht nur diese Studie, sondern auch weitere Arbeiten des Umweltbundesamtes beruhen auf einer systemischen Herangehensweise (Günther *et al.*, 2019; Purr *et al.*, 2019). Während sich Neumann auf den IKT-Bereich konzentriert, betrachten andere Arbeiten alle Wirtschaftsbereiche. Sie lassen zwar explizite Analysen und Aussagen dazu vermissen, welche Rolle die Digitalisierung für die Transformation hin zu einem treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland spielen wird. Dennoch bieten diese Vorarbeiten wertvolle

Grundlagen für die Konzeption und quantitative Spezifikation des nicht IKT-spezifischen Gesamtrahmens der Simulationen.

Der IIASA-Report für die Initiative „*World in 2050*“ betont fast ausschließlich die Chancen und Effizienzpotenziale der Digitalisierung („*TWI2050 – The World in 2050*“, 2019). Den Nexus zwischen Digitalisierung und einem steigenden Rohstoffbedarf hingegen analysiert der Bericht nicht. Er verweist lediglich im Hinblick auf den steigenden Anteil der Digitalökonomie am globalen Stromverbrauch auf diesbezügliche Studien.

**Tabelle 1: Wissenschaftliche Arbeiten zum Thema „Digitalisierung und Ressourcennutzung“ auf Meso- und Makroebene**

Wissenschaftliche Arbeit	Diskurszugehörigkeit	Qualitativ/quantitativ	Zeitbezug	Raumbezug
Cabernard, 2019		quantitativ	ex post	global, Schweiz
WBGU, 2019	(a) und (b)	qualitativ und quantitativ	primär ex ante	global
Andrae & Edler, 2015 Köhler <i>et al.</i> , 2018	(b)	quantitativ	primär ex ante	global
Neumann, 2020	(a) und (b)	nur qualitativ	ohne	ohne
Günther <i>et al.</i> , 2019 Purr <i>et al.</i> , 2019	(a), aber ohne expliziten Digitalisierungsbezug	qualitativ und quantitativ	ex ante (bis 2050)	Deutschland
TWI2050, 2019	(a)	fast nur qualitativ	ex ante	global

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Diese Forschungsarbeiten zum Thema „Digitalisierung und Ressourcennutzung“ auf Meso- und Makroebene sind nicht die einzigen Grundpfeiler der nachfolgenden Arbeiten. Auch meso- und makroökonomische Daten, die Analysen der Verflechtung von (Digital-)Wirtschaft und Umwelt ermöglichen, spielen eine zentrale Rolle.

Wie im nachfolgenden Kapitel 3 erörtert wird, stehen diese Analysen vor allem vor den folgenden Herausforderungen:

- ▶ Die etablierten Gliederungen der Wirtschaftszweige kennen keinen Bereich „Digitalwirtschaft“. Wie ist also der zu analysierende Teilbereich der Wirtschaft adäquat abzugrenzen?
- ▶ Große Teile der Digitalwirtschaft lassen sich allein mit Daten zur Verflechtung der (Digital-)Wirtschaft in Deutschland nicht adäquat analysieren, da wesentliche Produktionsprozesse überwiegend in anderen Ländern (USA, China, Japan ...) stattfinden.
- ▶ Neben Daten zur globalen ökonomischen Verflechtung der Sektoren (= multiregionale Input-Output-Tabellen) sind auch umweltökonomische Satelliteninformationen nötig, die konsistent mit der monetären Sphäre verknüpft sind.

Die Verfügbarkeit von Daten(-banken) zur Analyse des Ressourcenbedarfs durch den digitalen Wandel in Deutschland ist im Folgenden beschrieben. Dabei ist zunächst zwischen

Daten(-banken) mit modellbasierten Abschätzungsergebnissen und Daten(-banken) mit Datengrundlagen für (Abschätzungs-)Modelle zu unterscheiden.

In die erste Kategorie fallen die Abschätzungsergebnisse der Umweltökonomischen Gesamtrechnungen des Statistischen Bundesamtes zu Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten (Statistisches Bundesamt, 2021) sowie die „Materialflussrechnung in Rohstoffäquivalenten nach letzter Verwendung von Gütern – Modellrechnungen“ von Eurostat (eurostat, 2022). Die Abschätzungen des Statistischen Bundesamtes unterscheiden lediglich 23 Gütergruppen. Daher geben sie keinen Aufschluss über den digitalen Wandel. Die im Dezember 2020 erschienenen Eurostat-Abschätzungen sind hier deutlich differenzierter: Sie geben Auskunft zur Rohstoffanspruchnahme der letzten Verwendung, differenziert nach 64 Gütergruppen. Eine Einschränkung der Eurostat-Daten ist jedoch, dass sie lediglich auf der Ebene der EU-27 und nicht für die einzelnen Mitgliedstaaten vorliegen. Da sie ausschließlich die letzte Verwendung (von Gütern der Digitalwirtschaft) beschreiben, bleibt zudem ein wesentlicher Aspekt des Ressourcenbedarfs durch den digitalen Wandel außen vor: die Ressourcenanspruchnahme durch die intermediäre Verwendung von Gütern und Dienstleistungen der Digitalwirtschaft. Als Referenzrahmen zur Überprüfung eigener makroökonomischer Abschätzungen werden die Eurostat-Ergebnisse jedoch hilfreich sein.

In die zweite Kategorie fallen um Umweltaspekte erweiterte multi-regionale Input-Output-Datensätze (Statistisches Bundesamt, 2021). Der multi-regionale Aspekt dieser Datensätze ist in einer globalisierten Welt von immenser Bedeutung. Von der Extraktion über die Verarbeitung bis hin zum Endprodukt werden nämlich in aller Regel verschiedene Volkswirtschaften mit ihren unterschiedlichen Strukturen und Produktionsweisen durchlaufen.

Zur Herleitung der in diesem Vorhaben benötigten Intensitätsfaktoren wurde bis zum Frühjahr 2022 auf eine Nutzung der Datenbank EXIOBASE hingearbeitet. Diese Entscheidung beruhte auf der Beobachtung, dass sich EXIOBASE unter den vier wissenschaftlich etablierten MRIO-Datenbanken durch einen konsistent hohen Detailgrad bei der sektoralen Untergliederung von Produktionsaktivitäten auszeichnet.

Doch im Frühjahr 2022 wurde die **MRIO-Datenbank GLORIA** („*Global Resource Input-Output Assessment*“) veröffentlicht. In Absprache mit der UBA-Fachbegleitung an diesem Vorhaben fiel dann der Beschluss, ausschließlich die Datenbank GLORIA als MRIO-Datenquelle zur Parametrisierung des Modells GRAMOD zu verwenden. Diese Entscheidung, in den eigenen „*Top-down*“-Analysen die Datenbank GLORIA anzuwenden, geht darauf zurück, dass diese als erste wissenschaftlich entwickelte MRIO-Datenbank von einer supranationalen Institution als offizielle statistische Referenz genutzt wird: im Rahmen des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) als offizielle Referenz zur international harmonisierten Beurteilung von gesamtwirtschaftlichen Nachhaltigkeitsentwicklungen.



## 3 System- und Betrachtungsgrenzen

### 3.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Dieses Kapitel beinhaltet die Diskussion und Festlegung von System- und Betrachtungsgrenzen des „Systems Digitalisierung“ für das Forschungsvorhaben. Konkretisiert wird, was unter „Digitalisierung“ verstanden wird und welche System- und Betrachtungsgrenzen gemeinsam mit dem Auftraggeber festgelegt wurden. Diesbezüglich werden unterschiedliche Sektoren und deren Rolle für den Bereich Digitalisierung erörtert – und zwar aus einer Input-Output-Perspektive, die die Verflechtung verschiedener Produktionsbereiche und Materialflüsse entlang (globalisierter) Wertschöpfungsketten berücksichtigt (siehe auch Kapitel 3.5.3).

Die Definition von System- und Betrachtungsgrenzen hat entscheidenden Einfluss auf die folgenden Arbeiten. Sie hängt insbesondere von Fragestellungen und Rahmenparametern der makroökonomischen Berechnungen und der durchzuführenden Simulationen (Kapitel 5 und 6) ab. Zusätzlich wird sie vom verfügbaren Datenmaterial aus der Bestandsaufnahme (Kapitel 3.4) beeinflusst. Letztlich ist ein System zu definieren, das einen festen, aber ausreichend flexiblen Rahmen für die weiteren Arbeiten bildet.

### 3.2 Vorgehensweise

Die System- und Betrachtungsgrenzen enthalten zwei unterschiedliche Diskussionsstränge:

- ▶ Konzeptionelle Einordnung des „Systems Digitalisierung“ als theoretisch maximale Betrachtungsgrenze (siehe Kapitel 3.4).
- ▶ Methodisch bedingte Abgrenzung des „Systems Digitalisierung“ als praktisch anwendbare Betrachtungsgrenze z. B. aufgrund von limitierenden Faktoren wie der Datenverfügbarkeit (siehe Kapitel 3.4).

Doch zunächst beschreibt das folgende Kapitel 3.3 den Begriff und das Thema Digitalisierung sowie deren Interpretation durch das Forschungsvorhaben.

### 3.3 Grundlegende Überlegungen zur Systematisierung der Digitalisierung

Digitale Technologien beeinflussen (z. B. durch bestimmte Algorithmen) individuelle Entscheidungsprozesse direkt oder indirekt (Sattlegger *et al.*, 2019). Solche Entscheidungen sowie digitale Innovationen haben teils weitreichende und komplexe sozio-ökologische Folgen. Digitale Lösungen können daher als sozio-technische Innovationen verstanden werden, bei denen der Mensch eng mit einer Technologie verbunden ist (BMUV, 2020b). Zahlreiche Anwendungsfelder digitaler Technologien zielen primär darauf ab, die Effizienz einer Dienstleistung oder Produktionsweise zu verbessern bzw. bestimmte Aktivitäten zu beschleunigen (Rivera *et al.*, 2014). Nicht selten wird der aggregierte Gesamtkonsum dadurch ökologisch nachteiliger. Ein Grund dafür ist, dass die Technologie Zeit durch Energie und Rohstoffe ersetzt. Hier stellt sich die Frage, inwieweit digitale Technologien gesellschaftliche und wirtschaftliche Prozesse verändern und wie sich dies in der Ressourcenintensität niederschlägt. Wichtig ist: Die ökologischen Folgen können positiv (digitale Lösungen als Werkzeug für sozial-ökologischen Wandel) oder negativ (digitale Lösungen als „Brandbeschleuniger“) ausfallen (BMUV, 2020b). Die Bestandsaufnahme (Kapitel 2) erörterte auch den aktuellen Wissensstand zu indirekten Umweltwirkungen der Digitalisierung (Kapitel 2.3.2).

Das Wissen über Systemdynamiken und Wechselbeziehungen ist demnach eine wichtige Voraussetzung für die Ableitung von Ziel- und Transformationswissen (Dubielzig & Schaltegger, 2004; BMBF, 2015). Die technologische Basis der Digitalisierung (v. a. Informations- und Kommunikationstechnik) soll daher im Folgenden als ein dynamisches System verstanden werden.

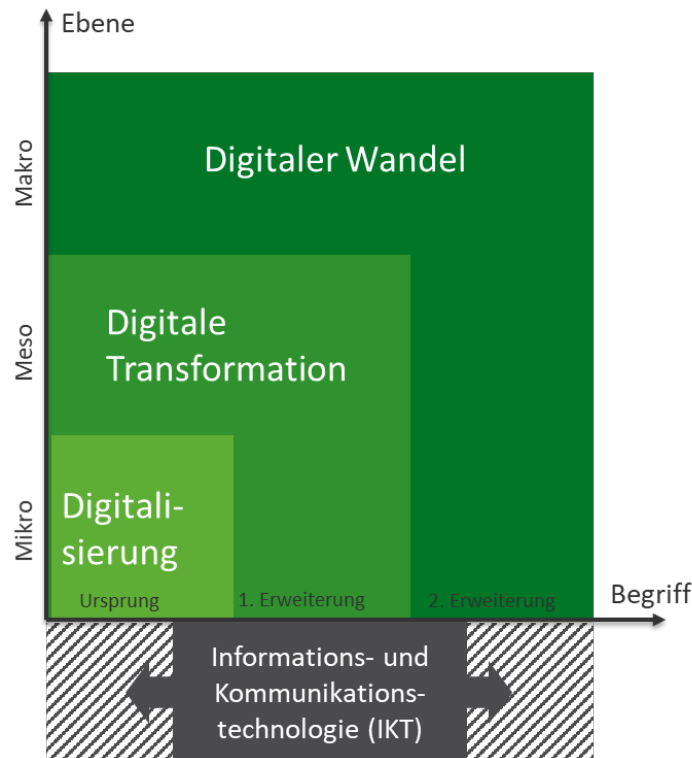
Soll ein Systemverständnis erarbeitet bzw. der Begriff „Digitalisierung“ speziell für das Forschungsvorhaben definiert werden, ist zunächst anzuerkennen: Dieser Begriff kann unzählige und sehr diffuse Bedeutungen haben. Das Spektrum, das der Begriff der Digitalisierung gewöhnlich abdeckt, ist groß. Es reicht von der Überführung analoger Inhalte in digitale Formate (z. B. E-Books, Videostreaming) über die Automatisierung und disruptive Veränderung von industriellen Wertschöpfungsketten (vgl. Industrie 4.0) bis hin zur gesamtgesellschaftlichen digitalen Transformation. Diese unterschiedliche Auslegung und Abgrenzung von Digitalisierung sowie von digitalen Anwendungsfällen macht eine umfassende Quantifizierung des Systems so schwierig (z. B. eingeschränkte Vergleichbarkeit und unterschiedliche Aggregation vorhandener Daten) (vgl. Arbeiten in der Bestandsaufnahme). Schon der Blick auf die oben genannten Formen der Digitalisierung macht deutlich: Die Digitalisierung reicht je nach Anwendungskontext von („einfachen“) Substitutionseffekten bis hin zu strukturellen, gesamtgesellschaftlichen Phänomenen. Gleichzeitig vermitteln Diskurse zur Digitalisierung oft das implizite Versprechen, dass alle Sektoren und Anwendungen weniger abhängig von physischen Ressourcen werden. In Wirklichkeit sind viele der zugrunde liegenden Prozesse und Infrastrukturen (z. B. Server und Datenzentren) sowie die systemgebenden Elemente (z. B. Software) für die Anwender\*innen einfach „unsichtbar“. Nur die sichtbaren Artefakte der Digitalisierung (oft als Informations- und Kommunikationstechnologie bezeichnet) bleiben im Bewusstsein. Die tatsächlichen Ressourcenbedarfe und potenziellen Umweltentlastungspotenziale eines bestimmten Anwendungsfalls hängen von vielen Faktoren und systemischen Effekten ab. Für die weitere Erarbeitung eines Systemverständnisses gilt es festzuhalten, dass die Teilsysteme und Anwendungsbereiche der Digitalisierung in dynamischen (teils nichtlinearen) Wechselbeziehungen zueinanderstehen.

### 3.4 Konzeptionelle Einordnung der Digitalisierung aus Ressourcensicht

Im Rahmen des Forschungsvorhabens liegt ein besonderes Augenmerk auf der materiellen Basis der Digitalisierung. Dabei handelt es sich vordergründig um die IKT, aber auch um weitere elektronische Geräte wie Mikrocontroller, Sensoren und Aktuatoren und schließlich um Hilfskomponenten wie Netzteile, Ladegeräte, Akkumulatoren und Optoelektronik (Köhler *et al.*, 2018). Unabhängig davon, wie eng oder breit der Begriff „Digitalisierung“ gefasst ist – die IKT bildet die materielle Basis dafür (siehe folg. Abbildung 10). Der Begriffsursprung in der deutschen Sprache liegt somit auf der Mikroebene. Er umfasst dabei die Umwandlung von analogen Informationen in digitale Formate (gleichzusetzen mit dem englischen Begriff „*digitization*“). Auf der Mesoebene erweitert sich dieser Begriff zur „digitalen Transformation“, also dem zielgerichteten Einsatz von digitalen Technologien. Auf der Makroebene schließlich erweitert sich der Begriff zu „digitalem Wandel“ und beschreibt die durch die Digitalisierung ausgelösten Veränderungsprozesse in der Gesellschaft inklusive Wirtschaft, Kultur, Wissenschaft, Bildung und Politik. Im allgemeinen Sprachgebrauch und auch in der Literatur oder der politischen und wissenschaftlichen Debatte werden die Begriffe oft synonym verwendet. Eine eindeutige Abgrenzung der Begriffe ist bisher nicht etabliert, könnte aber ein wertvolles Teilergebnis des Forschungsvorhabens sein und als Bezugsrahmen für weitere Diskussionen von System- und Betrachtungsgrenzen dienen. Weiterhin ist zu prüfen, ob das derzeitige Systemverständnis von „IKT“ die materielle Basis des digitalen Wandels vollständig

abbildet oder ob dieses Verständnis, um bestimmte Aspekte und Systeme zu erweitern oder zu ergänzen ist.

**Abbildung 10: Einordnung von Digitalisierung, digitaler Transformation und digitalem Wandel**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die Datenanalysen und -berechnungen im Forschungsvorhaben erfolgen zum einen auf Mikroebene: im Rahmen von Fallstudien zu ökobilanziellen Lebenszyklusdaten von Produkten, Technologien, Infrastrukturen etc. Zum anderen finden sie auf Meso- und Makroebene statt, und zwar im Rahmen von ökonomischen Berechnungen und als Simulation unterschiedlicher Szenarien.

Die Forschungsfrage erlaubt es, bei der Definition von System- und Betrachtungsgrenzen die folgenden Determinanten (Treiber, Reduktionspotenziale) der Ressourcenintensität im Kontext der Digitalisierung zu berücksichtigen:

- ▶ Technologische Innovationen bei Hardware (z. B. Miniaturisierung von Geräten, Leistungssteigerung in der Halbleitertechnik).
- ▶ Marktentwicklungen (z. B. Datenverkehr, Ausbau 5G).
- ▶ Obsoleszenz (Kurzlebigkeit von Massenprodukten).
- ▶ Politische Agenda.
- ▶ Regulatorische Aspekte (Energieeffizienzanforderungen z. B. aus Ökodesign-VO).
- ▶ Digitalisierungstrends (z. B. Automatisierung, Sharing, E-Commerce, Online-Konferenzen).

Schließlich müssen bei der Definition von System- und Betrachtungsgrenzen auch Schwierigkeiten berücksichtigt werden, die bei der Modellierung von Ressourcenbedarfen der Digitalisierung in der Natur der Sache liegen. Dies sind u. a. die bereits beschriebenen

dynamischen, nichtlinearen Entwicklungspfade, aber auch überall auftretende Substitutions-, Induktions- und Rebound-Effekte. Diese Entwicklungspfade und vielschichtigen Effekte der Digitalisierung sind gleichzeitig ein geeigneter Anknüpfungspunkt für Fallstudien und makroökonomische Simulationen.

### 3.4.1 Etablierte Leitmodelle zur konzeptionellen Abgrenzung des „Systems Digitalisierung“

In abgeschlossenen Forschungsvorhaben des Umweltbundesamtes sowie in der einschlägigen wissenschaftlichen Literatur finden sich bereits wegweisende konzeptionelle Überlegungen bzw. Leitmodelle für die Definition von System- und Betrachtungsgrenzen im Rahmen des Forschungsvorhabens. Die wichtigsten Vorarbeiten beschäftigen sich mit den

- ▶ „Systemgrenzen IKT-Infrastruktur“ (Trapp *et al.*, 2017)
- ▶ „IKT im Unterhaltungs- und Mediensektor“ (Malmodin & Lundén, 2018)
- ▶ „Wirkungsmodellen für Zusammenhänge zwischen Software-Eigenschaften, Nutzerverhalten/Organisation, Hardware-Inanspruchnahme und Ressourcenaufwand“ (Schödwell & Zarnekow, 2018)
- ▶ „Effekt-Matrix der IKT“ (Hilty & Aebischer, 2015)
- ▶ „Potenziellen Effekte der IKT-Implementierung“ (Global e-Sustainability Initiative, 2010)
- ▶ „Bereichen und Begriffen der IKT“ (Neumann, 2020)

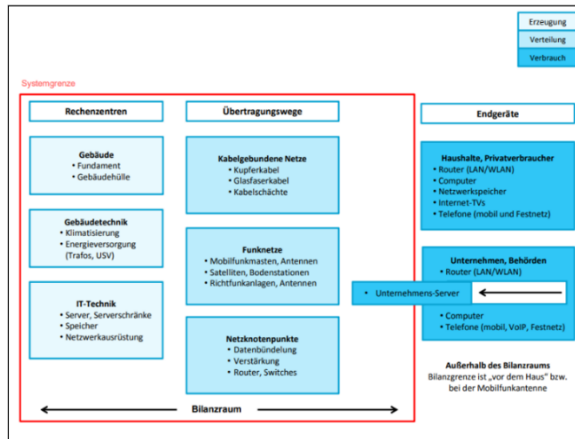
Alle betrachteten Modelle finden sich in der folgenden Abbildung 11.

Die vorgestellten Leitmodelle bieten eine umfassende Darstellung der Auswirkungen und Interaktionen von Informations- und Kommunikationstechnologien (IKT) innerhalb des "Systems Digitalisierung". Zusammen liefern diese Modelle eine Perspektive auf die Rolle der IKT in vielfältigen Kontexten und tragen zu einem ganzheitlichen Verständnis dieses Themenbereichs bei.

Dabei wird sowohl auf die Rolle der IKT als Lösungsansatz als auch als Teil der zugrundeliegenden Herausforderungen eingegangen. Die Modelle beleuchten Beispiele für Emissionsreduktionen und -steigerungen und verdeutlichen auftretende Rebound-Effekte. Zudem erfolgt eine Einordnung von IKT-bezogenen Begriffen und Domänen in ihre entsprechenden Zusammenhänge. Des Weiteren werden die Verknüpfungen zwischen Hardware und Software im Hinblick auf Ressourceninanspruchnahme aufgezeigt.

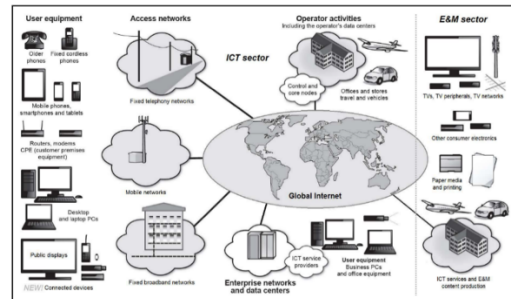
### Abbildung 11: Leitmodelle für die Definition des "Systems Digitalisierung"

#### Systemgrenzen IKT-Infrastruktur im Rahmen des Vorhabens RELIS



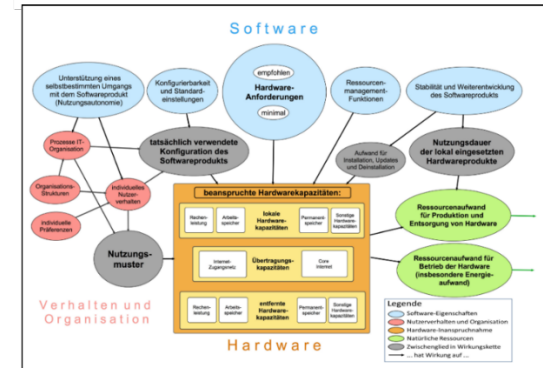
Quelle: Umweltbundesamt (2017)

#### IKT sowie Unterhaltungs- und Mediensektor



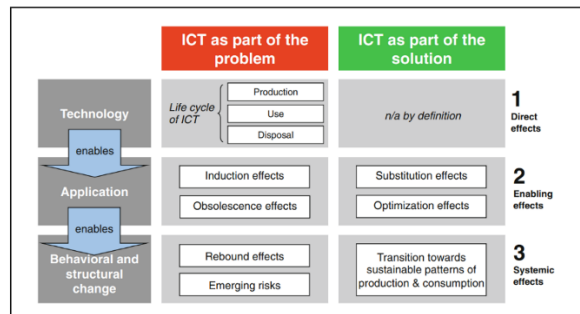
Quelle: Malmodin und Lundén (2018)

#### Wirkungsmodell für Zusammenhänge zwischen Software-Eigenschaften, Nutzerverhalten/ Organisation, Hardware-Inanspruchnahme und Ressourcenaufwand



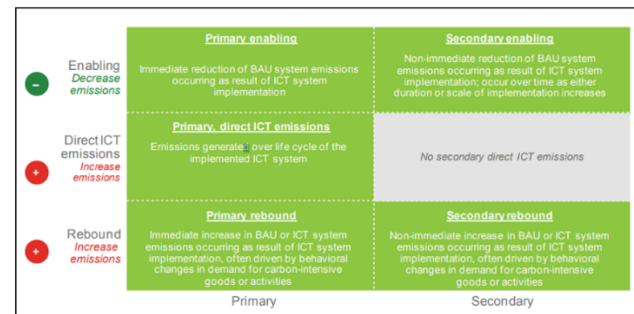
Quelle: Umweltbundesamt (2018)

#### Effekt-Matrix der IKT



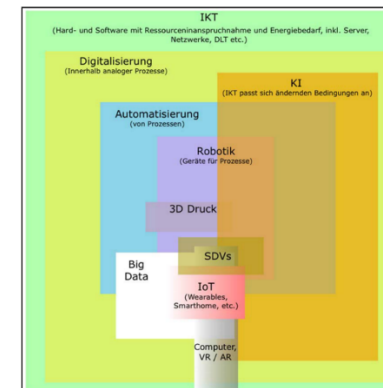
Effekt-Matrix der IKT. Quelle: Hilty und Aebischer (2015)

#### Potenzielle Effekte der IKT-Implementierung



Quelle: Global e-Sustainability Initiative (2010)

#### Bereiche und Begriffe der IKT



Quelle: Umweltbundesamt (Hrsg.) (2020)

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### 3.4.2 Ableitung einer konzeptionellen Perspektive auf das „System Digitalisierung“

Der absolute Ressourcenbedarf (Ressourcenintensität) der Digitalisierung lässt sich nur dann ganzheitlich betrachten, wenn die unterschiedlichen Bereiche in den Blick genommen werden, in denen die Digitalisierung eine wichtige Rolle spielt und in Zukunft spielen wird. Es ist zu analysieren, wie die Digitalisierung wirtschaftliche Prozesse, soziale Aspekte und Lebensstile sowie die Wechselwirkungen zwischen diesen verändert. Empfehlenswert ist ein geeigneter Referenzrahmen, der diese Prozesse und Bereiche bzw. Sektoren explizit benennt.

Eine mögliche Annäherung an einen solchen Referenzrahmen bilden **zwölf** umweltpolitische Handlungsfelder der Digitalisierung (Umweltbundesamt, 2019a). Ergänzend lassen sich die Teilbereiche der Digitalisierung mit den einschlägigen Sektoren bzw. digitalen Märkten definieren, wie sie beispielsweise in statistischen Erhebungen zu finden sind. Analog zu der hier vorgeschlagenen Differenzierung in Zielsektoren (bzw. Transformationsfelder) sollten mindestens die sogenannten „Transformationsarenen“ aus dem BMUV-Projekt CO:DINA<sup>19</sup> aufgegriffen werden (Ramesohl & Fritzsche, 2021):

- ▶ Energie
- ▶ Ressourcen
- ▶ Wasser
- ▶ Industrie
- ▶ Mobilität
- ▶ Konsum
- ▶ Städte
- ▶ Landwirtschaft
- ▶ Bildung
- ▶ Gesundheit

So ist eine absolute und sektorenübergreifende Systematisierung möglich. Diese ist wiederum unverzichtbar, da noch weitestgehend unklar ist, wie sich unterschiedlichste Anwendungsfelder und Bereiche der Digitalisierung auf die absolute Ressourcenintensität, also auf die aggregierten Bedarfe an Ressourcen, auswirken. Diesen Aspekt untersuchen momentan nur wenige Instrumente und wissenschaftliche Arbeiten, was die Relevanz des Forschungsvorhabens unterstreicht.

Abbildung 12 enthält eine schematische (indikative) Darstellung der konzeptionellen Perspektive im Forschungsvorhaben auf das „System Digitalisierung“ (Betrachtungsmodell). Diese Perspektive dient auch als Grundlage zur Auswahl der Fallstudien. Demnach kann das System entweder ausgehend von spezifischen digitalen Märkten und Lösungen oder von konkreten Anwendungsfeldern (bzw. Transformationsfeldern) aufgespannt und kausal mit den jeweiligen Technologien und der dafür notwendigen materiellen Basis verknüpft werden. Wie

---

<sup>19</sup> Das Verbundvorhaben „CO:DINA – Transformationsroadmap Digitalisierung und Nachhaltigkeit“ ist eine Maßnahme der Umweltpolitischen Digitalagenda des Bundesministeriums für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz (BMUV), <https://codina-transformation.de> (Stand: 22.012022).

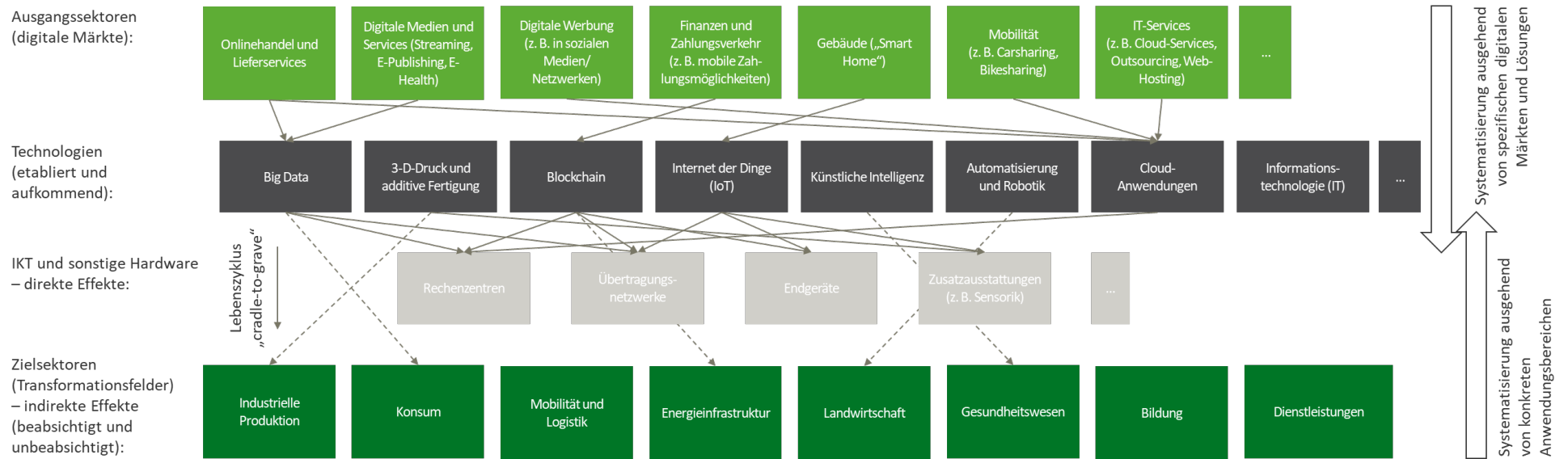
bereits aus den Leitmodellen (siehe Abbildung 11) hervorgeht, bildet die IKT vielfach den besten gemeinsamen Nenner (vgl. sogenannte direkte Effekte der Digitalisierung<sup>20</sup>) für alle zahlreichen und diversen digitalen Lösungen und Anwendungsbereiche<sup>21</sup>. Hierbei muss man allerdings die **bisherige Definition von IKT um die notwendige Zusatzausstattung (z. B. Sensoren) sowie die entsprechende Software erweitern**. Dies geht bereits teilweise aus den Leitmodellen hervor. Das Nutzungsverhalten bzw. der Anwendungskontext (indirekte Effekte) ist bei der Systematisierung und weiteren Erhebung zentral. Digitale Technologien können nämlich nur mit anwendungsfallspezifischen Erhebungen ganzheitlich betrachtet werden, die direkte und indirekte Effekte gleichermaßen berücksichtigen und – wo möglich – quantifizieren.

---

<sup>20</sup> Bezieht sich auf die Auswirkungen der physischen Prozesse, mit denen die Rohstoffe für IKT-Hardware produziert, IKT-Hardware hergestellt, Strom für die Nutzung von IKT-Systemen (einschließlich des Stroms für Nicht-IKT-Infrastrukturen wie Kühlung) bereitgestellt, IKT-Hardware recycelt und schließlich nicht recycelter Abfall entsorgt werden. Die Methode der Wahl für die Bewertung der Lebenszyklusausswirkungen ist die Lebenszyklusbewertung (LCA).

<sup>21</sup> Vgl. das Zusammenspiel unterschiedlicher Bereiche der IKT in unveröffentlichter UBA-Publikation: IKT – Szenarete – Bericht zur systemdynamischen Modellierung der Entwicklung des Energiebedarfs und der Ressourcen-Inanspruchnahme des IKT-Bereichs.

**Abbildung 12: Schematische (indikative) Darstellung der konzeptionellen Perspektive auf das „System Digitalisierung“ (Betrachtungsmodell)**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023



Das in Abbildung 12 dargestellte konzeptionelle Betrachtungsmodell des „Systems Digitalisierung“ bietet einen Bezugsrahmen für die Beschreibung von Anwendungsfällen im weiteren Verlauf dieses Forschungsvorhabens. Da das System sehr komplex ist, können die dargestellten Betrachtungsebenen nur fallspezifisch genau aufgeschlüsselt werden. Zudem ist eine anwendungsfallspezifische Überprüfung und, sofern nötig, Anpassung der konzeptionellen Perspektive vorgesehen. Tabelle 2 zeigt anhand einer Fallstudie beispielhaft, wie sich das Modell einsetzen lässt.

Das Betrachtungsmodell bietet daher eine unverzichtbare Grundlage für die konzeptionelle Einordnung und für eine fundierte Definition des „Systems Digitalisierung“. Allerdings ist eine **starre Festlegung auf bestimmte Systemgrenzen nicht zielführend**, da es sich bei der Digitalisierung um ein komplexes und dynamisches Zusammenspiel verschiedenster Produkte, Produktsysteme, Infrastrukturen und Technologien handelt. Es wird daher angeregt, die konzeptionelle Perspektive auf das System Digitalisierung weitestgehend flexibel zu halten. Dabei sollten insbesondere die beschriebenen Domänen (Ausgangssector, Technologien, IKT und sonstige Hardware, Zielsektor) im Blick behalten werden.

**Tabelle 2: Exemplarische Einordnung der Fallstudie „Smart-Home“ zur iterativen Überprüfung der Operationalisierbarkeit des Modells (siehe Abbildung 12)**

Kategorie/Domäne gem. Systematisierung	Fallspezifische Einordnung
Ausgangssector (relevant für Makroökonomische Berechnungen/ Simulationen)	Gebäude
Technologien	Internet der Dinge (IoT) Data-Analytics Cloud-Computing
IKT und sonstige Hardware (Fokus Fallstudien Lebenszyklusdaten)	Kommunikationsgeräte (Router, Ausstattung für den Internetzugang) Managementgeräte (Festplatte, Touchdisplay) Feldgeräte (Temperatursensor, Smart Plugs) Intelligente Instrumente (Display, Elektronik, Kommunikationsgeräte) Prozessor
Zielsektor (relevant für Makroökonomische Berechnungen/ Simulationen)	Energie

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### 3.5 Identifikation und Diskussion von methodischen Betrachtungsgrenzen

Für eine zielführende Ableitung von methodischen Betrachtungsgrenzen gilt es zu beachten, dass insbesondere die methodischen Grenzen und Möglichkeiten der Input-Output-Modelle (siehe Kapitel 5.2) maßgeblich für das Forschungsvorhaben sind. Die methodischen Betrachtungsgrenzen hängen von der konkreten Fallstudie und von den auf Mikroebene verfügbaren Daten ab. Demnach werden die methodischen Betrachtungsgrenzen für die Fallstudien bei deren Priorisierung bereits inhärent berücksichtigt (siehe Kapitel 4.1). Weitere Betrachtungsgrenzen ergeben sich anhand der Sachbilanzdaten aus etablierten Ökobilanz-Datenbanken und aus der ökobilanziellen Herangehensweise. Daher ist eine kurze Einführung in die Thematik der Ökobilanzierung und Sachbilanzierung sowie eine Gegenüberstellung mit der Input-Output-Analyse notwendig.

### 3.5.1 Gegenüberstellung Ökobilanzierung und Input-Output-Analyse sowie Erkenntnisse aus der Recherche zu quantitativen Ergebnissen

Bei der Ausgestaltung der System- und Betrachtungsgrenzen sowie der Harmonisierung mit den ausstehenden Arbeiten (Fallstudien, makroökonomischen Berechnungen sowie Simulationen) gilt es die grundlegenden Unterschiede zwischen Ökobilanzen und Input-Output-Analysen zu beachten. Diese sind in Tabelle 3 dargestellt und wurden im Rahmen des Forschungsvorhabens mit Experten\*Expertinnen des erörtert.

**Tabelle 3: Gegenüberstellung Ökobilanzierung und Input-Output-Analyse**

Ökobilanz	Input-Output-Analyse
Bottom-up-Ansatz	Top-down-Ansatz
Prozessbasierte Analyse	Makroökonomische Analyse
Sachbilanzen	Statistikdaten
Lineare Skalierung zwischen Produktionsmenge und Auswirkungen (bei „attributorial“ Modellierung)	Lineare Skalierung
Hohe Anzahl von Umweltwirkungskategorien	Begrenzte Anzahl von Umweltwirkungskategorien

Quelle: Hauschild (2017)

Tabelle 4 fasst zusammen, welche Erkenntnisse die Recherche zu quantitativen Ergebnissen und methodischen Ansätzen im Hinblick auf die vorläufigen Kriterien für System- und Betrachtungsgrenzen ergeben hat.

**Tabelle 4: Auswertung relevanter Daten- und Informationsquellen mit quantitativen Ergebnissen sowie der jeweiligen methodischen Ansätze im Hinblick auf die Definition von Systemgrenzen**

Kriterium zur Beschreibung von System- und Betrachtungsgrenzen	Erkenntnisse aus der Recherche zu quantitativen Ergebnissen sowie mit Blick auf die anzuwendenden Methoden in den Arbeiten des Forschungsvorhabens
Zeitlicher Bezug	<p><b>Mikroebene:</b> Ein eindeutiger zeitlicher Bezug ist bei zahlreichen quantitativen Ergebnissen nicht erkennbar oder angegeben. Der wichtigste Grund dafür ist, dass ökobilanzielle Angaben zu komplexen Verbraucherprodukten oder Baugruppen aus vielen unterschiedlichen Informationen und Datensätzen zusammengesetzt sind. Weil die Daten nicht aktuell sind, ist die Ökobilanzierung eher ein Blick in die Vergangenheit. Bestenfalls können aktuelle Daten gewonnen und einzelne gezielte Abschätzungen für die Zukunft gemacht werden. Aufgrund der schnell fortschreitenden Entwicklungen und Innovationen im Bereich der Digitalisierung sollte – je nach Komponente – ein „Maximalalter“ für die Daten festgelegt werden.</p> <p><b>Meso- und Makroebene:</b> Der zeitliche Bezug hängt von der Datenverfügbarkeit für die einzelnen Modellkomponenten ab (siehe 2.4.2).</p>
Geografischer Bezug	<p><b>Mikroebene:</b> Ein eindeutiger geografischer Bezug ist bei vielen quantitativen Ergebnissen nicht erkennbar oder angegeben. Dies betrifft insbesondere die Produktvorketten (d. h.</p>

Kriterium zur Beschreibung von System- und Betrachtungsgrenzen	Erkenntnisse aus der Recherche zu quantitativen Ergebnissen sowie mit Blick auf die anzuwendenden Methoden in den Arbeiten des Forschungsvorhabens
	<p>Rohstoffgewinnung und Herstellung). Für die Nutzungs- und Entsorgungsphase lässt sich der geografische Kontext besser ableiten.</p> <p>Das Forschungsvorhaben bezieht sich zwar auf Deutschland, doch z. B. bei der Vorkette (Produktion) ist ein geografischer Schwerpunkt auf einzelnen asiatischen Ländern zu erwarten.</p> <p><b>Meso- und Makroebene:</b> 3 Ebenen:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Nachfrage nach Digitalisierungsprodukten in Deutschland</li> <li>• Produktion von Digitalisierungsprodukten für Deutschland in 5–6 relevanten Volkswirtschaften der Welt</li> <li>• Ressourcengebrauch für die Produktion aus der gesamten Welt</li> </ul>
Lebenszyklusphasen und Wertschöpfungsstufen	<p><b>Mikroebene:</b> Da die Mehrzahl aller quantitativen Ergebnisse aus spezifischen Ökobilanzen stammt, wird meist der gesamte Lebenszyklus von Produkten oder Systemen abgedeckt.</p> <p>Ein sogenannter <i>Cradle-to-Gate</i>-Umfang ist aus Ressourcensicht am wichtigsten und robustesten – besonders wenn der Fokus auf direkten Ressourcenbedarfen liegt. In der Nutzungsphase dominieren meist ausschließlich Energiebedarf und -quelle (Strommix). Über die Entsorgungsphase ist oft wenig bekannt. Jedoch sind Nutzungs- und Entsorgungsphase für die Schnittstelle zwischen den Fallstudien Lebenszyklusdaten und den makroökonomischen Berechnungen/ Simulationen interessant.</p> <p><b>Meso- und Makroebene:</b> <i>Cradle-to-Gate</i>-Erkenntnisse sind am wichtigsten und robustesten. Sie lassen sich im Modell gut abbilden. Wird die Nutzungsphase betrachtet, liegt der Fokus auf dem Energiebedarf. Die Abbildung der Entsorgungsphase ist im Modell schwierig. Das Recycling ist höchstens mit Blick auf die Substitution von Primärrohstoffen interessant.</p>
Ebenen für Umweltwirkungen	<p><b>Mikroebene:</b> Bei Betrachtungen mit quantitativen Ergebnissen stehen Verbraucherprodukte (z. B. Smartphone), Produktsysteme (z. B. Übertragungsnetzwerke, Rechenzentren) und Baugruppen (z. B. Integrierte Schaltkreise/Prozessoren) im Mittelpunkt. Häufig werden aber auch bestimmte Anwendungsfälle analysiert. Beim Blick auf konkrete Produkte oder Produktsysteme sind Ökobilanzdaten am aussagekräftigsten; beim Blick auf Anwendungsfälle ist aufgrund zusätzlicher Annahmen zum Nutzerverhalten die Unsicherheit höher. Vorrangig wird die Mikroebene erörtert; auch Implikationen für die Mesoebene können diskutiert werden, insbesondere qualitativ.</p>
Gestaltungsfelder	<p><b>Meso- und Makroebene:</b> Ökonomische Instrumente sind tendenziell leichter abbildbar als ordnungspolitische Maßnahmen.</p>
Sektor	<p><b>Meso- und Makroebene:</b> Es wird eine vereinfachte, sektorale Abgrenzung der Digitalisierung vorgeschlagen. Die Nachfrage nach Digitalisierungsprodukten ist ein Analysegegenstand, während Änderungen an Produktionsprozessen durch die Digitalisierung (Industrie 4.0) nicht betrachtet werden sollen.</p>

Kriterium zur Beschreibung von System- und Betrachtungsgrenzen	Erkenntnisse aus der Recherche zu quantitativen Ergebnissen sowie mit Blick auf die anzuwendenden Methoden in den Arbeiten des Forschungsvorhabens
Umweltwirkungen	<p><b>Mikroebene:</b> Neben Erkenntnissen zu Ressourcen (oft als aggregierte Ressourcenindikatoren) werden vor allem Kennzahlen zum Treibhausgaspotenzial und Strom- bzw. Energiebedarf angegeben. Input-Output-Tabellen werden pro funktioneller Einheit (z. B. Herstellung eines bestimmten Produkts) erstellt. Die aggregierten Umweltwirkungskategorien sind stark abhängig von verknüpften Vorketten-/Hintergrunddaten. Es wird differenziert zwischen direkten und indirekten (virtuellen) Ressourcenbedarfen/Umweltwirkungen (vgl. <i>Scope</i> 1–3).</p> <p><b>Meso- und Makroebene:</b> Es werden Makroindikatoren zum kumulierten Rohstoffbedarf der Produktion von Digitalisierungsprodukten ermittelt. Dabei gibt es drei relevante Rohstoffkategorien: Erze stehen im Mittelpunkt, daneben fossile Rohstoffe und nichtmetallische Mineralien. Insgesamt lassen sich 16 Rohstoffe unterscheiden.</p>
Datenverfügbarkeit	<p><b>Mikroebene:</b> In mehr als der Hälfte aller relevanten Quellen (56 %) werden die Quelldaten (im Fall von Ökobilanzen sind dies Sachbilanzen/<i>Inventories</i>) teilweise oder vollständig offengelegt. Der Zugang zu repräsentativen Annahmen (z. B. BOM, Kennzahlen) und Hintergrunddaten von Vorketten ist eine wichtige Voraussetzung für die sinnvolle Bearbeitung der Fallstudien und von deren Ergebnissen. Er ist aber nur sehr selten gegeben.</p> <p><b>Meso- und Makroebene:</b> Input-Output-Tabellen und Handelsdaten der OECD sind auf Sektorebene verfügbar, ergänzt durch GLORIA mit mehr Details (aber ebenfalls auf Sektorebene).</p>
Repräsentativität	<p><b>Mikroebene:</b> Die einzelnen Fallstudien sollen möglichst weite Systemgrenzen haben (Telekommunikationsnetz vs. digitales Endgerät).</p> <p><b>Meso- und Makroebene:</b> Die Aggregationsebenen im Modell sind grundsätzlich Sektoren (mit ausgewiesenen Durchschnittswerten – somit repräsentativ). Zur Verwendung der Fallstudienresultate ist ein großes Marktvolumen wichtig, da dann ggf. eine Übertragbarkeit auf den ganzen Sektor möglich ist.</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

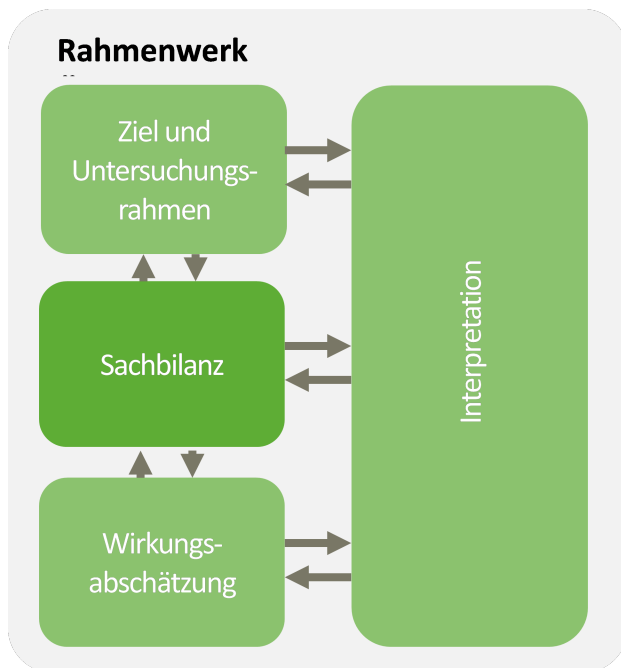
### 3.5.2 Ökobilanzierung und Sachbilanzierung

Die Fallstudien enthalten Sachbilanzierungen und ökobilanzielle Berechnungen, mit denen Lebenszyklusdaten und potenzielle Umweltwirkungen (z. B. Treibhausgasemissionen) einzelner Anwendungsfälle der Digitalisierung erhoben werden. Der folgende Abschnitt beschreibt den grundlegenden Aufbau einer Lebenszyklusanalyse (*engl. Life Cycle Assessment*, kurz LCA) und deren einzelne Schritte. Das Forschungsvorhaben legt den Schwerpunkt auf die Sachbilanzphase der LCA und erhebt damit Lebenszyklusdateninventare, um die Rohstoffintensität und Umweltwirkungen der Digitalisierung zu berechnen.

Die Methode der Ökobilanzierung oder Lebenszyklusanalyse (LCA) analysiert und bewertet Umweltaspekte und -wirkungen während des gesamten Lebenszyklus von Produkten und Dienstleistungen: von der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung (engl. „*cradle*“ für Wiege) über die Herstellung, den Vertrieb und die Verwendung bis hin zum Recycling oder der endgültigen Entsorgung der Materialien (engl. *cradle-to-grave*, also „von der Wiege bis zum Grab“).

Abbildung 13 zeigt die vier grundlegenden Phasen der Methode gemäß den Normen DIN EN ISO 14040/14044: 1) Definition von Zielen, Systemgrenzen und Untersuchungsrahmen; 2) Sachbilanz; 3) Wirkungsabschätzung und Auswertung; 4) Interpretation (Deutsches Institut für Normung, 2021a; 2021b).

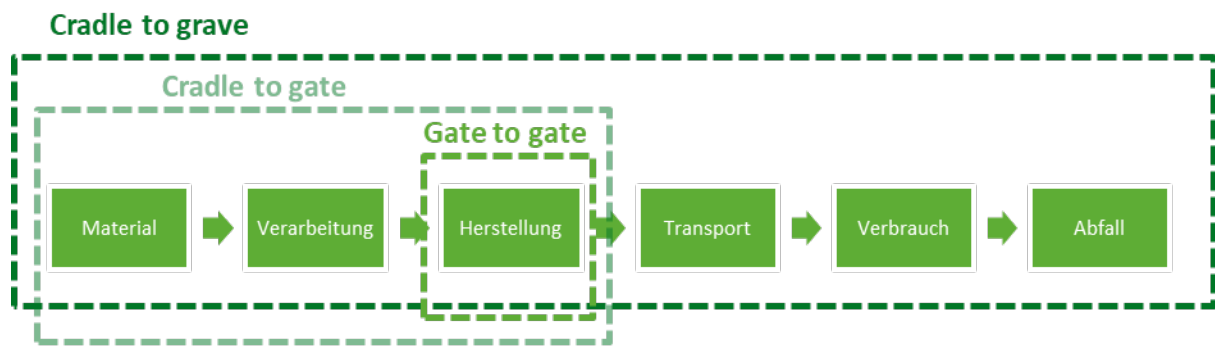
**Abbildung 13: Iterative und standardisierte Phasen der Ökobilanzierung (Lebenszyklusanalyse)**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 in Anlehnung an ISO 14040/44

Zunächst werden Ziel und Geltungsbereich definiert, insbesondere die funktionale Einheit als eine quantitative Referenz des Analysegegenstands. Mögliche Systemgrenzen eines Lebenszyklus sind in Abbildung 14 generisch dargestellt. Es wird grundsätzlich zwischen *cradle-to-grave*, *cradle-to-gate* und *gate-to-gate* unterschieden. Der *cradle-to-grave*-Ansatz bewertet den gesamten Lebenszyklus, der *cradle-to-gate*-Ansatz einen partiellen Lebenszyklus vom Rohstoffabbau bis zum Ausgangstor des Unternehmens und der *gate-to-gate*-Ansatz nur die Umwelt- und Energiebilanzen der Herstellung oder Verarbeitung. Mit den Systemgrenzen werden der geografische Umfang (also die Länder, auf deren Daten die Ökobilanz beruht) und der zeitliche Umfang (also der Zeitraum der Datenerhebung) definiert.

**Abbildung 14: Generische Systemgrenzen einer Ökobilanz**

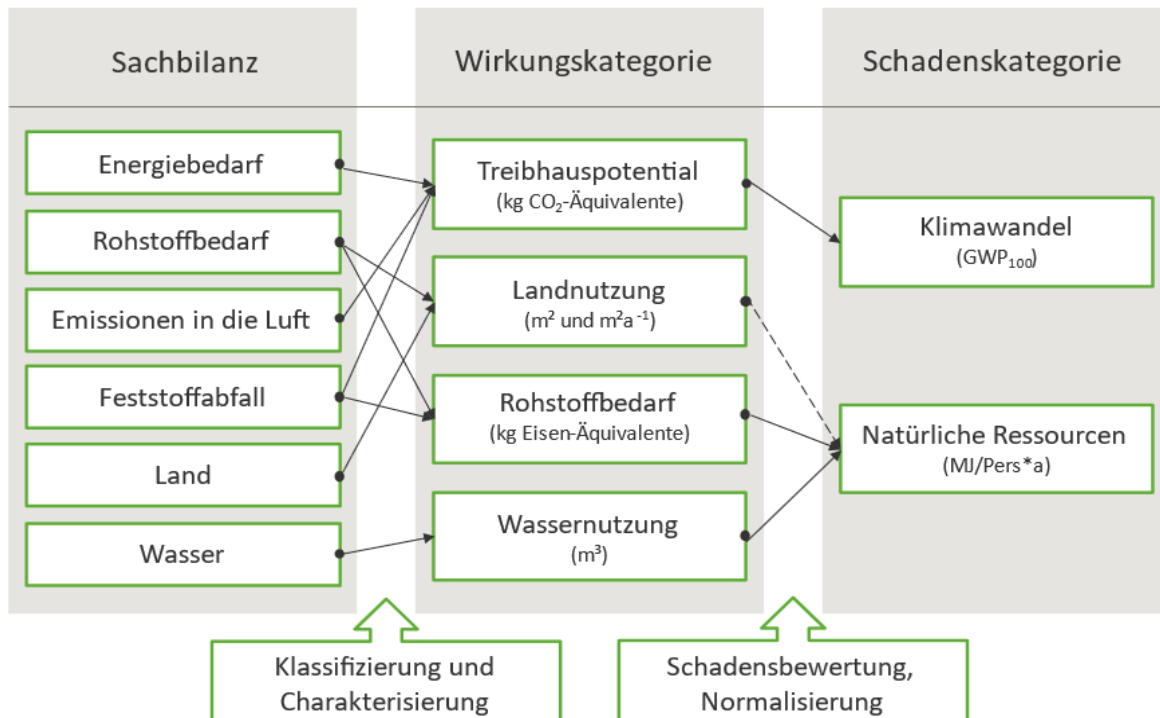


Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Der zweite Schritt ist für das Forschungsvorhaben entscheidend: die Sachbilanzierung oder Inventarisierung. In diesem Schritt werden Informationen über Materialbedarfe, Herstellung, Verpackung, Transport, Verbrauch und Abfallmanagement als Input (Ressourcen) und Output (Emissionen an Luft, Wasser und Boden) innerhalb der definierten Systemgrenzen bewertet. Dies wird als prozessbasierter (oder *Bottom-up*-)Ansatz zur Bestandsmodellierung bezeichnet. Das Lebenszyklusinventar besteht letztlich aus zahlreichen Stoffen bzw. Elementarflüssen (d. h. direkten Wechselwirkungen zwischen Technosphäre und Ökosphäre in Form von chemischen Elementen, die in die Umwelt abgegeben werden, oder Ressourcen, die der Umwelt entnommen werden).

Als dritter Schritt (Wirkungsabschätzung) werden die Einträge der Sachbilanz (z. B. Emissionen in die Luft) in kommunizierbare und vergleichbare Indikatoren (z. B. Treibhausgaspotenzial) übersetzt. Dabei kommen wissenschaftlich fundierte Umweltwirkungsabschätzungsmethoden zum Einsatz. Die Wirkungsabschätzung besteht in der Regel wieder aus mehreren Schritten. Die ersten drei sind in ISO 14040 vorgeschrieben: 1) Definition der Wirkungskategorie – Umweltproblem wird definiert; 2) Klassifizierung – Emissionen eines Produkts werden dem Umweltproblem zugeordnet; 3) Charakterisierung der Schutzgüter. Mit anerkannten Methoden für die Abschätzung von Umweltwirkungen kann somit das Lebenszyklusinventar (*engl. life cycle inventory*) auf eine begrenzte Anzahl an Indikatoren aggregiert werden. Dann lassen sich die jeweiligen Umweltwirkungen auf konkrete Umweltzustände (z. B. Beitrag zum Klimawandel) bewerten.

**Abbildung 15: Kausale Zusammenhänge und Abhängigkeiten zwischen potenziellen Indikatoren und Sachbilanzinformationen**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

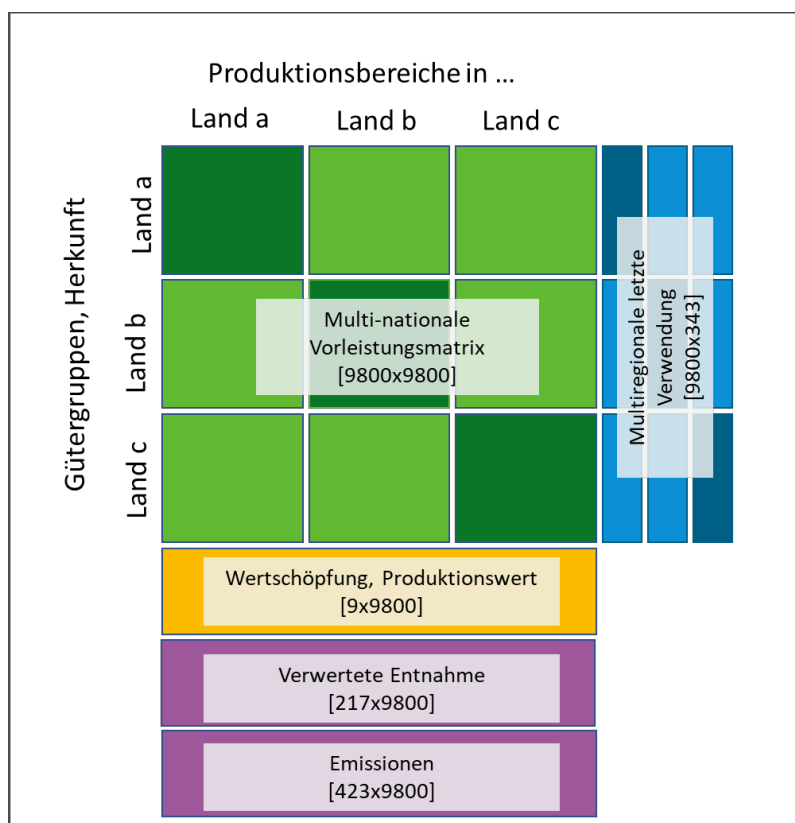
Im letzten Schritt werden die Ergebnisse der Modellierung kritisch interpretiert. Eingang finden die Ergebnisse der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung. Bei der Interpretation müssen Zieldefinition und Geltungsbereich unbedingt berücksichtigt werden, denn sie beeinflussen die Auswahl der Daten und die Annahmen für die Modellierung und Auswertung. Abschließend werden Schlussfolgerungen abgeleitet und Empfehlungen formuliert.

### 3.5.3 Input-Output-Modelle (Makroebene)

#### 3.5.3.1 Von nationalen Input-Output-Tabellen zu globalen EE-MRIO-Datensätzen

Nationale Input-Output-Tabellen zeigen für ein gegebenes Berichtsjahr, wie die verschiedenen Produktionsbereiche einer Volkswirtschaft verflochten sind. Dazu gehört auch der Güteraus-tausch mit der übrigen Welt. Der erste Quadrant (= Vorleistungsmatrix) der IO-Tabelle gibt an, welche Güter aus inländischer Produktion und aus Importen als Vorleistungen in die ver-schiedenen Produktionsbereiche eingeflossen sind. Der zweite Quadrant zeigt die nach Güter-gruppen differenzierte letzte Verwendung (Konsum, Investitionen oder Exporte). Der dritte Quadrant weist die Komponenten der Wertschöpfung (Arbeitnehmerentgelte etc.) sowie die Produktionswerte aus (vgl. Abbildung 16).

Abbildung 16: Aufbau einer nationalen IO-Tabelle und einer globalen IO-Tabelle



Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Globale, multinationale Input-Output-Datensätze –wie die im November 2021 aktualisierte und erweiterte **ICIO**-Datenbasis (*Inter-Country Input-Output*) der OECD (OECD, 2021) – kombinieren die nationalen IO-Tabellen mit weiteren Quellen (insbesondere Handelsstatistiken). So können sie die gesamtwirtschaftlichen Lieferverflechtungen regional weiter untergliedern. Die ersten und zweiten Quadranten von multinationalen Input-Output-Tabellen differenzieren dabei zusätzlich nach Herkunft der (als Vorleistungen oder für die letzte Verwendung) nachgefragten Güter. Weitere Datensätze dieser Art sind **GLORIA** (Global MRIO Lab; Lenzen *et al.*, 2017), **EXIOBASE** (Stadler *et al.*, 2020), **EORA** (Wiedmann *et al.*, 2013) und **WIOD** (Timmer *et al.*, 2015). Mit globalen, multinationalen IO-Datensätzen lassen sich Vorleistungsverflechtungen entlang von globalisierten Wertschöpfungsketten zurückverfolgen. Enthält der IO-Datensatz zudem Informationen zu den Umweltwirkungen (z. B. Treibhausgasemissionen, Rohstoffentnahmen) der Produktionsbereiche, so kann man die globalen Fußabdrücke der letzten Verwendung in einem Land berechnen. Derartige Modelle verwenden oftmals den vorangestellten Zusatz *environmentally extended* („EE“). Abbildung 16 zeigt den Grundaufbau einer nationalen IO-Tabelle und einer um Umweltaspekte erweiterten multinationalen IO-Datenbasis.

Datenanalysen, die auf Auswertungen von Input-Output-Tabellen basieren, werden häufig als Input-Output-Modelle bezeichnet. Dabei lässt sich unterscheiden zwischen:

- (a) Input-Output-Berechnungen, die auf Grundlage einer vorhandenen (historischen) Datenbasis IO-Algorithmen anwenden und so die ökologischen Fußabdrücke der heimischen Endnachfrage abschätzen, und
- (b) dynamischen Projektions- und Simulationsmodellen, die die Entwicklung der Input-Output-Datenstrukturen im Zeitverlauf darstellen.



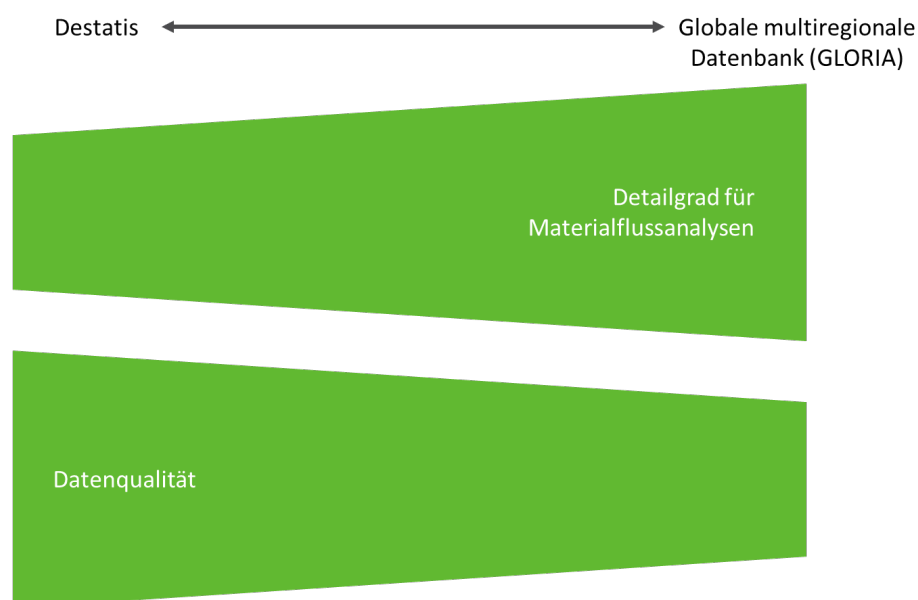
Zur erstgenannten Kategorie zählt das vom Projektpartner GWS entwickelte Modell **GRAM** (*Global Resource Accounting Model*) (Wiebe *et al.*, 2012). Es ermöglicht u. a. die Berechnung des Rohstoffbedarfs für Konsum und Investitionen (in Deutschland) – sowohl aggregiert für die gesamte Volkswirtschaft als auch differenziert für die (Endnachfrage nach) einzelnen Gütergruppen. Zum Beispiel bilden GRAM-Modellierungen in diesem Forschungsvorhaben auf Grundlage des Datensatzes EXIOBASE (Stadler *et al.*, 2020) die Basis für Berechnungen von Biomasse-Fußabdrücken, die nach Herkunftsländern und -regionen differenziert sind und für das Monitoring der deutschen Bioökonomie dienen (Bringezu *et al.*, 2019).

Zur zweitgenannten Kategorie zählen beispielsweise die Modelle **PANTA RHEI** (Lehr *et al.*, 2011; 2019) und **GINFORS**<sup>22</sup> (Lutz *et al.*, 2010; Distelkamp & Meyer, 2018). Das Modell PANTA RHEI untersucht, welcher langfristige Strukturwandel in der wirtschaftlichen Entwicklung sowie in den umweltökonomischen Interdependenzen in Deutschland stattfindet. Das ist auch die Aufgabe von GINFORS, jedoch aus einer multinationalen Perspektive.

GINFORS-E hingegen ist ein dynamisches, ökonometrisches Modell weltwirtschaftlicher Zusammenhänge. Es ist primär für die Analyse von ökonomischen sowie energie- und klimapolitischen Fragestellungen konzipiert. Für die Analyse von Materialflüssen fehlt jedoch insbesondere ein hinreichender Detailgrad bei den unterschiedenen Wirtschaftszweigen. Zudem geben die von GINFORS-E genutzten Datenquellen keine Auskunft über die genutzte Entnahme von biotischen und abiotischen Rohstoffen.

Das neu konzipierte Modell GRAMOD nutzt im Kern die Methodik von GRAM zur Abschätzung von Materialflüssen und weiteren Fußabdrücken der heimischen Endnachfrage. Dazu kommt die GINFORS-Modellphilosophie zur Projektion der wirtschaftlichen Dynamik sowie der direkten Umweltwirkungen (inländische Entnahme von Rohstoffen, CO<sub>2</sub>-Emissionen der Wirtschaftsbereiche), jeweils für 34 Länder und Regionen der Welt.

**Abbildung 17: Zielkonflikt zwischen Detailgrad und Datenqualität**



Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

<sup>22</sup> Eine methodische Beschreibung des Modells GINFORS findet sich unter anderem im „Modelling Inventory and Knowledge Management System of the European Commission (MIDAS)“. Siehe hierzu <https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-ginfors-e> (Stand: 01.03.2022).

Für eine Analyse der Rohstoffinanspruchnahme durch das „System Digitalisierung“ in Deutschland reicht ein nationales EE-IO-Modell nicht aus. Denn wie Kapitel 0 noch näher beschreiben wird, stammen viele in Deutschland verwendete IKT-Produkte aus Ostasien und Nordamerika. Daher ist ein hinreichend solides Abschätzungsmodell für Deutschland nur dann möglich, wenn die Produktionsstrukturen in diesen Lieferländern bekannt sind.

Ein weiterer Aspekt, der sich erheblich auf die Qualität des Abschätzungsmodells auswirken kann, sind die Klassifikationsmerkmale der angewandten Datengrundlagen. Besonders wichtig ist das Aggregationsniveau in den Meldungen zu extrahierenden Sektoren und Rohstoffkategorien. So kennt die deutsche IOT nur einen Sektor, der abiotische Rohstoffe extrahiert<sup>23</sup>. Die IO-Tabellen der OECD differenzieren den Bergbau zumindest nach Energieträger und sonstigem Bergbau. Speziell für umweltökonomische multiregionale Datenbanken wie z. B. EXIOBASE ist die Granularität der extrahierenden Sektoren am höchsten: Es gibt 19 Teilbereiche der Land- und Forstwirtschaft sowie Fischerei und 23 Teilbereiche des Bergbaus. Das ist ein Grund dafür, dass sich in den letzten Jahren EXIOBASE (neben EORA) als internationale Standard-Datenbank zur Abschätzung von gesamtwirtschaftlichen Fußabdruck-Indikatoren etabliert hat. Doch trotz dieser positiven Aspekte von EXIOBASE bringen die Input-Output-Strukturen von EXIOBASE im Vergleich zu IO-Tabellen von Destatis oder der OECD auch erhebliche Qualitätseinbußen mit sich. Es gibt also bei den potenziellen Datengrundlagen für das Abschätzungsmodell einen Zielkonflikt zwischen dem Detailgrad für Materialflussanalysen und der Datenqualität. Er ist in Abbildung 17 visualisiert.

Das in diesem Vorhaben entwickelte Modell **GRAMOD** lässt sich als Zwischenstufe von GRAM und GINFORS-E einordnen. Im Gegensatz zu GRAM ermöglicht GRAMOD nicht nur statische Analysen von Materialflüssen zwischen 2000 und 2020 und weiterer Fußabdrücke der heimischen Endnachfrage. GRAMOD schreibt vielmehr auch alle Daten, die **für die Fußabdruck-Berechnungen notwendig sind, dynamisch** in die Zukunft vor.

### 3.5.4 Abgrenzung des „Systems Digitalisierung“ aus Input-Output-Perspektive

Grundsätzlich sind bei vier Dimensionen des Deutschland-Modells „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“ Abgrenzungen nötig:

1. **Funktional:** Die Verwendung welcher Güter und Dienstleistungen wird dem „System Digitalisierung“ zugerechnet?
2. **Institutionell:** Welches sind die (verwendenden) Sektoren? Welche methodischen Herausforderungen bringt die Abschätzung von Rohstoffinanspruchnahmen nach Sektor mit sich?
3. **Räumlich:** Welche Produktionssysteme (Länder) sind zu betrachten, wenn alle relevanten Vorketten im In- und Ausland einbezogen werden sollen, die für das „System Digitalisierung“ in Deutschland relevant sind?
4. **Stofflich:** Welche Rohstoffe (und Treibhausgase) lassen sich auf Grundlage der verfügbaren Datenbasis differenzieren?

In den nachfolgenden Kapiteln wird die Abgrenzung in diesen vier Dimensionen diskutiert.

---

<sup>23</sup> Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden.

### Funktionale Abgrenzung des Systems „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“

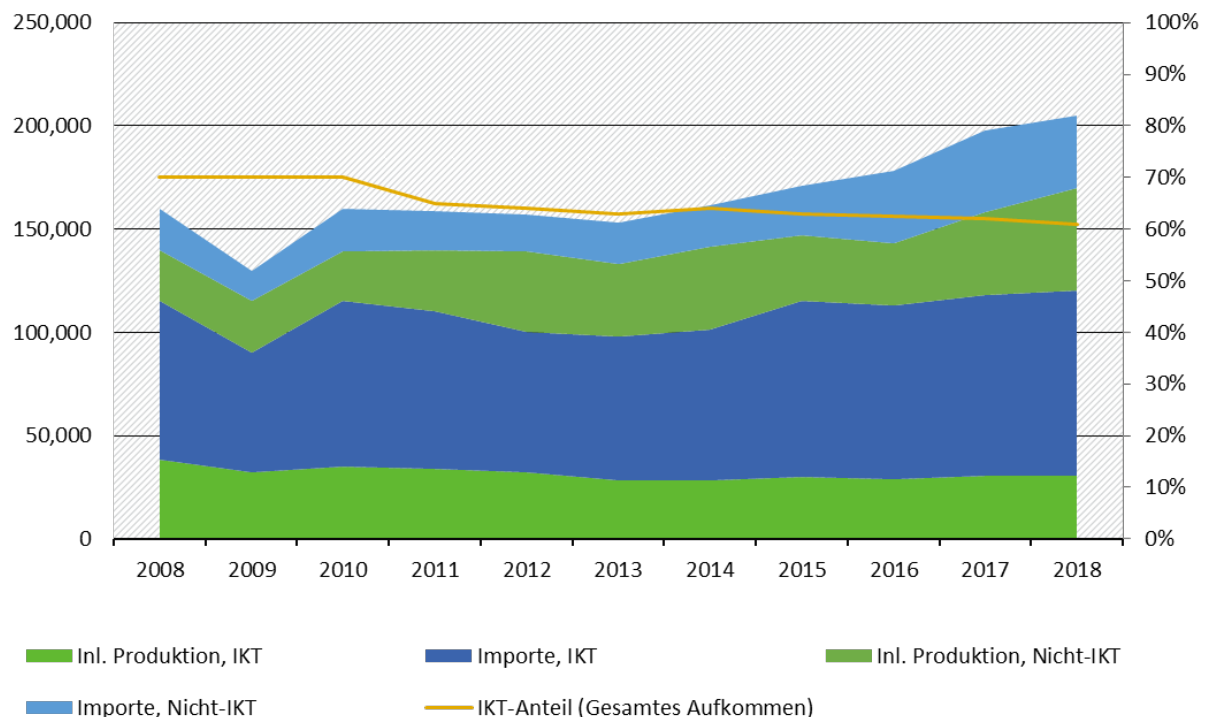
Die international harmonisierten Klassifikationen nach Wirtschaftszweigen (WZ) und nach Gütern (CPA) kennen keinen eindeutig abgegrenzten Bereich „Digitalisierung“. Allerdings gibt es eine auf WZ/CPA beruhende Abgrenzung für den Bereich „Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)“. Die in Tabelle 5 aufgeführte Übersicht derjenigen Wirtschaftszweige (Dreisteller), welche insgesamt dem IKT-Bereich zugeordnet werden, ist den Metadaten der Datenbank Eurostat zum IKT-Sektor (isoc\_se) entnommen.

**Tabelle 5: Abgrenzung des Digitalisierungssektors in den gesamtwirtschaftlichen Bewertungen**

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

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 in Anlehnung an OECD (2007)

**Abbildung 18: IKT-Güter als Teil der Gütergruppe DV-Geräte, elektronische und optische Erzeugnisse (CPA 26)**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023  
 Datengrundlagen: Statistisches Bundesamt: Beschäftigte und Umsatz der Betriebe im Verarbeitenden Gewerbe: Deutschland, Jahre, Wirtschaftszweige (WZ2008 Zwei-/Drei-/Viersteller), Werte (Stand: 21.09.2021) und Statistisches Bundesamt: Aus- und Einfuhr (Außenhandel): Deutschland, Jahre, Warensystematik, Werte (Stand: 17.11.2021).

Die Forschenden können auf Grundlage dieser offiziellen Definition zur Abgrenzung des nationalen Systems „Digitalisierung“ aus funktionaler Sicht folgendes Zwischenergebnis ableiten:

**Wenn im Folgenden im Hinblick auf die makroökonomischen Berechnungen und Simulationen von Ressourcenintensitäten der Digitalisierung gesprochen wird, so meint dies globale Stoffströme und CO<sub>2</sub>-Emissionen, die mit der inländischen Verwendung von IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen einhergehen.**

Dieses Zwischenergebnis führt zu Herausforderungen bzw. Unschärfen bei den Berechnungen, denn die IO-Datengrundlagen beruhen auf Zweistellern. Das bedeutet: Es finden sich Angaben zur Verwendung von „DV-Geräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen (CPA 26)“ insgesamt, nicht aber zu den fünf Arten von IKT-Produkten gemäß Tabelle 5. Dieselben Schwierigkeiten bestehen auch bei den IKT-Dienstleistungen, die unter „Großhandelsleistungen (CPA 46)“, „Dienstleistungen des Verlagswesens (CPA 58)“, „Informationsdienstleistungen (CPA 63)“ und „Reparaturarbeiten an DV-Geräten und Gebrauchsgütern (CPA 95)“ eingeordnet sind.

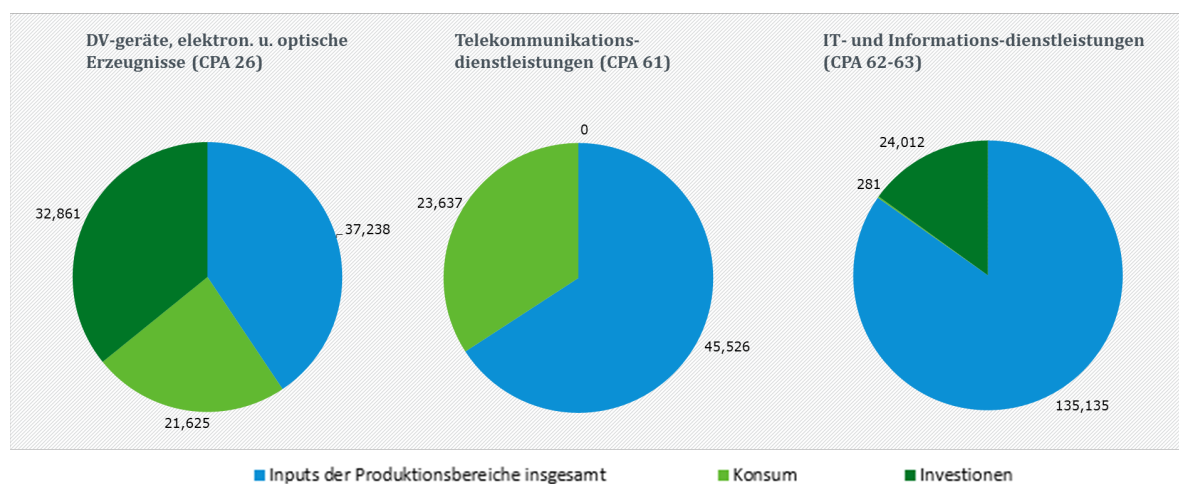
Im Fall der IKT-Güter als Teil der Gütergruppe „DV-Geräte, elektronische und optische Erzeugnisse (CPA 26)“ verdeutlicht Abbildung 18, wie stark die entstehende Unschärfe ist.<sup>24</sup> Die Aufteilung der inländischen Produktion auf IKT- und Nicht-IKT-Güter erfolgte für diese Analyse auf Grundlage der Statistik „Monatsberichte des Verarbeitenden Gewerbes“. Die Aufteilung der Importe geht zurück auf Auswertungen der Außenhandelsstatistik (GP2019 Viersteller). Die Werte für die gesamte Produktion und die gesamten Importe der Gütergruppe sind abgestimmt auf die entsprechenden Angaben in den IO-Tabellen des Statistischen Bundesamtes. Es zeigt sich, dass der Anteil von IKT-Gütern am gesamten Aufkommen der Gütergruppe in den Jahren 2010 bis 2018 zwischen 60 und 70 % betragen hat. Außerdem ist der IKT-Anteil bei den importierten Gütern mit 75 bis 79 % deutlich höher als bei der inländischen Produktion.

### Institutionelle Abgrenzung des Systems „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“

Durch die institutionelle Abgrenzung wird festgelegt, welche Verwender von IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen im IO-Bewertungsansatz erfasst werden. Hierbei ist grundsätzlich zu unterscheiden zwischen der intermediären Verwendung durch verschiedene Wirtschaftszweige und der finalen Verwendung in Form von Konsum oder Investitionen. Wie sich die inländische Verwendung in Deutschland im Jahr 2018 bei den drei zentralen Gütergruppen mit IKT-Bezug verteilt hat, zeigt Abbildung 19. Der hohe Anteil der Verwendung für intermediäre Zwecke verdeutlicht aus Sicht der Forschungsnehmer, dass es nicht ausreicht, die makroökonomischen Berechnungen auf den inländischen Rohstoffbedarf für Konsum und Investitionen (RMC) von IKT-Gütern und Dienstleistungen zu beschränken. Vielmehr sind auch die Umweltintensitäten von IKT-Gütern und Dienstleistungen zu berücksichtigen, die in andere Konsum- und Investitionsgüter eingeflossen sind. Dabei müssen Doppelzählungen vermieden werden.

### Abbildung 19: Verwendungsstruktur von IKT-relevanten Gütergruppen in Deutschland

Aufteilung der inländischen Verwendung auf intermediäre Inputs der Produktionsbereiche, Konsumausgaben und Investitionen für drei ausgewählte Gütergruppen in Deutschland, 2018  
in Mio. €



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

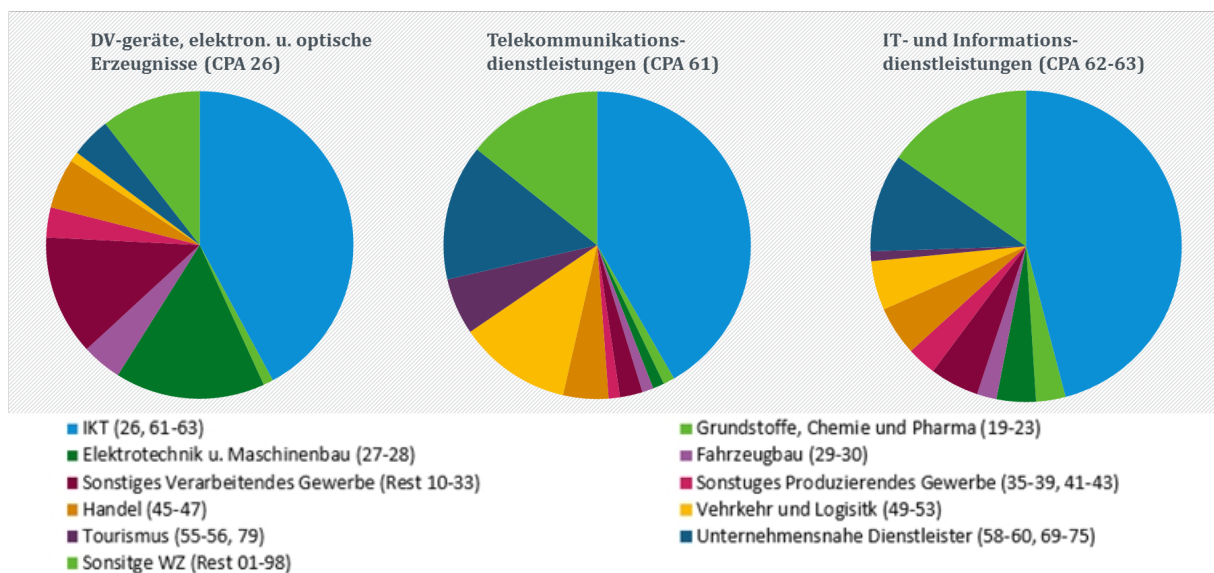
Datengrundlagen: Statistisches Bundesamt (2021a) Input-Output-Rechnung, 2018 (Revision 2019, Stand: August 2020), erschienen am 31. März 2021, ergänzt am 30.07.2021 (Tabellenteile 2, 3 und 4).

<sup>24</sup> Auch im Hinblick auf Optionen für eine empirische Fundierung von IKT-Anteilen bei den vier fraglichen Dienstleistungsgütergruppen (CPA 46, CPA 58, CPA 63 und CPA 95) wurden erste Recherchen und Analysen durchgeführt, die aber erst im Rahmen der konkreten Arbeiten an den makroökonomischen Berechnungen finalisiert werden können.

Doch welche Sektoren setzen die meisten IKT-Güter und IKT-Dienstleistungen als intermediäre Güter in ihrem Produktionsprozess ein? Die nachstehende Abbildung illustriert eine erste Auswertung auf Grundlage der IO-Tabelle für Deutschland für das Jahr 2018. Die Untergliederung der Sektoren ist angelehnt an die Forschungsarbeiten des Instituts der deutschen Wirtschaft (IW) zum Digitalisierungsindex (Büchel *et al.*, 2021). Es zeigt sich, dass bei allen drei betrachteten Gütergruppen der größte Anteil auf die intermediäre Verwendung in der IKT-Branche selbst entfällt. Bei der Gütergruppe „DV-Geräte, elektronische und optische Erzeugnisse (CPA 26)“ sind auch die anderen Bereiche des Verarbeitenden Gewerbes bedeutende Verwender. Bei den „Telekommunikationsdienstleistungen (CPA 61)“ und den „IT- und Informationsdienstleistungen (CPA 62-63)“ hingegen kommt den Dienstleistungssektoren eine größere Bedeutung zu.

**Abbildung 20: Struktur der intermediären Verwendung von IKT-relevanten Gütergruppen in Deutschland**

**Aufteilung der inländischen Verwendung auf intermediäre Inputs der Produktionsbereiche, Konsumbereiche, Konsumausgaben und Investitionen für drei ausgewählte Gütergruppen in Deutschland, 2018 in Mio. €**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023  
 Datengrundlagen: Statistisches Bundesamt (2021a) Input-Output-Rechnung, 2018 (Revision 2019, Stand: August 2020), erschienen am 31. März 2021, ergänzt am 30.07.2021 (Tabellenteile 2, 3 und 4).

Aus diesen Befunden lässt sich als Zwischenergebnis für die Abgrenzung des nationalen Systems „Digitalisierung“ aus **institutioneller** Sicht Folgendes ableiten:

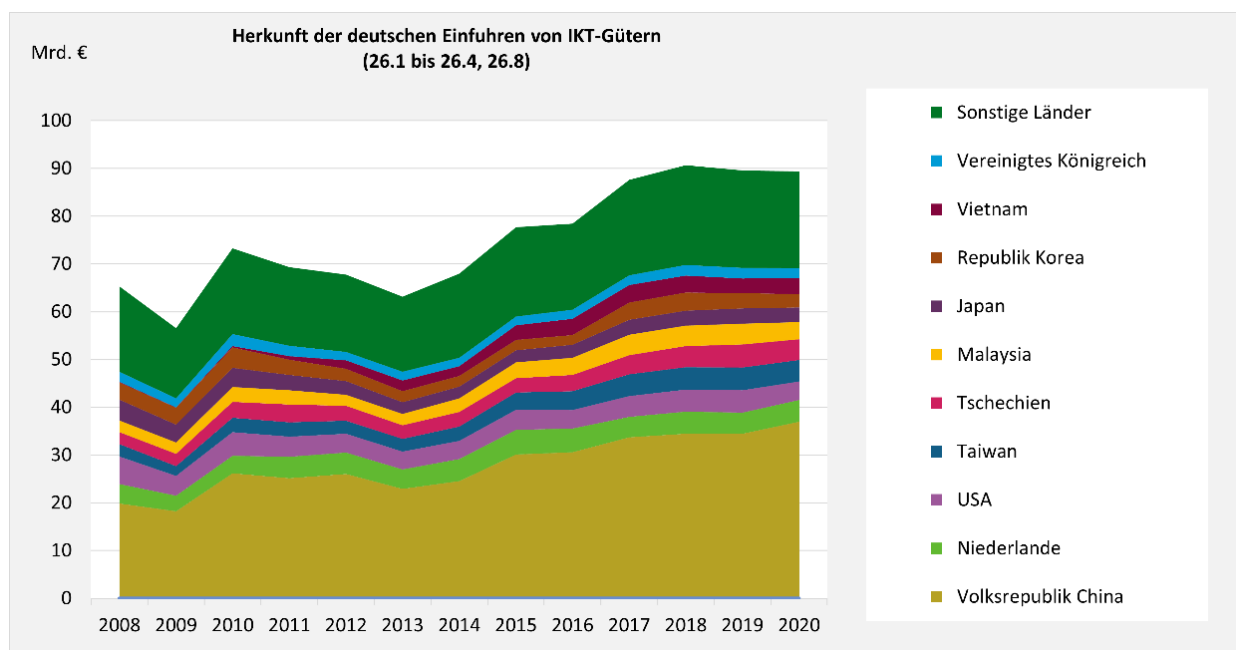
Die makroökonomischen Berechnungen und Simulationen bewerten nicht nur die Umweltintensitäten der letzten Verwendung von Digitalisierungsgütern und -dienstleistungen. Ergänzend wird produktionsseitig ebenfalls der mit der Digitalisierung einhergehende Bedarf der deutschen Wirtschaft zur Verwendung von IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen als Vorleistungsinputs entlang globaler Lieferketten quantifiziert.

### Räumliche Abgrenzung des Systems „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“

Die räumliche Abgrenzung der makroökonomischen Berechnungen und Simulationen ist gemäß Leistungsbeschreibung zum Forschungsvorhaben klar vorgegeben: Es sollen der **globale** Rohstoffbedarf und die **globalen** Treibhausgasemissionen für die Digitalisierung **in Deutschland** bestimmt werden.

Wie bereits im vorangehenden Kapitel gezeigt wurde, stammt ein Großteil der in Deutschland verwendeten IKT-Güter aus ausländischer Produktion. Das bedeutet: Eine solide Input-Output-basierte Modellierung der Systemzusammenhänge ist nur möglich, wenn die Inputstrukturen in den Ländern bekannt sind, aus denen die in Deutschland verwendeten IKT-Güter stammen.

**Abbildung 21: Herkunft der deutschen Importe von IKT-Gütern**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023  
 Datengrundlagen: Statistisches Bundesamt: Aus- und Einfuhr (Außenhandel): Deutschland, Jahre, Länder, Warensystematik, Werte [https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Aussenhandel/\\_inhalt.html](https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Aussenhandel/_inhalt.html), (Stand: 15.09.2021).

Abbildung 21 zeigt eine entsprechende Auswertung der Außenhandelsstatistik. Sie stellt die zehn wichtigsten und die sonstigen Länder dar, aus denen im Zeitraum 2008 bis 2020 die deutschen Importe von IKT-Gütern stammten. Es zeigt sich, dass China bei IKT-Gütern das mit Abstand wichtigste Herkunftsland ist. Zum zweitwichtigsten Herkunftsland, den Niederlanden, sei angemerkt, dass die Außenhandelsstatistik nicht um Reexporte bereinigt ist. Folglich handelt es sich bei den Einfuhren aus den Niederlanden oft um Waren, die lediglich über Rotterdam nach Deutschland gelangt sind, ohne aber in den Niederlanden produziert worden zu sein.

Als Zwischenergebnis für die **räumliche** Abgrenzung des nationalen Systems „Digitalisierung“ lässt sich aus diesen Befunden Folgendes ableiten:

Für die makroökonomischen Berechnungen und Simulationen muss man nicht nur die Produktionsstrukturen in Deutschland, sondern auch jene in den wichtigsten Herkunftsländern der in Deutschland verwendeten IKT-Güter (China, USA, Taiwan, Tschechien, Malaysia, Japan und Korea) kennen.

### 3.6 Zusammenfassung und Fazit System- und Betrachtungsgrenzen

Die konzeptionelle Einordnung und die identifizierten Leitmodelle für die Definition des „Systems Digitalisierung“ haben gezeigt: Die Begriffe „Digitalisierung“ und „IKT“ werden in der einschlägigen Literatur weitgehend synonym verwendet bzw. IKT bildet vielfach den besten gemeinsamen Nenner. Dabei wird deutlich, wie komplex das „System Digitalisierung“ ist, das zahlreiche und ganz unterschiedliche digitale Lösungen und Anwendungsbereiche umfasst.

Daraus folgt die Notwendigkeit, die IKT-Perspektive zu erweitern. Dies betrifft einerseits fall-spezifische notwendige Zusatzausstattung oder Software und andererseits die Einbeziehung von Nutzungsverhalten bzw. Anwendungskontext. So werden neben den direkten Umwelt- und Ressourceneinflüssen auch die indirekten Effekte betrachtet, was zu einer ganzheitlichen und wenn möglich quantitativen Beurteilung des „Systems Digitalisierung“ führt. Darüber hinaus wurde aber auch klar: Nur bei hohem Abstraktionsgrad können für die Fallstudien (Mikroebene) und für die makroökonomischen Berechnungen und Simulationen (Meso-/Makroebene) gemeinsame System- und Betrachtungsgrenzen gelten.

Die Konkretisierung der gemeinsamen System- und Betrachtungsgrenzen für die Mikro- und Makroperspektive hängt wesentlich von den „Bottlenecks“ ab, die aus Datenverfügbarkeiten und Datenstrukturen resultieren (methodische Betrachtungsgrenzen). Zu bedenken ist auch, dass die Ansprüche an die System- und Betrachtungsgrenzen per definitionem unterschiedlich sind: Aus Makroperspektive sollen die Grenzen die Digitalisierung und ihre Teilbereiche möglichst vollständig erfassen. Die Mikroperspektive, wie Fallstudien sie einnehmen, kann hingegen per se nicht das Ziel verfolgen, die Digitalisierung vollständig abzubilden. Als Basis für die Auswahl der Fallstudien dient vielmehr der erarbeitete Referenzrahmen (in Kombination mit weiteren Aspekten wie insbesondere der Datenverfügbarkeit). Die Fallstudien in ihrer Gesamtheit sollen möglichst viele Teilbereiche (Ausgangs- oder Zielsektoren) der Digitalisierung abbilden.

Betrachtungsgrenzen, die sich aus den festgelegten, auf Meso- und Makroebene betrachteten Sektoren und Untersektoren ergeben, können verortet und im Kontext des Gesamtsystems interpretiert werden. Ein wichtiges Element dieser Systematisierung sind die jeweiligen digitalen Technologien (z. B. spezifische Software oder Zusatzausstattung wie Sensoren für IKT). Ausschlaggebend für den Ressourcenbedarf, den die Lebenszykluseffekte der jeweiligen IKT und die Hardware verursachen, sind letztlich etablierte sowie neue und zukünftige Technologien und Anwendungen sowie deren Nutzungsmuster. Dabei sind die Abhängigkeiten keineswegs linear oder direktional, sondern nichtlinear und reziprok oder gar diffus (z. B. können Innovationen im Bereich der Hardware gänzlich neue Technologien und Anwendungsfelder erschließen). Da das System an sich komplex ist, lassen sich einzelne Wechselbeziehungen nur innerhalb eines Anwendungsfalls genauer eruieren. Die hier erarbeiteten konzeptionellen und methodischen System- und Betrachtungsgrenzen müssen daher für die Mikroebene fallspezifisch im Detail ausgestaltet werden. Die konzeptionelle Perspektive aus Sektoren, Technologien und IKT bildet dabei die Leitplanken. In diesem Rahmen müssen konkrete Produkte (IKT-Hardware), Prozesse und Anwendungen sowie räumliche und zeitliche Betrachtungsgrenzen definiert werden. Nur so sind eindeutige Zuordnungen des Anwendungsfalls auf Sachbilanzebene machbar.

Aus den methodischen Diskussionen für die makroökonomischen Berechnungen und Simulationen wurde klar, dass die makroökonomischen Analysen dieses Vorhabens auf Input-Output-Modellierungen beruhen werden. Eine weitere Erkenntnis war, dass die Datenverfügbarkeiten und Klassifikationen, die für diese Art der Modellierung vorhanden sind, die System- und Betrachtungsgrenzen entscheidend beeinflussen. Die makroökonomische Modellierung des „Systems Digitalisierung“ zielt darauf ab, die globalen Stoffströme der inländischen Verwendung von IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen zu erfassen. Neben Konsum und Investitionen von



IKT-Gütern und -Dienstleistungen sind dabei auch Vorleistungsverwendungen Gegenstand der Analyse.

Durch die funktionale Festlegung auf IKT-Güter und Dienstleistungen stimmen die Systemgrenzen der makroökonomischen Analysen mit offiziellen statistischen Wirtschaftsklassifikationen überein. Die für Modellierungszwecke verfügbaren Input-Output-Statistiken berichten grundsätzlich auf der Ebene von Zweistellern. Die amtliche Klassifikation der IKT-Güter und -Dienstleistungen basiert jedoch zum Teil auf Dreistellern. Für diese Dreisteller muss daher im weiteren Projektverlauf abgeschätzt werden, wie sich ihre Anteile am zugehörigen Zweisteller-Aggregat entwickeln werden.

## 4 Fallstudien Lebenszyklusdaten

Die folgenden Ausführungen fassen die Arbeiten zu den Fallstudien Lebenszyklusdaten zusammen und sollen den Leser\*innen einen Überblick über die Kernergebnisse der Arbeiten zu den Lebenszyklusdaten vermitteln.

**Umfangreichere Informationen zur detaillierten Herleitung und Anwendung der Methodik sind in einem eigenen Anhang veröffentlicht (Abraham *et al.*, 2023b<sup>25</sup>).**

Gemäß Auftrag sollten auf Mikroebene beispielhaft die Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland analysiert werden. Es sollten Fallstudien für insgesamt zehn typische digitale Produkte, Technologien, Infrastrukturen etc. durchgeführt werden.

Ziel waren die Berechnung und Diskussion der Rohstoffintensität (Indikator kumulierter Rohstoffaufwand bzw. *Material Footprint*) sowie weiterer für die Digitalisierung relevanter Indikatoren (neben Ressourcenindikatoren auch der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck).

Dabei sollten jeweils die folgenden Aspekte analysiert, diskutiert und aufbereitet werden:

- ▶ Lebenszyklusdaten (Sachbilanzebene) sowie Berechnungen zum kumulierten Rohstoffaufwand bzw. *Material Footprint* (Herstellung, Betrieb, ggf. Entsorgung), einschließlich Energie.
- ▶ Ausgewählte Umweltwirkungen (u. a. Treibhausgaspotenzial).
- ▶ Verwendung von sogenannten „kritischen Rohstoffen“ bzw. von Edel- und Sondermetallen bzw. Technologiemetallen; Diskussion quantitativer Angaben, soweit Informationen verfügbar sind.
- ▶ Bedeutung der jeweiligen Produkte oder Technologien (Fallstudie) für den Bereich („Sektor“) Digitalisierung (gegenwärtige Bedarfe, zukünftige Bedarfe bzw. Prognosen).
- ▶ Mögliche Umweltentlastungspotenziale (ausgewählte direkte, indirekte und systemische Effekte).

Bei der Bearbeitung der genannten Aspekte konnte auf Vorarbeiten zur Bestandsaufnahme und den System- und Betrachtungsgrenzen wie folgt aufgebaut werden:

- ▶ Der für das Vorhaben eingegrenzte Begriff der Digitalisierung wurde auch für die Fallstudien herangezogen.
- ▶ Es wurde darauf geachtet, dass sich digitale Endgeräte, die in der analysierten Literatur omnipräsent sind, auch in den untersuchten Produktsystemen der Fallstudien wiederfinden.
- ▶ Mit Blick auf die Bestandsaufnahme wurde das in den Fallstudien verwendete Indikatoren-Satz so aufgebaut, dass sowohl Indikatoren erhoben werden, die den aktuellen Wissensstand ergänzen, als auch solche, die sich für einen Abgleich mit bestehenden Erkenntnissen eignen.
- ▶ Die Ergebnisse der Fallstudien wurden anhand der Erkenntnisse eingeordnet, die in der Recherche zu quantitativen Vorarbeiten gewonnen wurden.

---

<sup>25</sup> Vgl. [www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen](http://www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen) (Stand: 31.12.2023).

## 4.1 Auswahl und Priorisierung der Fallstudien

Auswahl, Priorisierung und Gestaltung der Fallstudien sind Ergebnis eines mehrstufigen Prozesses.

**1. Vorauswahl (Top-down):** In diesem Schritt erfolgte in Anlehnung u. a. an nationale, europäische und internationale Rahmenwerke eine Vorauswahl von wesentlichen Untersuchungsgegenständen.

**2. Konkretisierung und Priorisierung (Bottom-up):** In diesem Schritt wurden weitere einschlägige Auswahlkriterien entwickelt und auf die Vorauswahl angewandt. Auf Basis dieser Multi-Kriterien-Analyse folgte eine Priorisierung der Fallstudien, die das „System Digitalisierung“ und dessen Ressourcenintensität gut repräsentieren.

**3. Finale Festlegung:** Für die schlussendliche Festlegung der zu bearbeitenden Fallstudien erörterten Experten\*Expertinnen auf einem Projekttreffen im Januar 2022 die priorisierte Liste. Sie gingen einerseits auf die bestehenden Vorschläge ein und sprachen andererseits auch mögliche weitere Fallstudien an.

Die wesentlichen **Kriterien zur Auswahl der Fallstudien** waren:

- ▶ Die Fallstudien sollten für die Digitalisierung beispielhaft und relevant sein.
- ▶ Die Fallstudien sollten so gewählt werden, dass sich wichtige Produkte und Technologien aus dem Bereich der Digitalisierung wiederfinden.
- ▶ Es wurde in den Diskussionen des Vorhabens beschlossen, sich in den Fallstudien auf digitale Anwendungsfälle zu konzentrieren, nicht aber auf einzelne Produkte, Technologien etc. Diese Perspektive umfasst Informations- und Kommunikationstechnologien und weitere Hardware in Verbindung mit Software und/oder Technologien, die einen konkreten Nutzen oder Service bieten. Sie hat den Vorteil, einen greifbaren Bezug zum Alltag der Lesenden und zur Nutzung solcher Services herzustellen.
- ▶ Der Schwerpunkt lag auf digitalen Anwendungen bei Endverbrauchenden bzw. Endanwendenden, da der Industrie und Business-to-Business-Bereich laut Projektauftrag weniger im Mittelpunkt stehen sollte und bereits Gegenstand anderer Forschungsvorhaben ist (Stichwort „Industrie 4.0“).
- ▶ Es sollten oder konnten lediglich solche Anwendungsfälle behandelt werden, für die entsprechende Daten verfügbar sind (siehe Kapitel 2).
- ▶ Jede Fallstudie sollte einen konkreten Anwendungsbezug haben. Jeder Anwendungsfall umfasst dabei sowohl IKT und weitere Hardware in Verbindung mit einer Software und/oder Technologie für einen konkreten Nutzen oder Service. Je nach Anwendungsfall konnten auch mehrere physische Produkte (z. B. digitale Endgeräte oder digitale Infrastrukturen) und Technologien Thema sein. Es sollten vielfältige Anwendungsfälle ausgewählt werden.
- ▶ Die Auswahl der Fallstudien sollte Hinweise für die weiteren Arbeitsschritte im gegenständlichen Vorhaben geben (speziell für makroökonomische Berechnungen und Simulationen).

Die endgültige Fallstudienauswahl (siehe nachstehende Tabelle 6) berücksichtigt die genannten Kriterien und die Diskussion im gegenständlichen Forschungs-Konsortium und mit dem Auftraggeber (UBA).

**Tabelle 6: Liste der Fallstudien für die Analyse der Ressourcenintensität auf Mikroebene mit Themengebiet, spezifischem Anwendungsfall und Betrachtungsgegenstand**

Themengebiet	Spezifischer Anwendungsfall und Betrachtungsgegenstand
Videokonferenz	Online-Videokonferenz als Bestandteil des Homeoffice
Smart-Home-System	Energiemanagementsystem für Gebäude
Digitale Medien	Lesen von Nachrichten auf mobilen Endgeräten
Onlinehandel	„E-Grocery“: Onlineeinkauf und Lieferung von Lebensmitteln
Vernetzter Individualverkehr	Carsharing
Kryptowährung	Betrieb der Kryptowährung Bitcoin auf der Blockchain
Peer-to-Peer-Plattformen	Handel über C2C-Online-Plattformen
E-Sport	Kompetitive Onlinespiele mit Streaming
3D-Druck	Private Herstellung von Kunststoffteilen
E-Health	Digitale Fitness unterstützt durch Endgerät und Software

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

## 4.2 Vorgehensweise bei der Berechnung der Ressourcenintensität und weiterer Indikatoren

### 4.2.1 Allgemeines Vorgehen

Die Vorgehensweise für die Berechnung der Ressourcenintensität und weiterer Indikatoren in den zehn ausgewählten Anwendungsfällen orientiert sich grundsätzlich an den Schritten einer Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040/44. So wurden für jede Fallstudie Systemgrenzen festgelegt, eine Untersuchungseinheit definiert und unter Berücksichtigung der Systemgrenzen eine Sachbilanz mit entsprechenden Inputs und Outputs erstellt. Anders als bei Ökobilanzen konzentrierte sich die Auswertung hier allerdings auf die Sachbilanzebene und entsprechende Inputs und Outputs.

### Begriffsdefinition Ressourcen für die Analyse in den Fallstudien

Der Begriff Ressourcen wird in den Fallstudien analog zum UBA-Ressourcenbericht 2022 verwendet (Lutter *et al.*, 2022), der begrifflich auf früheren Arbeiten des Umweltbundesamts aufbaut. Demnach zählen zu den natürlichen Ressourcen erneuerbare und nicht erneuerbare Primärrohstoffe, der physische Raum (bzw. die Fläche), die strömenden Ressourcen und Umweltmedien sowie die Ökosysteme. Erneuerbare Rohstoffe stammen aus der Land- und Forstwirtschaft, wohingegen nicht erneuerbare Rohstoffe nichtmetallische Mineralien, fossile Energieträger, Metallerze sowie Biomasse umfassen.

In den Ergebnissen der Fallstudien kommt die Ressourcenintensität in folgenden Indikatoren zum Ausdruck<sup>26</sup>: RMI = Primärrohstoffeinsatz (engl. Raw Material Input), TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand (engl. Total Material Requirement), CED = kumulierter Energieaufwand (engl. Cumulative Energy Demand), WDP = Wasserfußabdruck (engl. Water Depletion Potential), LOP = Landnutzungspotenzial (engl. Land Occupation Potential). Ergänzend nennt jede Fallstudie ausgewählte Rohstoffe mit besonderer Relevanz für die Digitalisierung sowie den GWP = CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (engl. Global Warming Potential).

#### 4.2.2 Datengrundlagen und Modellierungs-Software

Für die Analyse der Fallstudien kam die **Software OpenLCA in Kombination mit der Datenbank Ecoinvent** für Lebenszyklusdaten (Version 3.8) zum Einsatz (Wernet *et al.*, 2016). Die Auswahl von Software und Datenbank wurde im Vorfeld der Fallstudienbearbeitung erörtert und orientierte sich an den verfügbaren Daten und Informationen sowie den methodischen Vorgaben für die Berechnung der Ressourcenintensität bzw. der ausgewählten Indikatoren. Dazu wurden verschiedene Datenbanken daraufhin geprüft, ob Daten zu Komponenten vorliegen, die für die Modellierung von Digitalisierungsprozessen relevant sind: Batterien, Chips, Leiterplatten und digitale Endgeräte.

Die Daten bezüglich digitalisierungsrelevanter Komponenten erschienen in der Datenbank Ecoinvent umfangreicher und aktueller als in den anderen in Frage kommenden Datenbanken. Zudem verfügt diese Datenbank nach Einschätzung des Auftragnehmers über eine hohe Akzeptanz in der Wissenschaft. Bei der Softwareauswahl waren die Verfügbarkeit der neuesten Version der Datenbank Ecoinvent (3.8) und eine Darstellung, die eine strukturierte und systematische Modellierung fördert, ausschlaggebend. Ausführliche Informationen zum Auswahlprozess für Datenbank und Software sind im Anhang zu finden.

Die Verwendung generischer Datensätze aus einer Datenbank, die im wissenschaftlichen Kontext weithin akzeptiert ist, wurde bewusst der Erhebung einzelner, neuer Datenpunkte vorgezogen. Der Aufwand von Neuberechnungen hätte bei der Fülle der benötigten Datensätze den Rahmen des Vorhabens gesprengt. Außerdem sollten die Fallstudien möglichst repräsentative Versionen der Anwendungsfälle abbilden, was durch einschlägige Datensätze eher gewährleistet ist.

Neben Sachbilanzdaten wurden je nach Fallstudie Literaturdaten (u. a. wissenschaftliche Publikationen, einschlägige Forschungs- und Projektberichte und graue Literatur) gesichtet. Auch Rahmenbedingungen für die Fallstudie wurden definiert und Aspekte identifiziert, die zur Interpretation oder Diskussion der berechneten Ergebnisse beitragen. Die so identifizierte Literatur ist in der jeweiligen Fallstudie an den entsprechenden Stellen referenziert.

<sup>26</sup> Die Begriffe RMI und TMR, die eher für die volkswirtschaftliche Ebene Verwendung finden, werden in diesem Vorhaben in Anlehnung an die angewandte Methodik von Bringezu *et al.* (2019) auch für die Analysen im Mikrobereich verwendet.

Für jede Fallstudie wurden die Betrachtungsgrenzen und die Untersuchungseinheit genau definiert. Notwendige grundlegende Annahmen für sämtliche Fallstudien wurden erörtert und festgelegt. Die wesentlichen Grundsätze dabei waren:

- ▶ **Überschlägige Betrachtung der Ressourcenintensität von Rechenzentren in ausgewählten Fallstudien:** Die Ressourcenintensität von Rechenzentren und Übertragungsnetzen konnte nur in Form der verwendeten Energie (Nutzungsphase) in alle Fallstudien einbezogen werden. Robuste und aktuelle Daten zu materiellen, in der Herstellungsphase verwendeten Ressourcen (Infrastruktur) sind nämlich nur bedingt verfügbar (Zimmermann *et al.*, 2020). Der mögliche Einfluss der Herstellungsphase von Rechenzentren wurde in den relevanten Fallstudien mit einer Abschätzung der Ergebnissensitivität ermittelt, und zwar mithilfe der Indikatoren *Abiotic Depletion Potential* (abiotisches Erschöpfungspotenzial, ADP) sowie *Global Warming Potential* (Treibhausgaspotenzial, GWP). Die Ergebnisse zeigen, dass der Einfluss der Herstellungsphase von Rechenzentren im Vergleich zur Herstellungsphase von Endgeräten gering ist. Ähnliches gilt für den Ressourcenbedarf während der Nutzungsphase: Hier ließen die Fallstudien den größten Energiebedarf auf Seiten der Endnutzenden erkennen. Auch die in den Fallstudien verwendeten Daten zum Stromverbrauch von Rechenzentren und Übertragungsnetzen stellen lediglich eine Annäherung an die gegenwärtige Situation dar – die Berechnungsmethoden in der Literatur sind sehr unterschiedlich. Ein besonderes Problem ist auch die mangelnde Aktualität vieler Eingangs- und Vergleichsdaten.
- ▶ **Fokus auf Herstellungs- und Nutzungsphase (ohne *end of life*):** Die Fallstudien rücken die Herstellungs- und Nutzungsphase in den Vordergrund. Das Ende des Lebenszyklus von Endgeräten (z. B. ordnungsgemäße Entsorgung, Wiederverwendung etc.) fand nur in ausgewählten Fällen Berücksichtigung: wenn es auf Basis der Literaturrecherche als besonders relevant erschien und ausreichend Daten für eine Quantifizierung verfügbar waren (zum Beispiel in der Fallstudie zur Kryptowährung). Zwar wäre eine durchgängige Berücksichtigung der *end of life* Phase aus wissenschaftlicher und ökologischer Sicht wünschenswert gewesen. Gründe für die gewählte Vorgehensweise sind aber die große Unsicherheit, die generell mit dem Ende des Lebenszyklus von digitalen Endgeräten verbunden ist, sowie die mangelhafte Datenlage. Die Literaturrecherche (Kapitel 2) ergab keine ausreichenden belastbaren Daten, die eine Annahme zum Verbleib der Elektrogeräte an deren Lebensende begründen könnten. Aus den Erkenntnissen zu Lebenszyklusphasen und Wertschöpfungsstufen auf Mikroebene (Kapitel 2.4, Tabelle 5) lässt sich ableiten, dass Herstellungs- und Nutzungsphase im Vergleich zur *end of life* Phase mehr Gewicht haben.
- ▶ **Allokation multifunktionaler Geräte:** Damit die Bewertungsgrundlage digitaler Anwendungsfälle konsistent ist, kam eine nutzungszeitbasierte Allokation von elektronischen Endgeräten zum Einsatz. Zusammen mit den anzunehmenden Stromintensitäten (z. B. kWh pro GB) der eingesetzten Netzkomponenten (z. B. Zugangsnetzwerk, Rechenzentrum) entstand so eine vergleichbare Basis für unterschiedliche Anwendungsfälle.

#### 4.2.3 Indikatoren und Angaben zu den Fallstudien

Im Rahmen der Fallstudien wird erläutert, weshalb der ausgewählte Anwendungsfall für die Digitalisierung beispielhaft und relevant ist. Im Mittelpunkt steht zum einen die **aktuelle Bedeutung** des Anwendungsfalls, die sich teils aus der jüngsten Entwicklung ergibt. Zum anderen wird, soweit möglich, beleuchtet, welche **zukünftigen Entwicklungen** absehbar sind und welche Relevanz die Anwendung daher in den kommenden Jahren gewinnen kann. Die

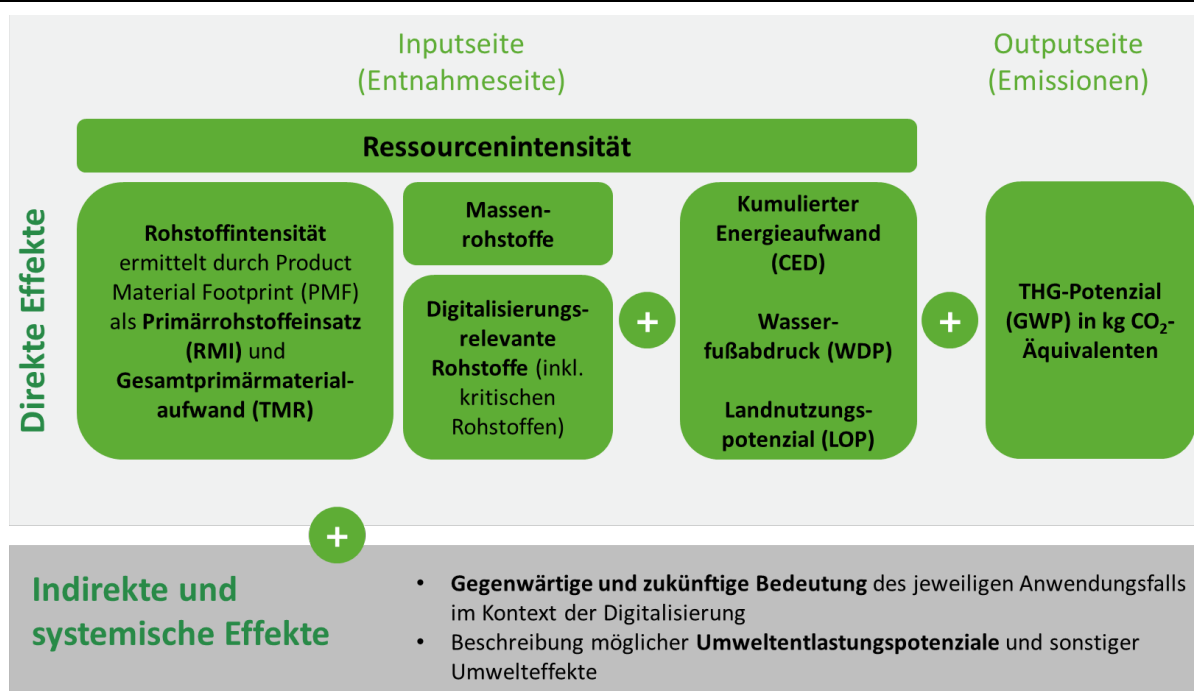
Informationen dazu stammen aus der Literaturrecherche (siehe Kapitel 1 und 2) und gehen insbesondere auf die potenzielle zukünftige Relevanz des Anwendungsfalls ein.

### Hauptindikatoren bzw. Indikatorenset

Im Zentrum der Fallstudien sollen Berechnungen zur Ressourcenintensität stehen. Ausgewählt wurden sogenannte umsatzbasierte Umweltbelastungsindikatoren. Der Grund für diese Entscheidung: Anhand von vier **Ressourcenfußabdrücken (Materialnutzung, fossile Energie, Wasser, Land)** lassen sich bis zu 80 % der Varianz aller spezifischen Umweltwirkungen (wie z. B. in einschlägigen Methoden zur Umweltwirkungsabschätzung für Ökobilanzen) auf der Entnahmeseite (Inputseite) abbilden (Steinmann *et al.*, 2016). Zusätzlich wurde gemäß Projektauftrag das **Treibhausgaspotenzial** als komplementärer Indikator auf der Output-Seite gewählt. Es ist eng verbunden mit dem Fußabdruck für fossile Energie.

Abbildung 22 zeigt das für die Fallstudien verwendete Indikatorenset. Die meisten dieser Indikatoren beziehen sich auf direkte Umwelteffekte. Dies steht im Einklang mit der methodischen Herangehensweise einer LCA und der entsprechenden Datenverfügbarkeit.

**Abbildung 22: Indikatorenset für die Analyse auf Mikroebene im Rahmen der Fallstudien**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 nach Bringezu *et al.* (2019)

### ► Rohstoffintensität

- **Rohstoffeinsatz oder Primärrohstoffeinsatz (RMI – engl. *Raw Material Input*):** Masse der Rohstoffe zur Herstellung von Gütern oder Dienstleistungen, die für die Produktions- und Konsumaktivitäten im Betrachtungsgegenstand zur Verfügung stehen.
- **Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR – engl. *Total Material Requirement*):** Zusammengesetzter Indikator, der alle physischen Materialien widerspiegelt, die zur Herstellung von Gütern oder Dienstleistungen mobilisiert werden, einschließlich „versteckter“ nicht wirtschaftlicher Materialien wie mineralischer Abraum, Verarbeitungsabfälle und Bodenerosion-

► **Kumulierter Energiebedarf (CED – engl. *Cumulative Energy Demand*)**

Der kumulierte Energieaufwand beschreibt den Betrachtungsgegenstand auf Grundlage des gesamten Primärenergiebedarfs der assoziierten Herstellung, Nutzung und Entsorgung.

► **Wasserfußabdruck (WDP – engl. *Water Depletion Potential*)**

Der Wasserfußabdruck ist die gesamte Menge Wasser, welche in Anspruch genommen wird. Er rechnet auch das indirekt genutzte Wasser mit ein.

► **Landnutzungspotenzial (LOP – engl. *Land Occupation Potential*)**

Die Menge an landwirtschaftlich genutzten oder urbanen Flächen, deren Nutzung mit dem Betrachtungsgegenstand verbunden ist.

► **Treibhausgaspotenzial (GWP – engl. *Global Warming Potential*)**

Maßzahl für den relativen Beitrag zum Treibhauseffekt, also die mittlere Erwärmungswirkung auf die Erdatmosphäre über einen Zeitraum von 100 Jahren.

► **Digitalisierungsrelevante Rohstoffe inklusive kritische Rohstoffe**

Neben den Massenrohstoffen oder mengenmäßig wichtigsten Materialien bezieht die Analyse der Rohstoffintensität auch besonders kritische Rohstoffe ein. Ob ein Rohstoff als kritisch anzusehen ist, hängt hauptsächlich von Verfügbarkeit, Produktion sowie globaler Reserve ab. Je nach Fall kann auch die Verwendung einer im Verhältnis geringen Menge sehr relevant für die Rohstoffintensität des Anwendungsfalls sein. Dies zeigen die Erkenntnisse vorangegangener Forschung: Technologiemetalle (inkl. Seltene Erden) haben trotz ihrer geringen Masse oftmals schwerwiegende Umweltwirkungen (Kristof und Hennicke, 2010; Liu *et al.*, 2019; Umweltbundesamt, 2021).

Damit die Fallstudien diesen Sachverhalt hinreichend berücksichtigen, wurden zunächst Informationen aus mehreren Publikationen kombiniert. So flossen Nutzung und Kritikalität (nach der Methodik der EU) von Rohstoffen in den Auswahlprozess ein. Dazu wurde eine Liste von besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffen für das Vorhaben erstellt. Auch für die gezielte Auswertung der Rohstoffintensität von digitalisierungsrelevanten Rohstoffen wurde ein Vorgehen erarbeitet. Detaillierte Informationen zur berücksichtigten Literatur und zur Auswertungsmethodik sind dem Anhang zu entnehmen (Abraham *et al.*, 2023b).



Tabelle 7 listet die digitalisierungsrelevanten Rohstoffe auf, die in die Methodik der Fallstudien eingingen (basierend auf den in der genutzten Datenbank verfügbaren Elementarflüssen).

**Tabelle 7: Digitalisierungsrelevante Rohstoffe mit ihren Rohstoffgruppen, die für die Fallstudien ausgewertet wurden\***

Rohstoffgruppe	Analysierte Rohstoffe (-gruppen) im Rahmen der digitalisierungsrelevanten Rohstoffe*
Metalle, Edelmetalle, Halbmetalle, andere Rohstoffe	Antimon, Chrom, Gallium, Gold, Kobalt, Kupfer, Lithium, Magnesium, Mangan, Nickel, Silber, Silizium, Tantal, Zinn
Seltene Erden	Cerium, Dysprosium, Europium, Gadolinium, Lanthan, Neodym, Praseodymium, Samarium, Scandium, Terbium, Yttrium
Platingruppenmetalle	Platin, Rhodium

\*Anmerkung: Fett gedruckte Rohstoffe sind nach der EU definierte kritische Rohstoffe (Europäische Kommission, 2020c<sup>27</sup>). In den einzelnen Fallstudien werden jene digitalisierungsrelevanten Rohstoffe erwähnt, die je nach verwendetem Anteil an der jährlichen Gesamtproduktion bzw. -entnahme besonders relevant sind.

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die Methodik zur Herleitung des hier aufgeführten Hauptindikatoren-Sets wird im Anhang im Detail erläutert (siehe Abraham *et al.*, 2023b).

Zusätzlich zu den bisher genannten quantitativen Indikatoren beschreiben die Fallstudien folgende Aspekte:

► **Bedeutung des jeweiligen Anwendungsfalls für die Digitalisierung (gegenwärtig und zukünftig)**

Die Betrachtung konzentriert sich zum einen auf die aktuelle Bedeutung des Anwendungsfalls, die sich teils aus der jüngsten Entwicklung ergibt. Zum anderen beschreibt die Analyse, soweit möglich, welche zukünftigen Entwicklungen absehbar sind und welche Bedeutung die Anwendung in den kommenden Jahren gewinnen könnte.

► **Beschreibung möglicher (theoretischer) Umweltentlastungspotenziale**

Der Fokus des Forschungsvorhabens liegt zwar auf der Ressourcenintensität der digitalen Anwendungen. Dennoch beschreibt jede Fallstudie auch, welche Umweltentlastungspotenziale damit einhergehen können. Hierzu kommen, je nach Datenlage und Fallstudie, folgende Strategien zum Einsatz: Darstellung von Entlastungspotenzialen laut Literatur, Vergleich der errechneten Ressourcenintensitäten mit jenen von analogen Lösungen sowie Bezugnahme auf Potenziale in der Zukunft. Beispielsweise vergleicht die Fallstudie zur Videokonferenz die durchschnittlichen Emissionen einer Pendelfahrt zur Arbeit mit den THG-Emissionen einer Videokonferenz im Homeoffice. Grundlage ist eine vergleichbare Bezugseinheit. Daraus lässt sich auf eine potenzielle Umweltentlastung schließen.

Ein direkter Vergleich zwischen verschiedenen Umweltwirkungen ist jedoch nicht in allen Fallstudien möglich: Umweltwirkungen können sich nicht nur zeitlich, sondern auch räumlich und in Bezug auf die betroffenen Umweltmedien oder Schutzgüter unterscheiden. Die Umweltentlastungspotenziale umfassen dabei sowohl direkte Entlastungen als auch eher indirekte oder systemische Effekte. Die Einzelheiten hängen stark von der jeweiligen Fallstudie ab. Für systemische Effekte spielen u. a. Rebound-Effekte oder Suffizienz bei der Nutzung digitaler Technologien eine Rolle. Dies steht aber beim vorliegenden Forschungsvorhaben nicht im Mittelpunkt.

<sup>27</sup> Die neue Publikation der EU (2023) konnte in diesem Vorhaben nicht mehr veröffentlicht werden.

#### 4.2.4 Methodische Details zur Berechnung der Indikatoren in den Fallstudien

Alle genannten Indikatoren und die jeweiligen Berechnungsgrundlagen sind bereits in gängige Softwarelösungen für Ökobilanzierung integriert. Daher wurde zur Berechnung der Indikatoren weitestgehend auf gängige, umfassende Methoden, wie zum Beispiel die ReCiPe (H) 2016-Methode (Huijbregts *et al.*, 2016), zurückgegriffen. Davon wurde abgewichen, wenn eine andere Methodik für den Abgleich der gewonnenen Ergebnisse mit bestehender Forschung zielführender war.

##### Vorgehensweise bei den Berechnungen

In den Fallstudien wurden die Indikatoren, die in Anhang Kapitel B.2.3 (siehe Abraham *et al.*, 2023b) beschrieben werden mit Hilfe von OpenLCA und der Ecoinvent Datenbank berechnet. Die Datenbank und Software werden in Anhang Kapitel B.2.2 detailliert vorgestellt. In Anhang Kapitel B.2.2.1 wird im Abschnitt „Auswahl der Software-Lösungen“ aufgeführt, welche Schritte notwendig sind, um die Fallstudien reproduzieren zu können. Aus diesem Grund und zur Vermeidung von Redundanz wird in den Fallstudien drauf verzichtet, auf das Berechnungsverfahren der Software erneut einzugehen. In den Fallstudien werden die spezifischen Charakteristika, Systeme und Systemgrenzen sowie die spezifischen Daten für die jeweiligen Anwendungsfälle näher erläutert. Diese Informationen werden in die Software (OpenLCA) eingepflegt. Nach der Ausführung der Berechnung durch OpenLCA erhält man die Ergebnisse, die ebenfalls in den Kapiteln der Fallstudien zu finden sind (Anhang Kapitel B.5.1 bis B.5.11).

Die Ressourcenintensität der untersuchten Anwendungsfälle in den Fallstudien des Vorhabens wird anhand mehrerer Aspekte betrachtet. Zunächst wurde die Gesamtrohstoffintensität erhoben und beschrieben. Die einzelnen Fallstudien nennen und erläutern die kumulierte Rohstoffintensität. Dabei wird auch zwischen den verschiedenen betrachteten Lebenszyklusphasen (etwa zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase) unterschieden und deren Intensität einzeln dargestellt. Die Gesamtrohstoffintensität des Anwendungsfalls richtet sich nach der Methode *Product Material Footprint (PMF)* (Mostert & Bringezu, 2019). Damit ließen sich die Indikatoren Primärrohstoffeinsatz (RMI) und Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)<sup>28</sup> für ein klar abgegrenztes Produktsystem eines Anwendungsfalls in der Software OpenLCA berechnen.

Hierzu wurden für beide Indikatoren (RMI und TMR) basierend auf dem MIPS-Konzept (Material Input pro Service-Einheit) nach Friedrich Schmidt-Bleek Charakterisierungsfaktoren<sup>29</sup> erstellt. **Diese wurden den 143 Input-Elementarflüssen (*resource, in ground*) der Datenbank Ecoinvent zugewiesen.** Für die Nutzung der Indikatoren im Forschungsvorhaben kam ein Update der von Mostert und Bringezu (2019) bereitgestellten Methode zum Einsatz. Dieses überträgt die Zuordnung der Charakterisierungsfaktoren auf die hier genutzte Version 3.8 der Datenbank Ecoinvent und erweitert sie auf die aktualisierte Liste der in den Datensätzen berücksichtigten Elementarflüsse (Pauliuk, 2022). Diese Version erlaubte es auch, die Elementarflüsse weiter zu charakterisieren und so die Bestandteile der berechneten Indikatoren (Biomasse, fossile Energieträger, Metallerze und nichtmetallische Mineralien) einzusehen. Zu

<sup>28</sup> Eine Bilanz mittels dieser Indikatoren umfasst nicht nur die tatsächliche Materialzusammensetzung eines physischen Gegenstands (z. B. Produkt), sondern alle Materialien, die entlang des Lebenswegs benötigt werden. Die gemeinsame Verwendung der beiden Indikatoren verdeutlicht explizit den Unterschied zwischen dem Material, das der Natur entnommen und nur zum Teil als Rohstoff weitergenutzt und verkauft wird (TMR), sowie dem ökonomisch genutzten Anteil (RMI), d. h. die nach Rohstoffgewinnung und -aufbereitung vermarkteten Produkte (Bringezu *et al.*, 2019).

<sup>29</sup> Mit diesen Faktoren werden die Mengen der einzelnen Rohstoff-Inputs (Elementarflüsse) in der Modellierung multipliziert, um den mit diesen Inputs verbundenen RMI bzw. TMR abzubilden.

beachten ist, dass die Multiplikation der Elementarflüsse mit Charakterisierungsfaktoren i. d. R. eine Gesamtmenge für den Primärrohstoffeinsatz ergibt, die von der Summe der – ebenfalls in den Fallstudien dargestellten – einzelnen Elementarflüsse abweicht.

Digitale Infrastruktur und Endgeräte enthalten die verschiedenen Rohstoffe in teils stark unterschiedlichen Mengen (vgl. z. B. Rizos *et al.*, 2019). Für jede Fallstudie wurden durch Analyse der verwendeten Datensätze die Rohstoffe mit der höchsten eingesetzten Menge ermittelt. Dazu gehörte auch die Frage, welche Bestandteile oder Prozesse des Anwendungsfalls den Bedarf an diesen Rohstoffen maßgeblich treiben.

Die Sachbilanzergebnisse der einzelnen Rohstoffe in den Fallstudien wurden auf ihre Relevanz überprüft. Dazu wurden die Ergebnisse für jeden Rohstoff mit der jährlichen globalen Gesamtproduktion (oder ersatzweise der jährlichen Gesamtentnahme) verglichen. Daraus ergab sich der relative Anteil der Rohstoffbedarfe im Anwendungsfall am globalen Gesamtbedarf. So entstand für jede Fallstudie eine Gruppe relevanter Rohstoffe, die in der Regel noch nicht zusammen mit den Massenrohstoffen für den Anwendungsfall analysiert wurden. Wenn dies wichtig erschien, wurden zusätzlich **Kupfer und Lithium** genauer betrachtet. Beide Rohstoffe spielen eine besondere Rolle: Sie finden weitreichenden Einsatz in der Digitalisierung, sind in der gesellschaftlichen Diskussion zum Thema omnipräsent und gelten in der Literatur als sehr wesentlich für die Digitalisierung.

#### **Dementsprechend wurde die Rohstoffintensität pro Fallstudie wie folgt angegeben:**

- ▶ Gesamtrohstoffintensität sowie ungenutzte Materialentnahme nach Mostert und Bringezu (2019) sowie Pauliuk (2022); dabei je nach Fallstudie Aufschlüsselung nach Herstellungs- und Nutzungsphase und Nennung der Anteile von nichtmetallischen Mineralien, fossilen Energieträgern, Metallerzen und Biomasse
- ▶ Darstellung und Analyse der mengenmäßig relevantesten Rohstoffinputs
- ▶ Intensität digitalisierungsrelevanter Rohstoffe, sodass Aussagen zur Verwendung von Kupfer, Lithium und weiteren – auch kritischen – Rohstoffen möglich sind
- ▶ Ergänzung um weitere ressourcenbezogene Ergebnisse sowie das THG-Potenzial (siehe vorstehende Liste der Indikatoren)

### **4.3 Fallstudien**

Die Ergebnisse der Arbeiten zu den Fallstudien werden im Folgenden des besseren Überblicks wegen in diesem Bericht zusammenfassend dargestellt. Eine detaillierte Darstellung ist im getrennt veröffentlichten Anhang zu diesem Bericht zu finden (Abraham *et al.*, 2023b<sup>30</sup>).

#### **4.3.1 Fallstudie Videokonferenz im Homeoffice**

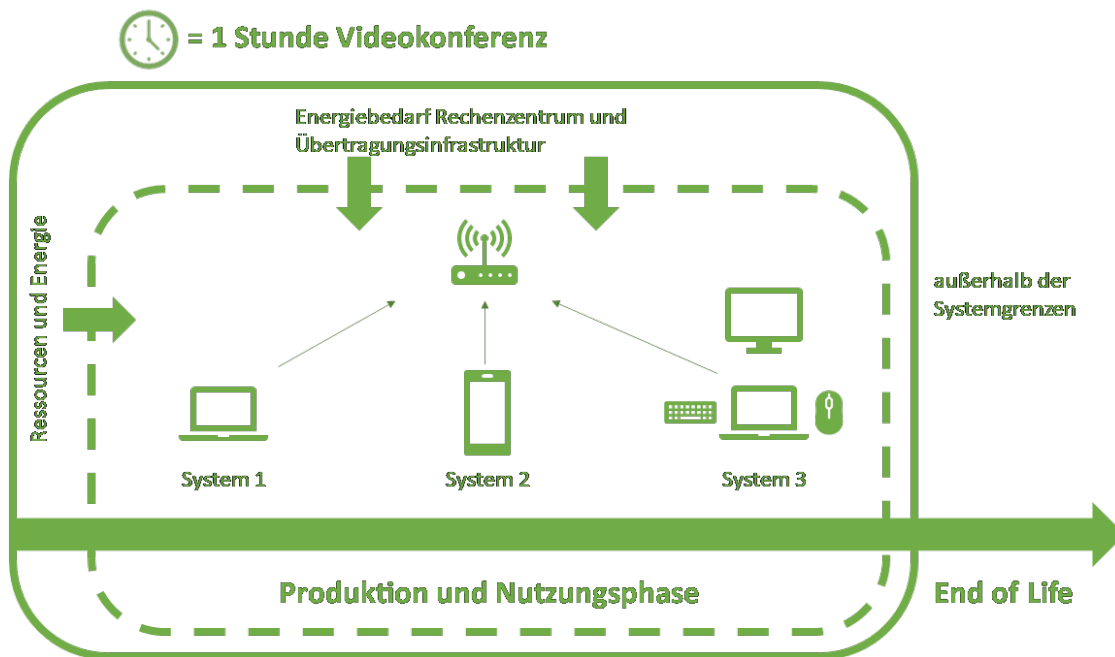
Im Zuge der Covid-19-Pandemie hat die Nutzung von Videokonferenzen sowohl im beruflichen als auch im privaten Umfeld stark zugenommen. Im Januar 2021 gaben bei einer in Deutschland durchgeführten Studie 19 % der Befragten an, während der Pandemie wöchentlich fünf bis neun Stunden Videogespräche geführt zu haben. Vor der Pandemie war dies bei lediglich 3 % der Befragten der Fall (Statista, 2021c). In einer weiteren Umfrage unter Führungskräften im Juli 2020 zeigte sich, dass 85 % der befragten Unternehmen während der Pandemie Tools zur virtuellen Kommunikation und Kollaboration stärker nutzten. Bereits vor Beginn der Pandemie

<sup>30</sup> Vgl. [www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen](http://www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen) (Stand: 31.12.2023).

hatten Umfragen ergeben, dass in Deutschland zukünftig ein Homeoffice-Anteil von bis zu 40 % denkbar und somit eine vermehrte Nutzung von Technologien wie Videokonferenzen zu erwarten ist (Arnold *et al.*, 2015; Brenke, 2016; Büttner & Breitzkreuz, 2020).

Die vorliegende Fallstudie berechnet die Ressourcenintensität aufgrund der Teilnahme einer Person an einer einstündigen Gruppen-Videokonferenz. Als Untersuchungsrahmen dienen drei durchschnittliche geeignete Gerätekombinationen mit entsprechender Internetverbindung, wie sie typischerweise für die Teilnahme an Videokonferenzen im beruflichen Kontext zum Einsatz kommen (Abbildung 23). Die Anteile der drei Gerätekombinationen sind in Tabelle 8 dargestellt.

**Abbildung 23: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Eine Stunde Videokonferenz“**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

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 (Zimmermann *et al.*, 2020).

**Tabelle 8: Berücksichtigte Gerätekombinationen mit Energieverbrauch in kWh und angenommenen Nutzungsanteilen in Prozent für die Fallstudie „Eine Stunde Videokonferenz“**

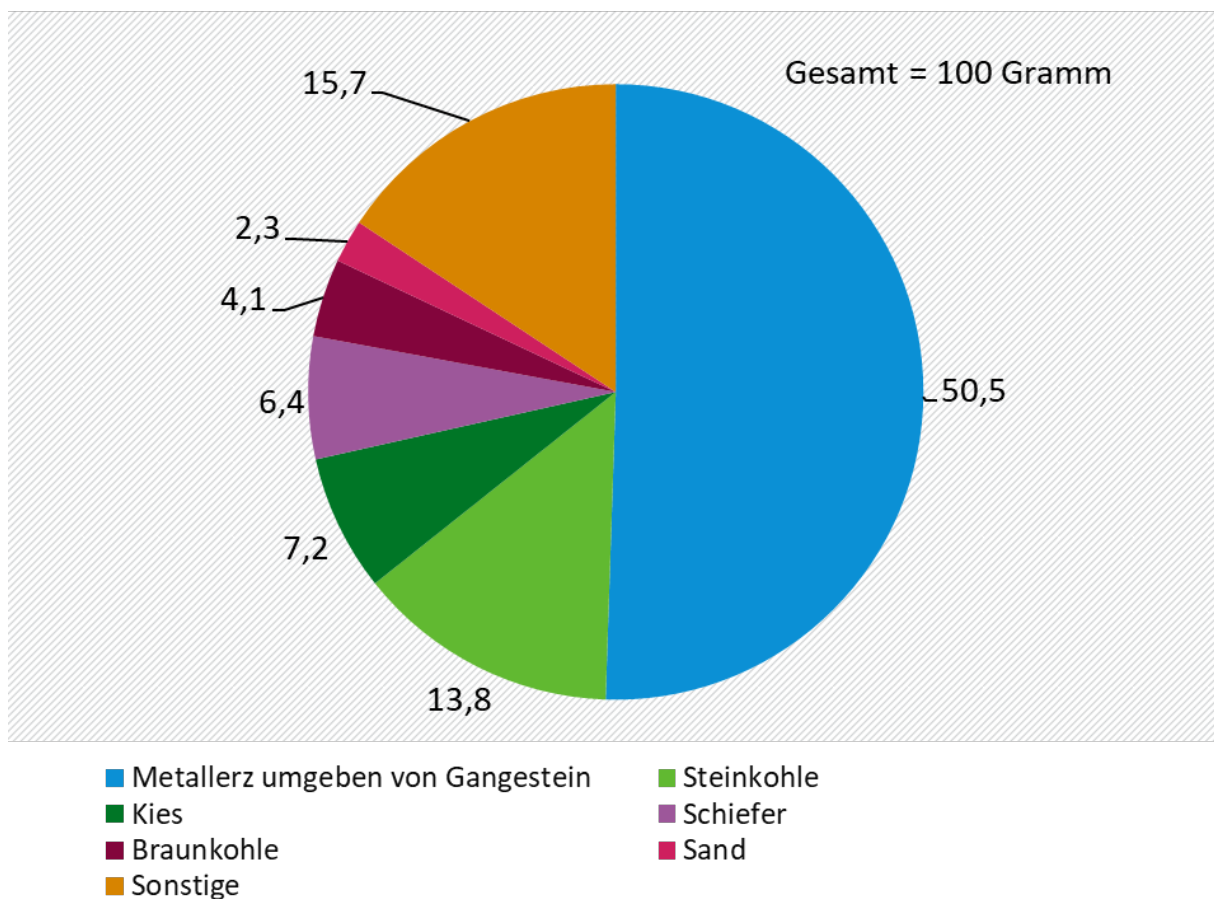
Anteil der Nutzung (Annahme)	Gerätekombinationen für Videokonferenz	Energieverbrauch (kWh)
40 %	Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon + Router	0,0084 + 0,013
20 %	Smartphone + Router	0,002 + 0,013
40 %	Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon + externer Monitor + externe Tastatur + optische PC-Maus + Router	0,0164 + 0,013

Quellen: Prakash *et al.* (2016); Gröger (2020)

### Ressourcenintensität der Herstellungsphase

In die Fallstudie fließen die in diesem Vorhaben behandelten Ressourcenindikatoren in Bezug auf die Herstellung und Nutzung der Videokonferenzgeräte und auf die Bereitstellung der Internetverbindung ein. Entsorgungs- und Recyclingprozesse sind in den Fallstudien wegen der mangelhaften Datenlage grundsätzlich nicht berücksichtigt. Abbildung 24 zeigt, dass mineralische und fossile Rohstoffe in der Herstellungsphase den größten Anteil am Primärrohstoffbedarf ausmachen, und zwar 92 % (91,8 g/h, vgl. Abbildung 24) des gesamten Primärrohstoffeinsatzes von **100 g/h** aus. Im RMI dominieren Ganggesteine und Bauxite (Metallerz), was auf die intensive Verwendung von Metallen bzw. Metallerzen bei der Herstellung der für die Videokonferenz benötigten Geräte zurückgeht. Daneben spielen Stein- und Braunkohle (Energieprozesse), Kies, Schiefer sowie Sand (Bauprozesse) mengenmäßig eine Rolle. Unter „Sonstige“ fallen vorrangig Calcit (2 g), Rohöl (1,7 g), Lehm (1,4 g) und Eisen (1,2 g). Der Großteil der Rohstoffe und Materialien wird in der Produktionsvorkette und zur Energiebereitstellung beansprucht.

**Abbildung 24: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Eine Stunde Videokonferenz“ in Gramm\***



\* Die Abbildung zeigt gerundete Zahlen

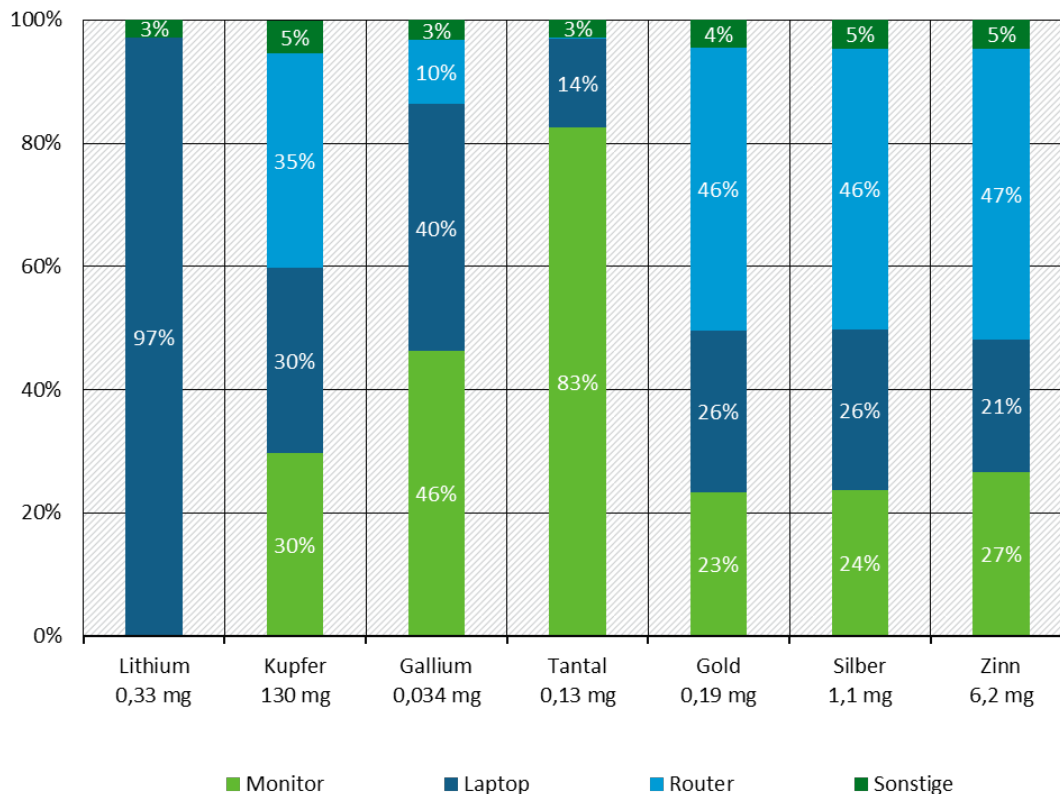
Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Der gesamte TMR beträgt insgesamt **113 g** je Stunde Videokonferenz für die Herstellungsphase. Die ungenutzten Materialentnahmen machen also ungefähr 13 g aus.

### Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe

Neben den Massenrohstoffen und Materialien sind in der Herstellungsphase auch die im Forschungsvorhaben definierten digitalisierungsrelevanten Rohstoffe zu betrachten (siehe Kapitel 4.2.3 „Indikatoren und Angaben zu den Fallstudien“). Sie spielen eine Rolle, die im Vergleich zur Untersuchungseinheit von einer Stunde Videokonferenz zahlenmäßig mit rund **0,26 g** kaum eine Rolle. Allerdings sind sie rohstoffstrategisch und politisch von großer Bedeutung, weil sie geologisch selten sind oder von Ländern wie Deutschland, die kein eigenes Vorkommen haben, nur eingeschränkt bezogen (importiert) werden können<sup>31</sup>. Abbildung 25 zeigt die für die Fallstudie 7 wichtigsten besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffe. Die **besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffe** wurden nach der in Kapitel 4.2 beschriebenen Vorgehensweise ermittelt. Insgesamt machen diese massentechnisch **0,138 g** aus (vgl. Abbildung 25).

**Abbildung 25: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ in Prozent und Milligramm**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Die größte Menge der digitalisierungsrelevanten Rohstoffe macht mit 130 mg Kupfer aus. Zu den weiteren Rohstoffen (Anteil ca. 6 %) gehören u. a. Zinn und Silber. Betrachtet man die Verteilung der digitalisierungsrelevanten Rohstoffe auf einzelne Komponenten des Systems Videokonferenz (Abbildung 25) fällt auf: Über 95 % des Lithiumbedarfs entfallen auf den Laptop, über 80 % des Tantalbedarfs auf den Monitor.

<sup>31</sup> Die Einzelwerte können im Anhang Abraham *et al.* (2023b) nachvollzogen werden.

### Ressourcenintensität der Nutzungsphase

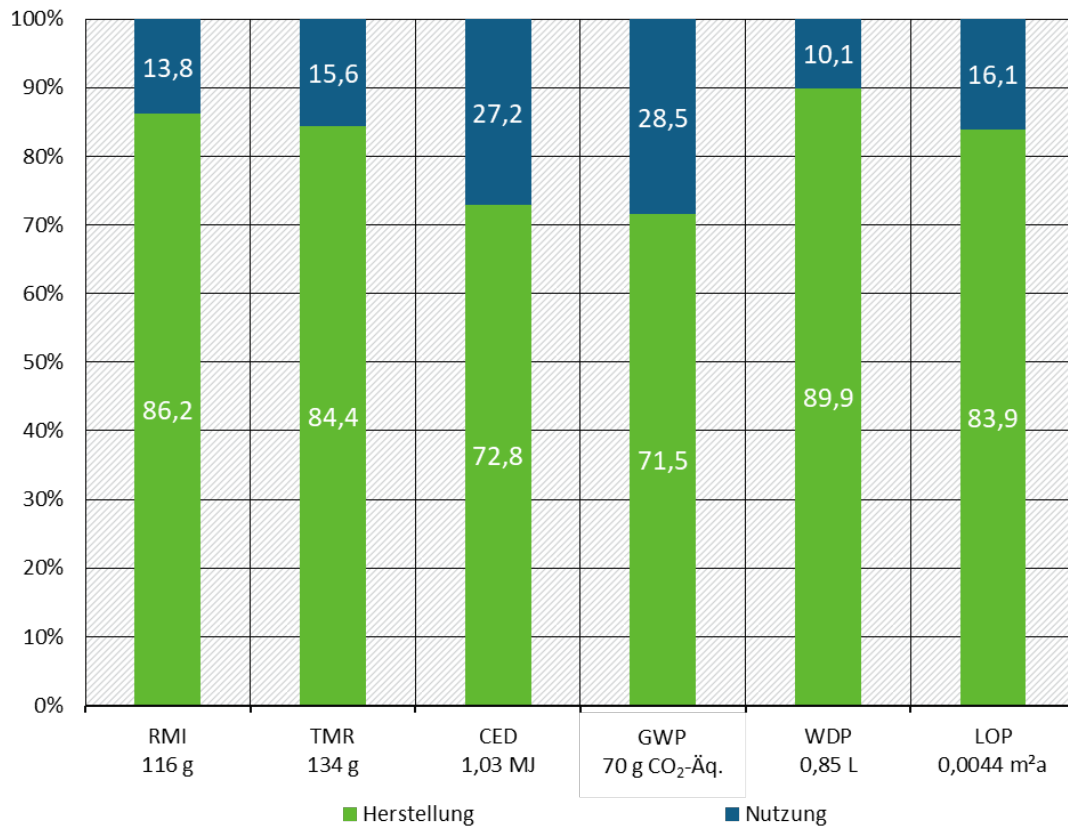
Die einstündige Nutzung des Videokonferenzsystems hat nach den Berechnungen in diesem Vorhaben einen Primärrohstoffeinsatz (RMI) von **16 g** zur Folge (davon 73 % fossile Energieträger, 14 % nichtmetallische Mineralien, 11 % Metallerze und 2 % Biomasse). Dieser Rohstoffeinsatz geht indirekt auf den Energieverbrauch der Endgeräte und die Festnetzinternetverbindung zurück. Die Ressourcenintensität der Nutzungsphase ist dabei stark abhängig vom Strommix, d. h. vom Anteil rohstoffintensiver fossiler bzw. erneuerbarer Energieträger (siehe Abbildung 25). Der Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) in der Nutzungsphase beläuft sich auf **21 g**. Somit beträgt die Menge ungenutzter Materialentnahmen **5 g**.

### Vergleich von Herstellungs- und Nutzungsphase

Abbildung 26 zeigt nicht nur den Primärrohstoffeinsatz (RMI) und den Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR). Sie enthält auch die anderen in diesem Forschungsvorhaben berechneten Indikatoren – mit ihren absoluten Werten je Stunde Videokonferenz sowie mit ihren Anteilen an der Herstellungs- bzw. Nutzungsphase. Die Vorgehensweise ist analog zu den Berechnungen von RMI und TMR. Der kumulierte Energieaufwand (engl. *Cumulative Energy Demand*, CED) für die Untersuchungseinheit – eine einstündige Videokonferenz – beträgt z. B. **1,03 MJ** (Megajoule), wobei 0,75 MJ auf die Herstellungs- und 0,28 MJ auf die Nutzungsphase entfallen. Beim CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (engl. *Global Warming Potential*, GWP) ergeben sich ähnliche Anteile für Herstellungs- und Nutzungsphase. Bei den Indikatoren Wasserfußabdruck (engl. *Water Deprivation Potential*, WDP) und Landnutzungspotenzial (engl. *Land Occupation Potential*, LOP) hingegen fallen die Anteile der Herstellungs- und Nutzungsphase unterschiedlich aus.



**Abbildung 26: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase\***



\*Anmerkung/Erläuterung: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

## Zusammenfassung und Ausblick

Mit Hilfe von LCI-Datenbanken wurden verschiedene Indikatoren der Ressourcenintensität sowie der THG-Fußabdruck für eine einstündige Videokonferenz berechnet. Grundlage ist eine typische Gerätekombination. Es fließen Herstellungs- und Nutzungsphase ein. Der Primärrohstoffeinsatz (RMI) beträgt rund 116 g pro Stunde Videokonferenz, wovon etwa 86,2 % auf die Herstellungsphase der Geräte entfallen<sup>27</sup>. Bei den übrigen Indikatoren dominiert ebenfalls die Herstellungsphase, aber mit unterschiedlichen Anteilen. Videokonferenzen wird großes Potenzial für die Entlastung der Umwelt zugeschrieben. Wenn sie beispielsweise mehr Homeoffice ermöglichen, verringert sich der Ausstoß von Treibhausgasen, da weniger Emissionen im Personentransport anfallen. Beim Vergleich zwischen dem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck einer einstündigen Videokonferenz (**70 g CO<sub>2</sub>-Äq.** für die Herstellungs- und Nutzungsphase) und dem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck einer durchschnittlichen täglichen Pendelfahrt per Pkw (4,86 kg CO<sub>2</sub>-Äq.) zeigt sich ein erhebliches Einsparpotenzial durch Videokonferenzen. Geht man von einer zweistündigen Teilnahme an Videokonferenzen aus, wäre bereits ab einer Pendeldistanz von 500 m der CO<sub>2</sub>-Ausstoß durch den Pkw höher als durch die Videokonferenz.

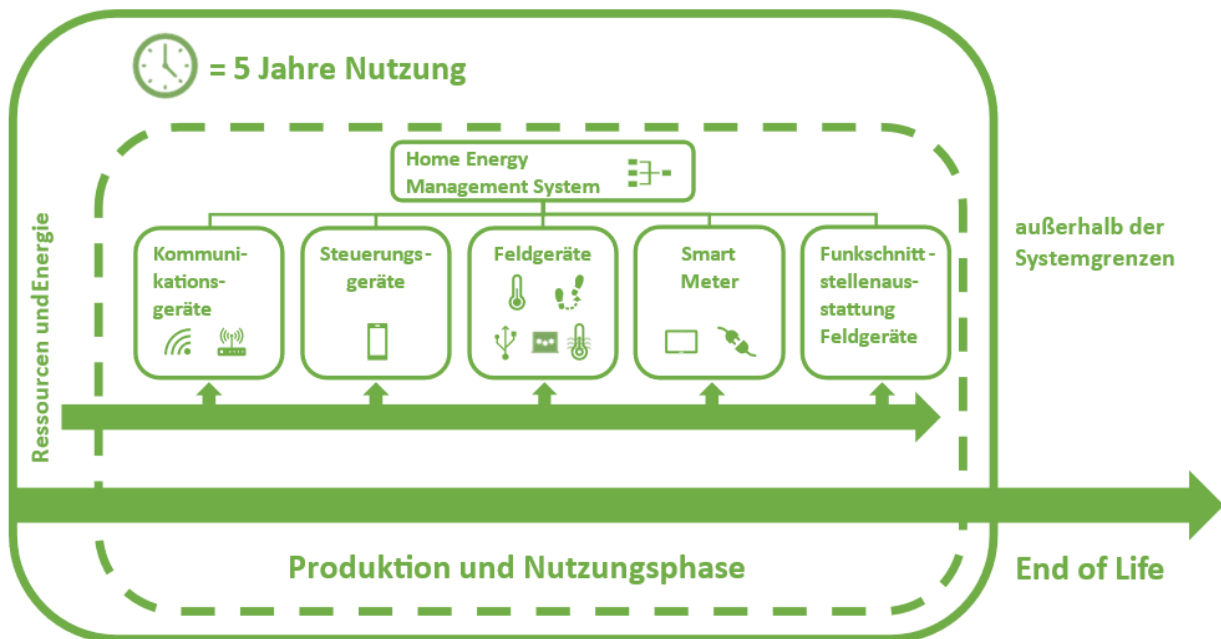
Die Fallstudie zeigt weiterhin, wie wesentlich eine ressourcenschonende Herstellung von IKT-Endgeräten ist. Das bedeutet: Eine funktionierende Kreislaufwirtschaft – einschließlich Lebensdauer, Reparatur und Wiederverwendung von Geräten sowie Recycling von Materialien – spielt eine wichtige Rolle.

### 4.3.2 Fallstudie Smart-Home-System

Zur Digitalisierung von Privathaushalten tragen zunehmend Smart-Home-Systeme bei. Smart-Homes sind Häuser, in denen Nutzer\*innen Haustechnik und -geräte mittels Kommunikationsnetzen aus Sensoren und Geräten steuern und aus der Ferne überwachen können (Pohl, 2021). Durch eine effiziente und nutzeroptimierte Steuerung der Haushaltsgeräte und Haustechnik lassen sich Ressourcen sparen. Beispielsweise regelt ein smartes Energiemanagementsystem die Raumtemperatur je nach Anwesenheit von Personen oder aktueller Wettervorhersage mit dem Ziel einer effizienteren Energienutzung (*Smart Heating*). Laut einer Studie könnten Smart-Home-Systeme die Primärenergieemissionen bis 2030 um 8 bis 9 % reduzieren (Bitkom, 2020). Im Jahr 2022 nutzte bereits rund ein Viertel der Bundesbürger\*innen smarte Heizkörperthermostate. Für die Zukunft werden noch mehr Smart-Home-Anwendungen erwartet, was die Energiewende in Deutschland beschleunigen könnte (Bitkom, 2022).

Die vorliegende Fallstudie berechnet die Ressourcenintensität der Herstellung und der fünfjährigen Nutzung eines Smart-Home-Systems aus durchschnittlichen Komponenten (siehe Abbildung 27). Ausgangspunkt ist ein Einfamilienhaus mit einem jährlichen Strombedarf von 4.000 kWh und einem jährlichen Heizbedarf von 36.000 MJ. Das System dient dem Energiemanagement sowie dem allgemeinen Komfort. Zur Ermittlung des Energieeinsparpotenzials durch die Smart-Home-Anwendung dient der Vergleich von fünf Szenarien, beruhend auf unterschiedlichen Annahmen über die Energieeinsparungen im Haus, mit dem Energiebedarf des Smart-Home-Systems selbst.

**Abbildung 27: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“\***



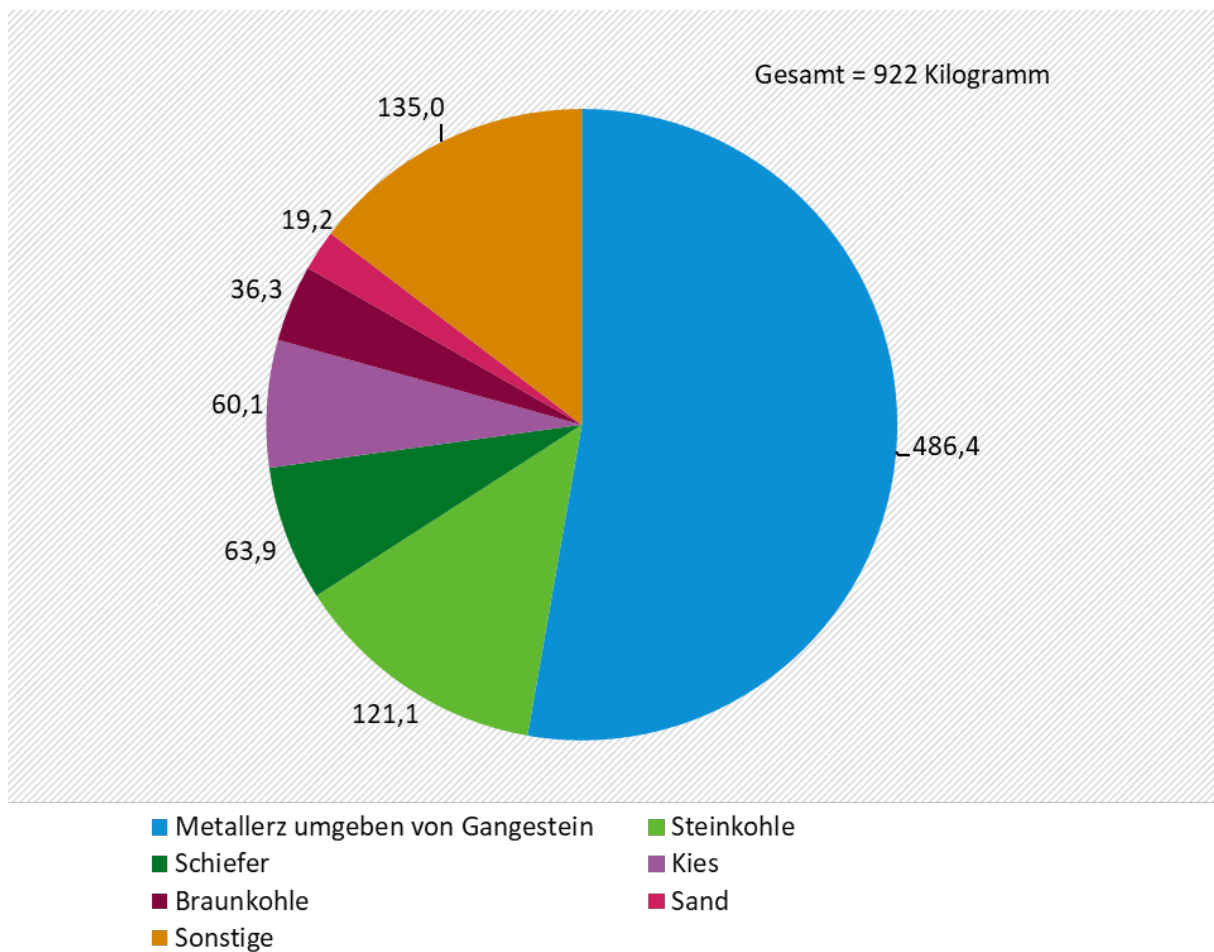
\*Annahme: 10-minütige Nutzung des Smartphones für die Steuerung der Smart-Home-Anwendung pro Tag.

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### Ressourcenintensität der Herstellungsphase

Die Fallstudie beleuchtet die Ressourcenintensität von Herstellung und Nutzung des Smart-Home-Systems. Dazu gehören mögliche Energieeinsparungen sowie die im Forschungsvorhaben behandelten Ressourcenindikatoren (vgl. Abbildung 27). Die genutzten Rohstoffe mit der größten Masse (Elementarflüsse) sind in Abbildung 28 aufgeführt. Der Entsorgungs- und Recyclingprozess fand aufgrund mangelnder Daten keinen Eingang in die Fallstudie.

**Abbildung 28: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Fünffährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in Kilogramm\***



\* Die Abbildung zeigt gerundete Zahlen

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

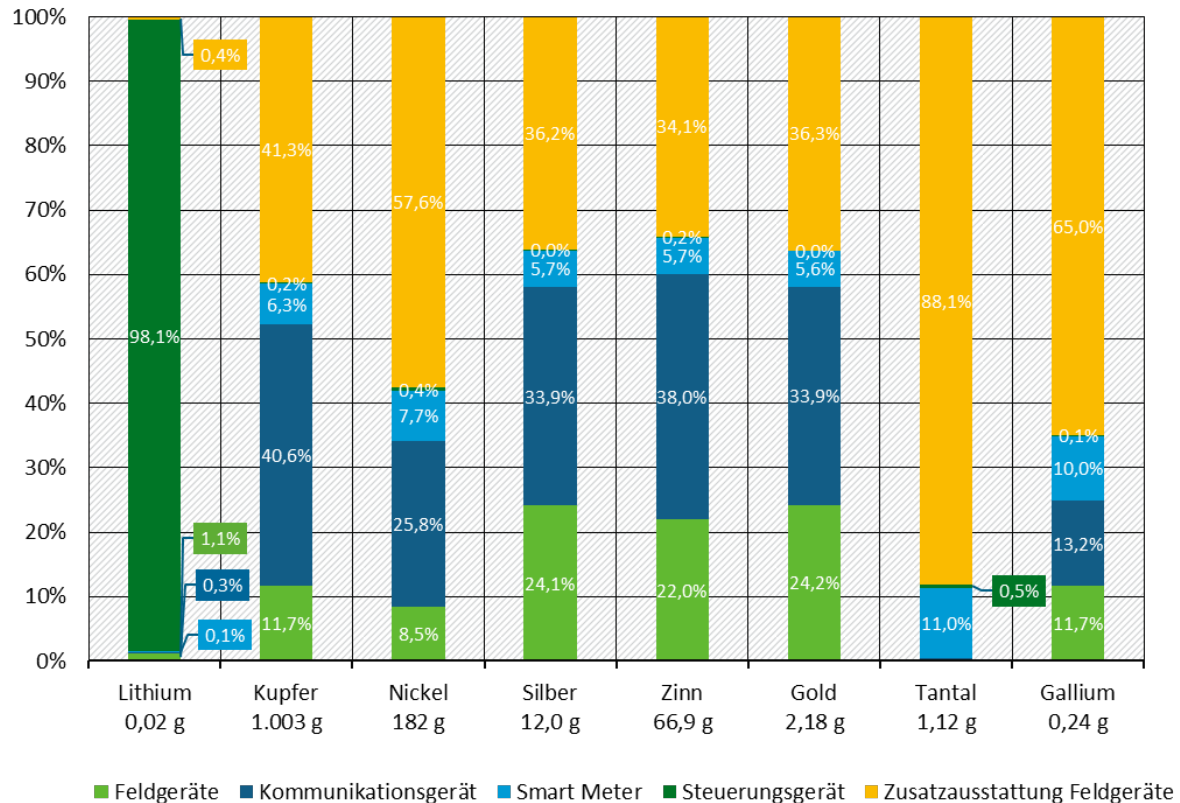
Die Herstellung der Gerätekombination beruht auf einem Primärrohstoffeinsatz, der zum Großteil aus mineralischen und fossilen Rohstoffen besteht. Insgesamt sind 97 % (898,5 kg, vgl. Abbildung 28) des gesamten Primärrohstoffbedarfs von **922 kg** fossile und mineralische Rohstoffe. Abbildung 28 zeigt die Verteilung der Rohstoffarten in der Herstellungsphase. Prozentual betrachtet macht Ganggestein 52,7 % der Masse aus. Darauf folgt Steinkohle mit 13,1 %, Schiefer (6,9 %), Kies (6,5 %), Braunkohle (3,9 %) und Sand mit einem Anteil von 2,1 %. Sonstige Materialien machen zusammengenommen lediglich 14,6 % aus. Einschließlich der ungenutzten Materialentnahme errechnet sich der Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) mit **1.035,7 kg**. Es zeigt sich ein ähnliches Bild wie bei der Fallstudie „Videokonferenz im Homeoffice“ (Kapitel 4.3.1). Somit ist auch hier anzunehmen, dass Metallerze zur Herstellung der Hardware benötigt werden, wohingegen Braunkohle und Steinkohle zur Energiebereitstellung in der Produktionsvorkette dienen.

#### **Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe**

Die für das Smart-Home-System verwendeten Leiterplatten und Chips enthalten wiederum besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe. Dazu gehören beispielsweise seltene Erden, die insbesondere aufgrund ihrer Abbaubedingungen als kritisch zu betrachten sind (Bobba *et al.*, 2020).

Beim Blick auf die besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffe (**Gesamtmenge = 1267,46 g**, vgl. Abbildung 29) im Smart-Home-System fällt auf, dass Lithium fast nur in den Steuergeräten des Systems verbaut ist – nämlich im Akku des Smartphones. Auch Tantal kommt fast nur in einer Systemkomponente vor: zu 90 % in der Zusatzausstattung der Feldgeräte.

**Abbildung 29: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in Prozent und Gramm**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Rohstoffintensität der Nutzungsphase

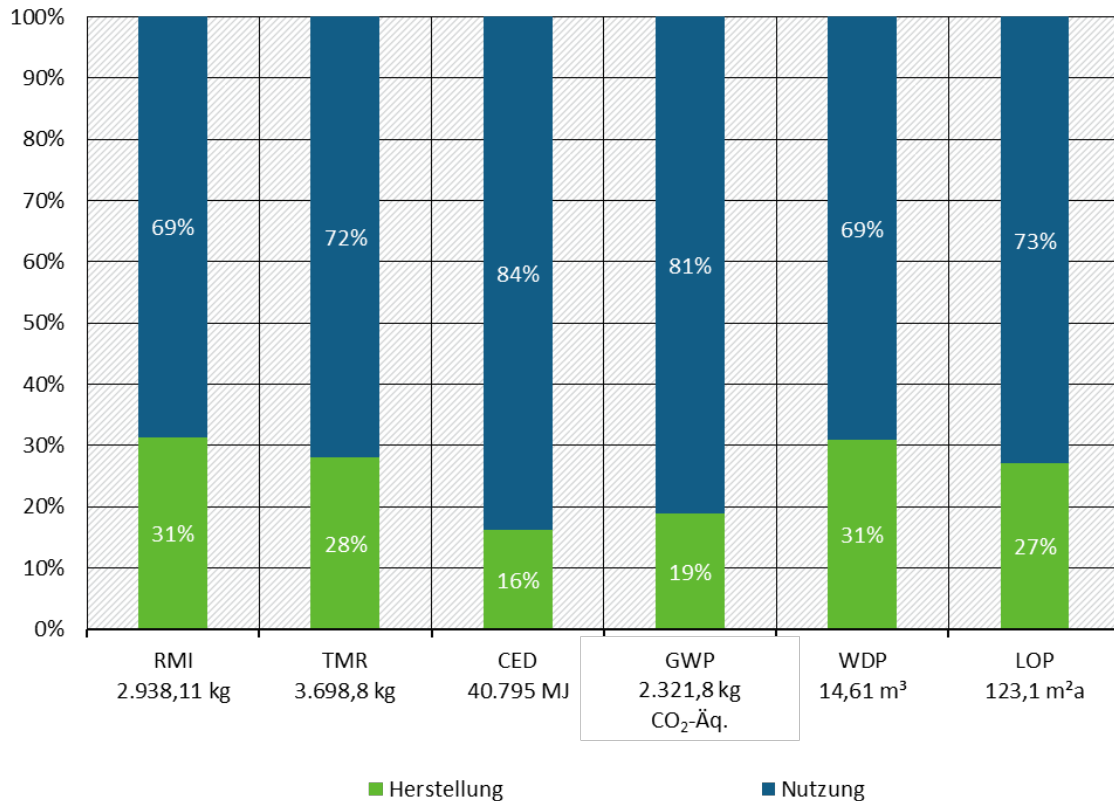
Für das betrachtete Smart-Home-System wurde über einen Nutzungszeitraum von fünf Jahren ein Primärrohstoffeinsatz (RMI) von **2.016 kg** berechnet (davon 74 % fossile Energieträger, 12 % Metallerze, 13 % nichtmetallische Mineralien, 2 % Biomasse). Dieser RMI geht hauptsächlich auf den Stromverbrauch der Endgeräte und ihre Rohstoffintensität zurück: Die Komponenten müssen jederzeit erreichbar sein und benötigen durchgängig Strom. Der berechnete Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) beläuft sich auf **2.663,1 kg**.

### Vergleich von Herstellungs- und Nutzungsphase

Der Vergleich der berechneten Ressourcen- und LCA-Indikatoren nach Anteilen in der Herstellungs- bzw. Nutzungsphase zeigt: Die Ressourcenintensität des Smart-Home-Systems ist in der Nutzungsphase für sämtliche Indikatoren höher als in der Herstellungsphase (Abbildung 30). Grund hierfür ist die Nutzungsdauer von fünf Jahren, in der das System kontinuierlich Strom braucht. Deutlich wird dies bei der Berechnung des Wasserfußabdrucks (WDP): Während der Herstellungsphase beläuft er sich auf **4,5 m³**, während der Nutzungsphase von fünf Jahren

auf **10,1 m<sup>3</sup>**. Vom Landnutzungspotenzial (LOP) entfallen rund 73 % auf die Nutzungsphase. Diesen Berechnungen liegt der deutsche Strommix aus dem Jahr 2021 zugrunde.

**Abbildung 30: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase\***



\*Anmerkung/Erläuterung: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

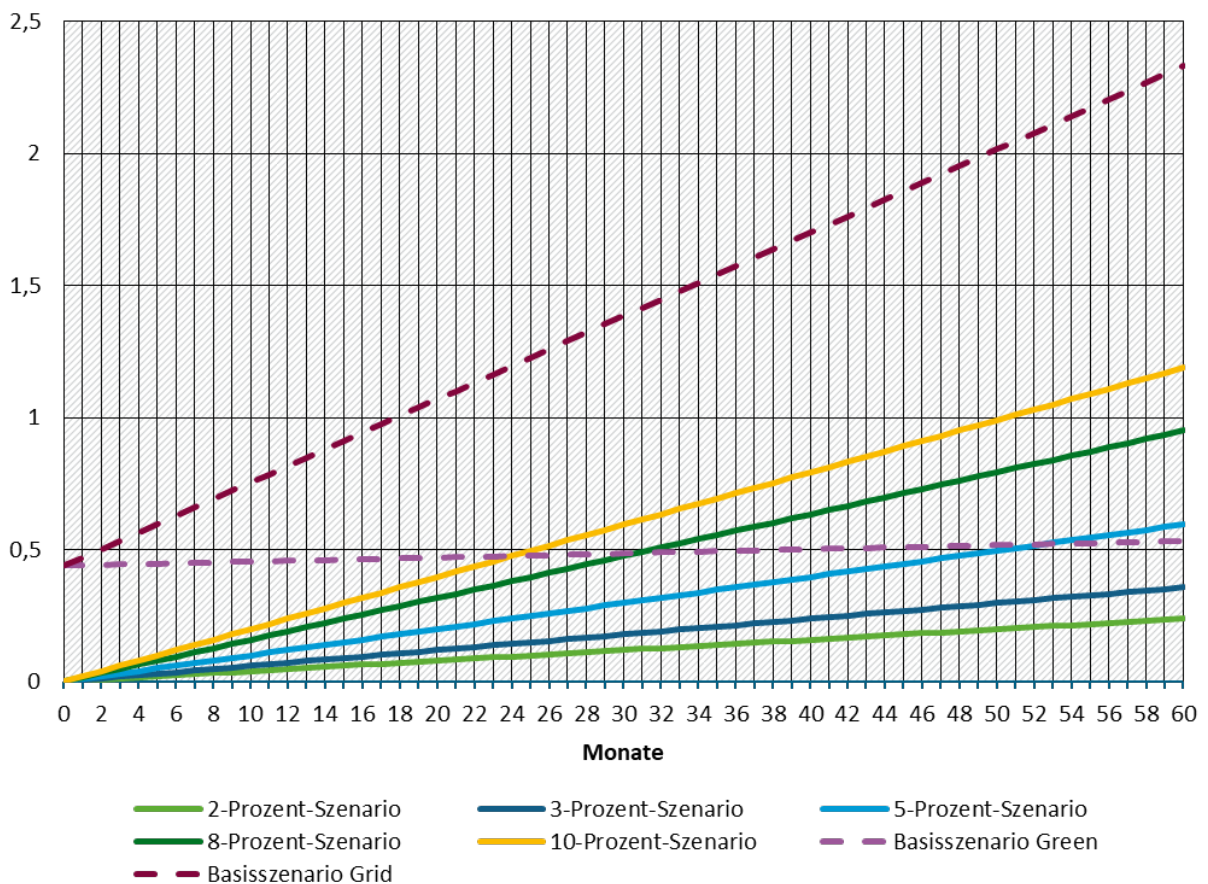
Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Analyse von Energiesparparzenarien

Die meiste Energie spart ein Smart-Home-System beim Heizen (*Smart Heating*). Doch wie groß ist der Ressourcenschonungseffekt durch das Smart-Home-System genau? Diese Frage beantwortet der Vergleich von fünf Szenarien mit unterschiedlichen Energiesparpotenzialen (2 %, 5 %, 8 %, 10 %) für das betrachtete Einfamilienhaus. Sie werden dem Energiebedarf durch das Smart-Home-System gegenübergestellt. Die betrachteten Indikatoren in den Szenarien sind der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (GWP) und der kumulierte Energiebedarf (CED). In den Szenarien kreuzen sich je nach Höhe der Einsparung nach einer gewissen Zeit der Energieaufwand für die Produktion und für die Nutzung des Smart-Home-Systems (Break-even-Point). Dieser Energieaufwand wird für die Nutzungsphase sowohl mit dem deutschen Strommix 2021 (Basisszenario *Grid*) als auch mit dem deutschen Grünstrommix 2021 (Basisszenario *Green*) berechnet. So lassen sich auch die Treibhausgasemissionen (THG) bestimmen.

Abhängig davon, ob ein Grünstrommix oder der deutsche Standardstrommix einfließen, verschiebt sich der Break-even-Point für den GWP erheblich (siehe Abbildung 31). Mit dem deutschen Strommix erzielt keines der fünf Szenarien eine THG-Einsparung – weder innerhalb des Betrachtungszeitraums noch danach. Mit dem Grünstrommix hingegen gibt es einen Break-even-Point: in den 8- und 10-Prozent-Szenarien nach rund 2,5 Jahren, im 5-Prozent-Szenario knapp innerhalb des Betrachtungszeitraums. Die anderen Szenarien erreichen den Break-even-Point erst danach. Beim kumulierten Energieaufwand erreicht keines der Szenarien innerhalb von fünf Jahren einen Break-even-Point. Lediglich das 8- und das 10-Prozent-Szenario führen nach 221 bzw. 73 Monaten überhaupt zu einer Energieeinsparung.

**Abbildung 31: Vergleich der Treibhausgasemissionen der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ mit Szenarien zur Treibhausgaseinsparung in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äq<sup>32</sup>**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Fallstudie bestimmt die Ressourcenintensität sowie das Energie- und Treibhausgaseinsparpotenzial durch die Herstellung und fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems. Vor allem ein *Smart-Heating*-System bietet die Möglichkeit von Energieeinsparungen. Doch für eine tatsächliche Umweltentlastung muss die durch das Smart-Home-System im Haus eingesparte Energiemenge diejenige Energiemenge übersteigen, die für die Herstellung und Nutzung des Systems nötig ist. Verschiedene Szenarien in dieser Fallstudie zeigen allerdings, dass die Energie-/Treibhausgaseinsparpotenziale stark von der

<sup>32</sup> Zu den Details der Szenarien siehe Abraham *et al.* (2023b) Abschnitt B.3.2.

Nutzungsdauer und den Ressourcen- und Energiebedarfen des Systems und des Hauses abhängen. Letztlich ergeben sich kaum positive Effekte für eine Entlastung der Umwelt. Die Treibhausgasemissionen lassen sich innerhalb der fünfjährigen Nutzungsdauer lediglich dann reduzieren, wenn das Smart-Home-System Grünstrom nutzt und mindestens 5 % Heizenergie einspart. Mit dem deutschen Standardstrommix sinken die Treibhausgasemissionen nicht. Die Energieersparnis von mindestens 5 % tritt aber nicht automatisch ein, sondern hängt stark vom individuellen Nutzungsverhalten ab. Aufgrund des hohen Herstellungsaufwands und des permanenten Strombedarfs in der Nutzungsphase ergibt sich keine Energieeinsparung.

### 4.3.3 Fallstudie digitale Medien

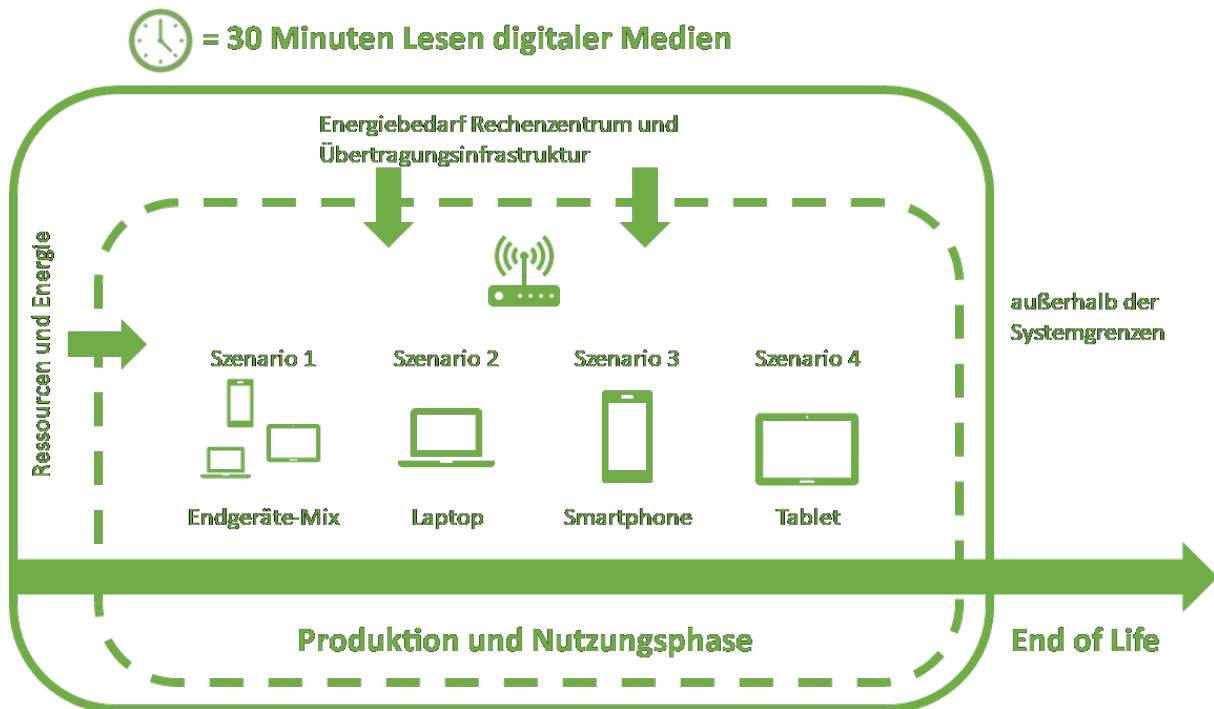
Ein Großteil der Deutschen konsumiert mittlerweile statt klassischer Medien digitale Nachrichten und Informationen (BVDW, 2018; Newman *et al.*, 2022). Inzwischen informieren sich 92 % der Deutschen mehrmals wöchentlich online über die aktuellen Geschehnisse. Dabei sind immer mehr Nutzende bereit, für digitale Nachrichtenangebote zu bezahlen (Newman *et al.*, 2022). Außerdem liest inzwischen etwa ein Drittel der Deutschen auch digitale E-Books, wobei jede\*r Zehnte von ihnen angibt, diese sogar überwiegend zu nutzen (Bitkom, 2022). Weltweit ist von 2016 bis 2018 die Zeit, die täglich mit der Lektüre von Onlinepresse verbracht wird, von 50 auf 59 Minuten gestiegen (Bayindir & Paisley, 2019; BMBF, 2022b).

Die zu erwartenden Umwelteffekte durch den steigenden Konsum digitaler Medien sind keineswegs eindeutig. Einerseits ist davon auszugehen, dass die digitalen Formen journalistischer und publizistischer Erzeugnisse im Vergleich zu klassischen Printmedien erhebliche Mengen von Papier und Druckerfarbe sowie Energie einsparen. Andererseits verursacht der Konsum digitaler Medien erhebliche Rohstoffbedarfe und Umweltfolgen: Endgeräte müssen hergestellt, Datennetzwerke und Rechenzentren bereitgestellt und betrieben werden. Zudem ist zu vermuten, dass die niedrigschwellig und oft kostenfrei zugänglichen Onlinemedien die Nachfrage nach digitalen Medien insgesamt verstärken werden – mit der Folge höherer Umweltbelastungen.

Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Fallstudie die Ressourcenintensität des Anwendungsfalles „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ (siehe Abbildung 32). Die Ressourcenintensität beim Erstellen digitaler Inhalte fließt nicht ein, da sie sich bei analogen und digitalen Medien nicht unterscheidet. Somit beleuchtet die Fallstudie die Ressourcenintensität der mit dem digitalen Bereitstellen und Abrufen verbundenen Prozesse sowie die Ressourcenintensität der hierfür benötigten Endgeräte. Da die Endgeräte nicht ausschließlich zum Lesen digitaler Medien dienen, kommt die Ressourcenintensität der Herstellungsphase anteilig für den Anwendungsfall zum Tragen<sup>27</sup>. Die vier miteinander verglichenen Szenarien unterscheiden sich in den verwendeten Endgeräten: Smartphone, Laptop, Tablet und eine Mischung der drei Geräte (siehe Abbildung 33).



**Abbildung 32: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „30 Minuten Lesen digitaler Medien“**



Verwendete Einflussgrößen: Gerätekombination für das Szenario 1 Endgeräte-Mix: Smartphone 47,5 %, Laptop 35,8 %, Tablet 16,7 % (basierend auf Newman *et al.*, 2022); übertragene Datenmenge: 5 MB; Energiebedarf für Datenübertragung: 0,0016 kWh/GB für eine VDSL-Verbindung (Gröger *et al.*, 2021); Leistungsaufnahme im Rechenzentrum: 1 kWh/GB (Malmodin *et al.*, 2014; Aigner, 2018).

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

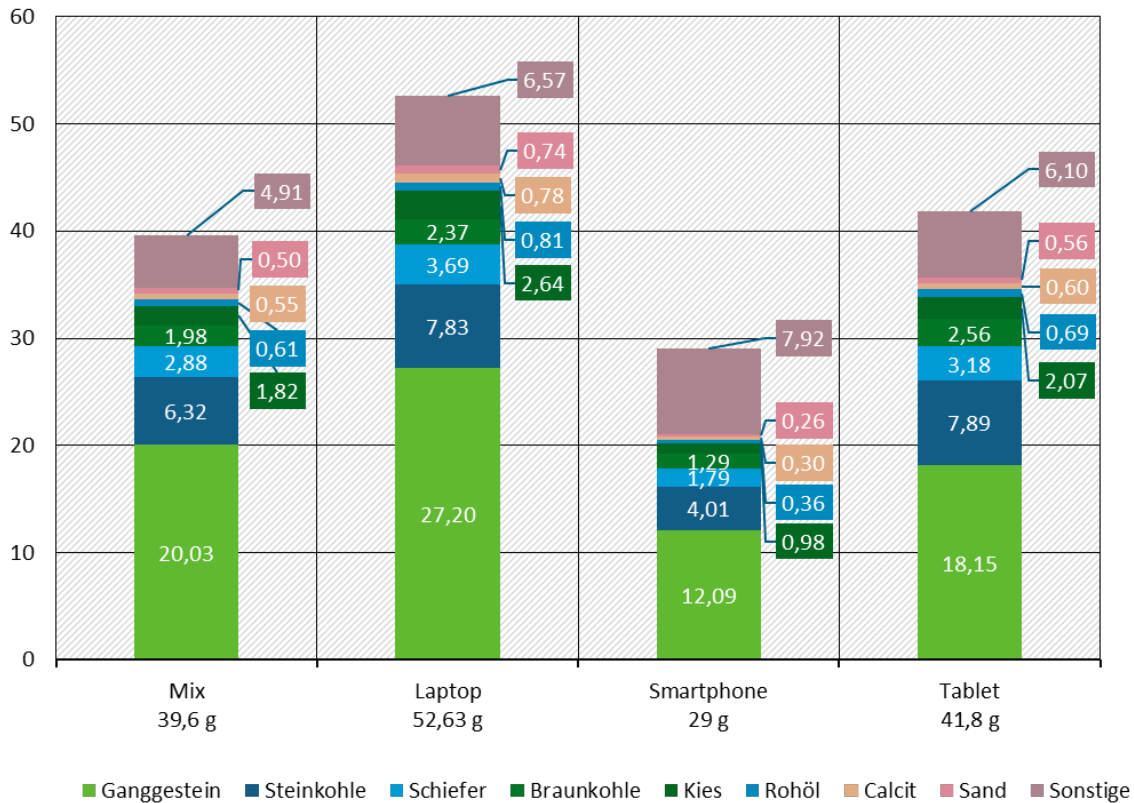
### Ressourcenintensität der Herstellungsphase

Die Fallstudie untersucht die im Forschungsvorhaben behandelten Ressourcenindikatoren in Bezug auf Herstellung und Nutzung der Endgeräte sowie Bereitstellung der Internetverbindung. Entsorgungs- und Recyclingprozesse sind in dieser Fallstudie nicht berücksichtigt (vgl. Abbildung 32).

Abbildung 33 zeigt den Primärrohstoffeinsatz nach Rohstoffarten in der Herstellungsphase je Endgerät-Szenario. Die mineralischen und fossilen Rohstoffe machen 91 % (36,2 g/30 min, vgl. Abbildung 33) des gesamten Primärrohstoffeinsatzes von **39,6 g/30 min** aus im Szenario 1 (Endgeräte-Mix) aus. In den anderen Szenarien zeigt sich ein ähnliches Bild wie im Endgeräte-Mix Szenario. Im Szenario 2 (Laptop) haben die mineralischen und fossilen Rohstoffe insgesamt einen Anteil von 92 % (48,3 g/30 min, vgl. Abbildung 33) an dem Primärrohstoffeinsatz von **52,6 g/30 min**. Mit einem gesamten Primärrohstoffeinsatz der Herstellungsphase von **29 g/30 min** hat das Szenario 3 (Smartphone) den geringsten Primärrohstoffeinsatz von allen Szenarien. 76 % fallen davon auf fossile und mineralische Rohstoffe (21,9 g/30 min, vgl. Abbildung 33). In Szenario 4 (Tablet) machen die mineralischen und fossilen Rohstoffe 89 % (37,4 g/30 min, vgl. Abbildung 33) vom gesamten Primärrohstoffeinsatzes der Herstellungsphase (**41,8 g/30 min**) aus. Bei allen Gerätekombinationen dominiert die Entnahme von Metallerzen im Zusammenhang mit Ganggestein, was auf die intensive Verwendung von Metallen bzw. Metallerzen bei der Herstellung der benötigten Geräte zurückgeht. Daneben spielen Stein- und Braunkohle (Energieprozesse), Kies, Schiefer sowie Sand (Bauprozesse) mengenmäßig eine

geringere Rolle. Unter „Sonstige“ fallen vorrangig Calcit (2 g), Rohöl (1,7 g), Lehm (1,4 g) und Eisen (1,2 g). Der Großteil der Rohstoffe und Materialien wird in der Produktionsvorkette und zur Energiebereitstellung beansprucht. Die verwendeten Mengen schwanken je nach betrachtetem Endgerät.

**Abbildung 33: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8

In Abhängigkeit von der Gerätekombinationen – also je nach Szenario - benötigt die Herstellung einen Primärrohstoffeinsatz von **29 bis 52,6 g** pro 30 Minuten Lesen. In dem Gerätemix-Szenario beträgt der RMI der Herstellungsphase z.B. **39,6 g**. Wird auch die ungenutzte Materialentnahme in die Berechnung miteinbezogen, ergibt sich ein Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) von **32,7 bis 59,4 g** pro 30 Minuten Lesen. Der TMR für das Gerätemix-Szenario der Herstellungsphase beträgt **44,9 g** pro 30 Minuten Lesen. Die geringsten Werte bei RMI und TMR für das Lesen digitaler Medien erzielt im Vergleich der Szenarien die Nutzung des Smartphones (Szenario 3). Die höchsten Werte entstehen bei Nutzung des Laptops (Szenario 2). Dieser höhere Rohstoffbedarf ist auf die ressourcenintensivere Herstellung des Laptops zurückzuführen (detaillierte Informationen zu den Rohstoffgruppen können in Abraham *et al.*, 2023b nachgelesen werden). Besonders das Display und gedruckte Leiterplatten fallen hierbei ins Gewicht. Dieser Anwendungsfall weist daher einen höheren Rohstoffbedarf auf – obwohl für den Laptop im Vergleich zum Smartphone sowohl eine längere wöchentliche Nutzung als auch eine längere Lebensdauer angenommen wird. Bemerkenswert ist zudem, dass in jedem der untersuchten Szenarien ein erheblicher Teil des Rohstoffbedarfs auf die Herstellung des Routers zurückzuführen ist.

### Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe

Die besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffe, die für die Herstellung der Endgeräte notwendig sind, spielen mengenmäßig eine untergeordnete Rolle: Je nach Endgerät belaufen sie sich für die Untersuchungseinheit auf **0,004 bis 71,272 mg** (siehe Tabelle 9).

**Tabelle 9: Ausgewählte digitalisierungsrelevante Rohstoffe und ihre eingesetzte Menge zur Herstellung in den jeweiligen Endgeräten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Milligramm nach Geräten**

Rohstoff	Menge der Rohstoffe nach genutztem Endgerät (mg)			
	Mix	Laptop	Smartphone	Tablet
Gallium	0,010	0,017	0,004	0,012
Lithium	0,210	0,348	0,073	0,304
Tantal	0,030	0,020	0,026	0,063
Kupfer	52,997	71,272	38,689	54,517
Gold	0,080	0,112	0,061	0,065
Nickel	11,248	16,682	7,083	11,445
Silber	0,447	0,621	0,342	0,374
Zinn	2,939	3,403	2,569	2,997

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Für 30 Minuten Lesen digitaler Medien fallen neben Lithium und Kupfer weitere sechs Rohstoffe besonders ins Gewicht. Generell weist im Vergleich der Szenarien der Laptop die höchsten Rohstoffbedarfe für den Anwendungsfall auf. Lediglich die Tantalmenge ist für die Herstellung des Tablets im Vergleich zum Laptop anteilig höher. Tantal ist ein wichtiger Bestandteil von Kondensatoren, wie sie beispielsweise für die Leiterplatten in den Endgeräten notwendig sind.

### Ressourcenintensität der Nutzungsphase

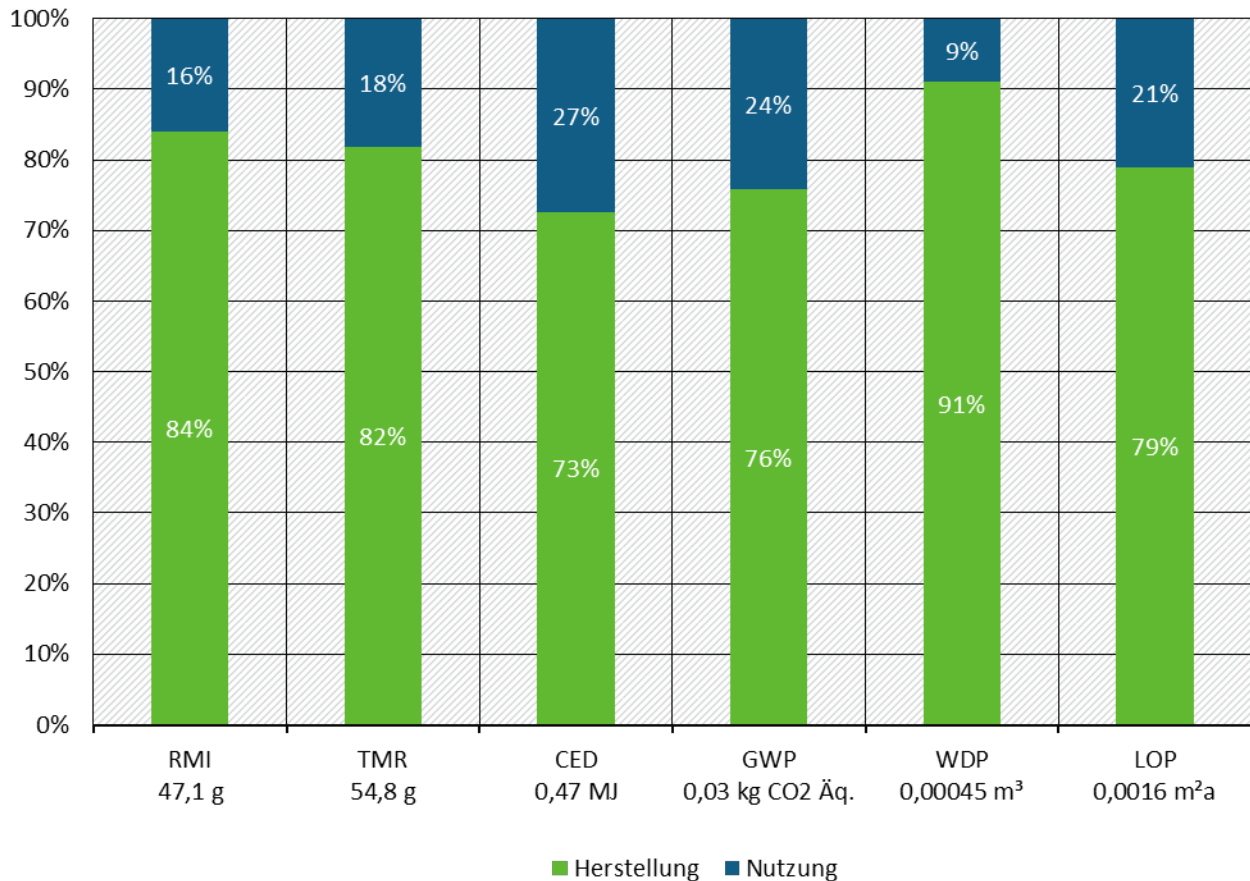
Halbstündiges digitales Lesen bedingt, je nach betrachtetem Endgerät, einen Primärrohstoffeinsatz zwischen **6,8 und 8,6 g** in der Nutzungsphase. In dem Gerätemix-Szenario beträgt der RMI z.B. **7,5 g**. Der Primärrohstoffeinsatz in der Nutzung geht hauptsächlich auf die Strombedarfe der End- und Netzwerkzugangsgeräte der Lesenden und deren Rohstoffintensität zurück. Daher sind die Anteile vom zugrundeliegenden Strommix abhängig. Der deutsche Strommix ist immer noch durch fossile Energieträger mitgeprägt, die den Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase anteilig dominieren. Der errechnete Gesamtprimärmaterialaufwand der Nutzungsphase beträgt je nach Endgerät zwischen **9,0 und 11,3 g**. In dem Gerätemix-Szenario beträgt der TMR z.B. **9,9 g**.

### Vergleich von Herstellungs- und Nutzungsphase

Abbildung 34 zeigt den Primärrohstoffeinsatz (RMI) und den Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) und enthält auch die weiteren im Forschungsvorhaben berechneten Indikatoren, und zwar exemplarisch für das Szenario Endgeräte-Mix mit absoluten Werten sowie mit den Anteilen an der Herstellungs- und Nutzungsphase. Über alle Indikatoren hinweg ist die Herstellungsphase dominant. Die Indikatoren mit dem höchsten Anteil der Nutzungsphase sind

der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und der kumulative Energiebedarf. Beim Wasserfußabdruck hingegen hat die Nutzungsphase weniger als ein Zehntel Einfluss.

**Abbildung 34: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase im Gerätemix-Szenario\***



\*Anmerkung/Erläuterung: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Zusammenfassung und Ausblick

Das Lesen von digitalen Nachrichten, aber auch von Magazinen und anderen Publikationen in digitaler Form, ist inzwischen aus dem Alltag der meisten Deutschen nicht mehr wegzudenken. Weiteres Potenzial für digitales Lesen, beispielsweise im Bereich von E-Books, ist erkennbar. Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Studie, welche Ressourcenintensität und welche ausgewählten anderen Umweltwirkungen dieser Aspekt der Digitalisierung verursacht.

Die errechneten Rohstoffbedarfe und potenziellen Umweltfolgen der Untersuchungseinheit erscheinen im Einzelfall nicht hoch. Allerdings dürfte der betrachtete Anwendungsfall in Deutschland täglich millionenfach auftreten: An einem durchschnittlichen Wochentag konsumieren 77 % der Deutschen per Laptop, 69 % per Smartphone und 35 % per Tablet digitale Medien (BVDW, 2018). Man kann also den Primärrohstoffeinsatz des Anwendungsfalls

überschlägig auf den wöchentlichen Bedarf in Deutschland hochrechnen (Endgeräte-Mix, 84 Mio. Menschen, 75 % lesen täglich 30 Minuten digital). Dann ergibt sich ein Primärrohstoffeinsatz von rund 20.771 Tonnen pro Woche (für Herstellung und Nutzung kombiniert). Ein Großteil dieses Rohstoffbedarfs entfällt auf die Produktionsphase der Endgeräte. Diese würden aber wohl auch ohne den Anwendungsfall nachgefragt. Dennoch muss für eine sinnvolle Bilanz von Rohstoffbedarfen und Umweltfolgen digitaler Anwendungen auch die Herstellungsphase anteilig den einzelnen Verwendungen zugeschrieben werden. Im Endeffekt bedingt nämlich erst die Gesamtheit der Verwendungen die Notwendigkeit, ein Endgerät herzustellen.

Die Ergebnisse dieser Fallstudie lassen keine generellen Schlüsse für das Umweltentlastungspotenzial des Anwendungsfalls zu, da kein direkter Vergleich zum potenziellen Referenzszenario (im vorliegenden Fall: Lesen von klassischen Print-Publikationen) stattfand. In der Literatur finden sich jedoch Vergleiche des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks von digitalem Lesen mit analogen Referenzszenarien (vgl. hierzu z. B. Moberg *et al.*, 2007; Aigner, 2018). Hier deuten die Ergebnisse darauf hin, dass das Lesen digitaler Medien einen kleineren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck verursacht als der Konsum konventioneller Print-Produkte. Die vorliegende Studie kann aber durchaus Aussagen über Optimierungspotenzial aus Umweltsicht beim digitalen Lesen treffen. So hängen Rohstoffbedarf und Umweltfolgen stark von der Art des genutzten Endgerätes ab: Kleinere Geräte wie Smartphones haben – trotz der geringeren Lebens- und Nutzungsdauer – einen geringeren Rohstoffbedarf als Laptops und Tablets. Folglich lässt sich das Umweltentlastungspotenzial des Anwendungsfalls erhöhen, indem kleine und multifunktionale Geräte beziehungsweise Geräte mit einer ressourceneffizienten Herstellung fürs digitale Lesen zum Einsatz kommen.

#### 4.3.4 Fallstudie *E-Grocery*: Online-Lebensmittelhandel

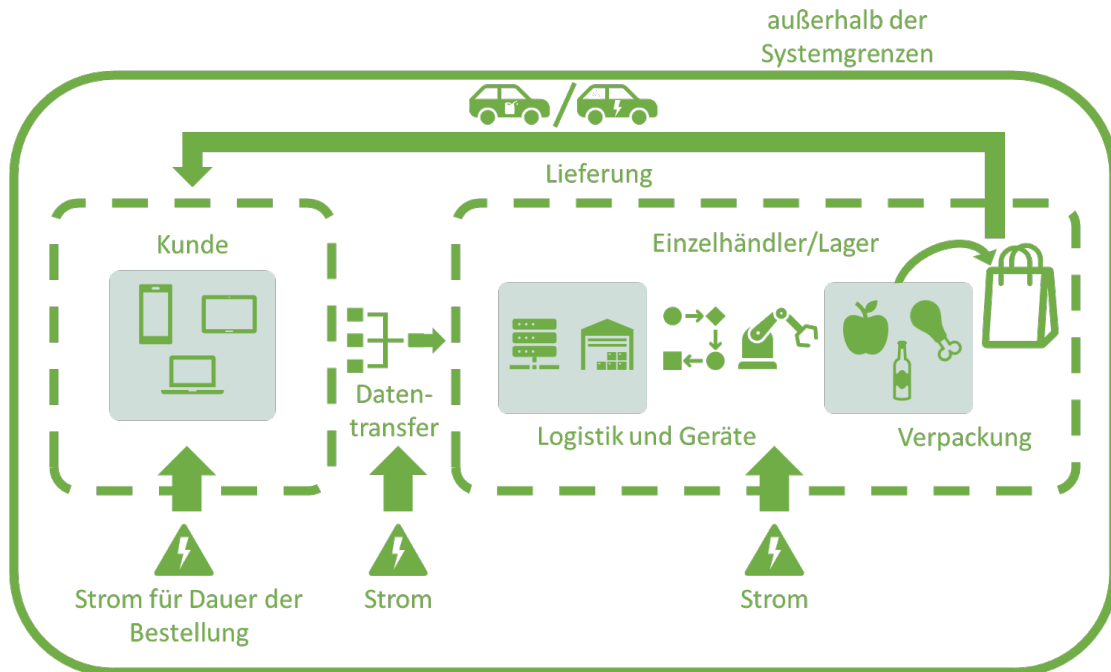
Der Trend zu *E-Grocery* (Online-Lebensmittelhandel), bei dem mit wenigen Klicks Lebensmittel im Internet bestellt und nach Hause geliefert werden, verstärkte sich während der Covid-19-Pandemie deutlich. Der Umsatz dieser Branche verdoppelte sich zwischen 2019 und 2021 (Statista, 2021b). Supermarktketten wie beispielsweise REWE verweisen auf die positiven Auswirkungen, die ihr Lieferservice auf die Energie- und Umweltbilanz habe. Laut REWE reduziert die Zusammenlegung von Bestellungen zu einer Liefertour den Individualverkehr, da die Kunden\* Kundinnen nicht mehr einzeln mit dem Pkw zum Geschäft fahren müssen.<sup>33</sup> Der wachsende Markt für *E-Grocery* könnte also in Zukunft ein Umweltentlastungspotenzial entfalten – wenn die Lebensmittel-Lieferservices tatsächlich die Einkaufsfahrten von Kunden\* Kundinnen ersetzen und somit den Verkehr in den Städten reduzieren (Hardi & Wagner, 2019). Verfügbare Studien konzentrieren sich zumeist auf den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck des Transports zu den Kunden\* Kundinnen. Die Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekte können aber deutlich weitreichender sein: Zu berücksichtigen sind beispielsweise Logistik, Lager, Transport, aber auch Datenübertragung.

Auf Basis von echten *E-Grocery*-Anwendungsfällen aus der Fachliteratur (Tabelle 10) und begründeten Annahmen (Tabelle 11) der Fallstudie modelliert das Forschungsvorhaben ein Anwendungsszenario für einen *E-Grocery*-Einkauf (siehe Abbildung 35). Da es manchmal mehrere Optionen gibt, arbeitet die vorliegende Fallstudie mit einem ressourcenschonenden und einem ressourcenintensiven Szenario. Die Ergebnisse werden vergleichend dargestellt. Der Untersuchungsrahmen der Fallstudie umfasst die Durchführung, Bereitstellung und Lieferung einer Online-Lebensmittelbestellung. Grundlage ist eine klassische Online-

<sup>33</sup> <https://www.rewe.de/nachhaltigkeit/nachhaltig-einkaufen/transport-und-verarbeitung/> (Stand: 25. Januar 2023)

Lebensmittelbestellung mit einer repräsentativen Anzahl an Produkten. Inbegriffen sind die Prozesse von der Ankunft der Waren im Lager über die Kommissionierung bis hin zur Auslieferung an die Endkunden\*Endkundinnen.

**Abbildung 35: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Für beide Szenarien gelten, basierend auf Siragusa und Tumino (2021), einheitliche Annahmen zur Anzahl der gekauften Waren, zur Größe des Warenlagers, zur Strecke der Zustellroute, zu den Auslieferungen pro Zustellroute und zu den zugehörigen Stromverbräuchen (Tabelle 10).

**Tabelle 10: Aus der Literatur entnommene Input-Werte, die zur Modellierung der Fallstudie „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ verwendet wurden**

Art der Nutzung	Wert	Einheit
Durchschnittliche Stückzahl pro Bestellung	65	Stück/Bestellung
Lager	5.000	m <sup>2</sup>
Durchschnittliche Strecke pro Zustellroute	60	km
Durchschnittliche Anzahl von Auslieferungen pro Zustellroute	12	Lieferungen
Stromversorgung der Geräte, die während der Online-Aktivitäten der Kunden*Kundinnen genutzt werden	0,1157	kW
Stromversorgung der Geräte während der Online-Aktivitäten des Einzelhändlers	0,2313	kW
Stromversorgung eines Kommissionierers	2,80	kW
Stromversorgung eines Gabelstaplers	4,50	kW

Art der Nutzung	Wert	Einheit
Verbrauch der Lagerhäuser	82,06	kWh/m <sup>3</sup> a

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Siragusa und Tumino (2021)

Die sich unterscheidenden Annahmen für die beiden Szenarien sind in Tabelle 11 zusammengefasst.

**Tabelle 11: Annahmen der Szenarien für relevante Inputs der Fallstudie „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“**

Parameter/Annahme	Ressourcenschonendes Szenario	Ressourcenintensives Szenario
Höhe des Lagers	5 m	10 m
Bestellungen pro Tag	1.000	500
Bestelldauer Endkund*in	15 min	30 min
Nutzungsdauer IT Einzelhändler	1 min	5 min
Strombedarf Website-Request	0,03 Wh	0,3 Wh
Anzahl Website-Requests pro Einkauf	5	10
Einsatz Kommissionierer	-	5 min
Einsatz Gabelstapler	-	5 min
Anzahl und Gewicht der Papiertüten	4 Stück, 60 g	8 Stück, 60 g
Transportmittel	Kl. Lieferwagen mit elektrischem Antrieb	Kl. Lieferwagen EURO 5

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Siragusa und Tumino (2021)

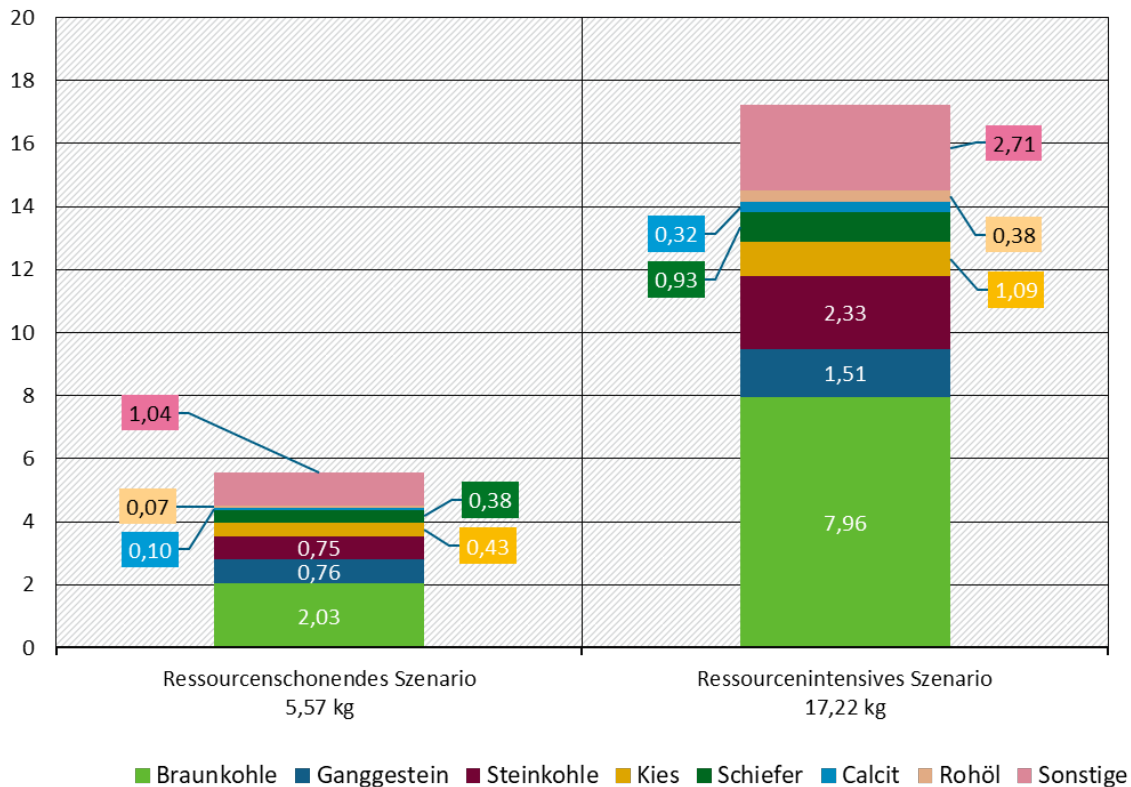
### Ressourcenintensität

Die Fallstudie untersucht die im Forschungsvorhaben betrachteten Ressourcen-Indikatoren für einen *E-Grocery*-Einkauf. Sie enthält ein ressourcenschonendes und ein ressourcenintensives Szenario. Entsorgungs- und Recyclingprozesse sind in dieser Fallstudie nicht berücksichtigt.

Der RMI beträgt im ressourcenschonenden Szenario insgesamt **5,6 kg** und der TMR **7,4 kg**. Im ressourcenintensiven Szenario ergibt sich ein RMI von **17,2 kg** und ein TMR von **22,9 kg**.

Den größten Anteil am Primärrohstoffeinsatz in beiden Szenarien haben die fossilen und mineralischen Rohstoffe. Im ressourcenschonenden Szenario machen sie 84 % (4,7 kg, vgl. Abbildung 36) des gesamten RMIs aus und im ressourcenintensivem 87 % (14,9kg, vgl. Abbildung 36).

**Abbildung 36: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Kilogramm**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Insgesamt sind die Ergebnisse des ressourcenintensiven Szenarios mehr als dreimal so hoch als die Ergebnisse des ressourcenschonenden Szenarios. Dies verdeutlicht, dass der Rohstoffbedarf von E-Grocery-Angeboten maßgeblich von deren Ausgestaltung abhängt. Der Großteil des RMI ist auf den Bedarf an fossilen Rohstoffen zurückzuführen, die hauptsächlich den Energiebedarf des Lagers decken (Abbildung 36). Auch die Lieferung macht im ressourcenschonenden Szenario mit rund 11 % einen recht großen prozentualen Anteil am gesamten RMI aus. Detaillierte Informationen zu den Rohstoffgruppen können in Abraham *et al.*, 2023b nachgelesen werden.

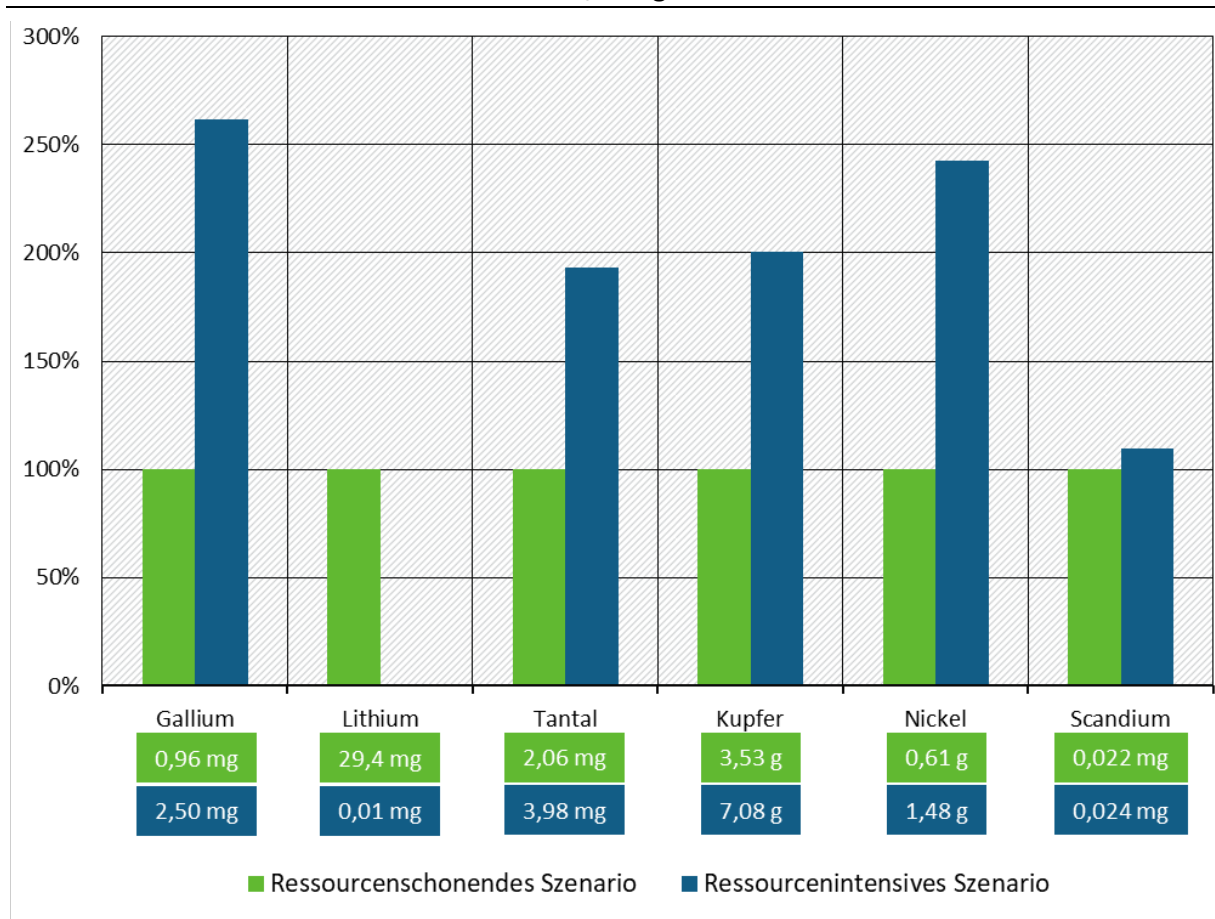
#### Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe

Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe (**Gesamtmenge im ressourcenschonenden Szenario = 36,58 mg und 15,07 mg im ressourcenintensiven Szenario**) werden hauptsächlich für den Energiebedarf des Lagers, den Transport (allokierte Herstellung und Betrieb des Lieferwagens) und die Papiertragetaschen aufgewendet. Der Bedarf an den Rohstoffen Gallium, Tantal, Kupfer, Nickel und Scandium ist im ressourcenintensiven Szenario deutlich erhöht. Lithium hingegen ist nur im ressourcenschonenden Szenario wichtig (Abbildung 37); der berechnete Bedarf im ressourcenschonenden Szenario wurde auf 100 % normiert, damit der Bedarf im ressourcenintensiven Szenario als Verhältnis dazu angegeben werden kann). Grund dafür ist die Annahme, dass für die Lieferung im ressourcenschonenden Szenario ein elektrisch betriebenes Fahrzeug dient. Dessen Batterie verursacht den erhöhten Bedarf an Lithium: Über 99 % des errechneten Lithiumbedarfs in diesem Szenario sind auf die



Batterie zurückzuführen. Das zeigt, dass der Bedarf an digitalisierungsrelevanten Rohstoffen stark von den vorher getroffenen Annahmen für die Szenarien abhängt.

**Abbildung 37: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in dem ressourcenschonenden und -intensiven Szenario in Prozent und Gramm/Milligramm**

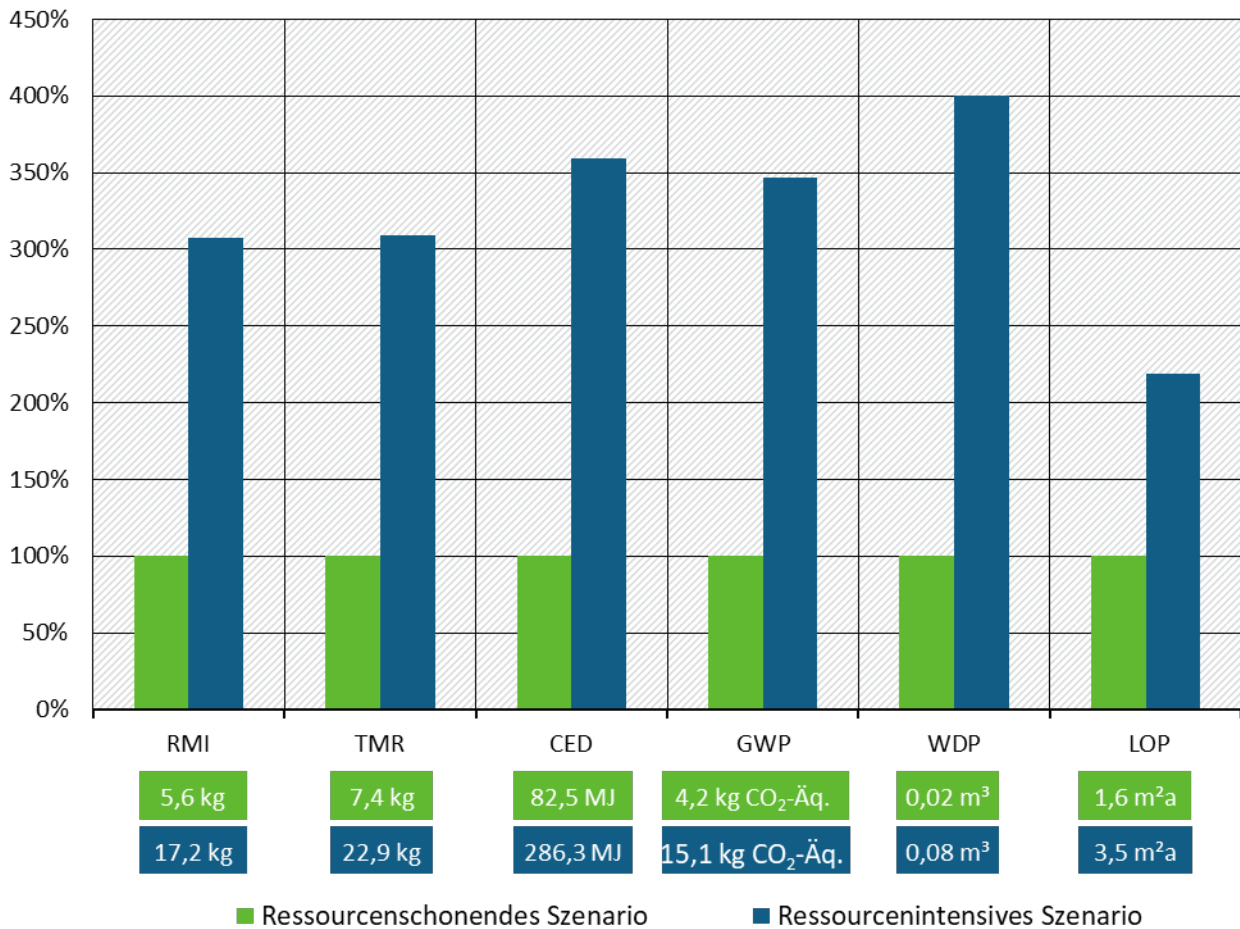


Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Vergleich der Rohstoff- und Ressourcen-Indikatoren

Die Berechnung der weiteren im Forschungsvorhaben berechneten Ressourcen-Indikatoren und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks erfolgt analog zu den Berechnungen von RMI und TMR (Abbildung 38). Der berechnete Bedarf im ressourcenschonenden Szenario wurde auf 100 % normiert, sodass der Bedarf im ressourcenintensiven Szenario als Verhältnis dazu angegeben werden kann. Im ressourcenintensiven Szenario liegen die Werte aller Indikatoren höher als im ressourcenschonenden Szenario: beim Landnutzungspotenzial (LOP) um den Faktor zwei und bei allen anderen Indikatoren um den Faktor drei.

**Abbildung 38: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ absolut und in Prozent nach Szenarien\***



\*Anmerkung/Erläuterung: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

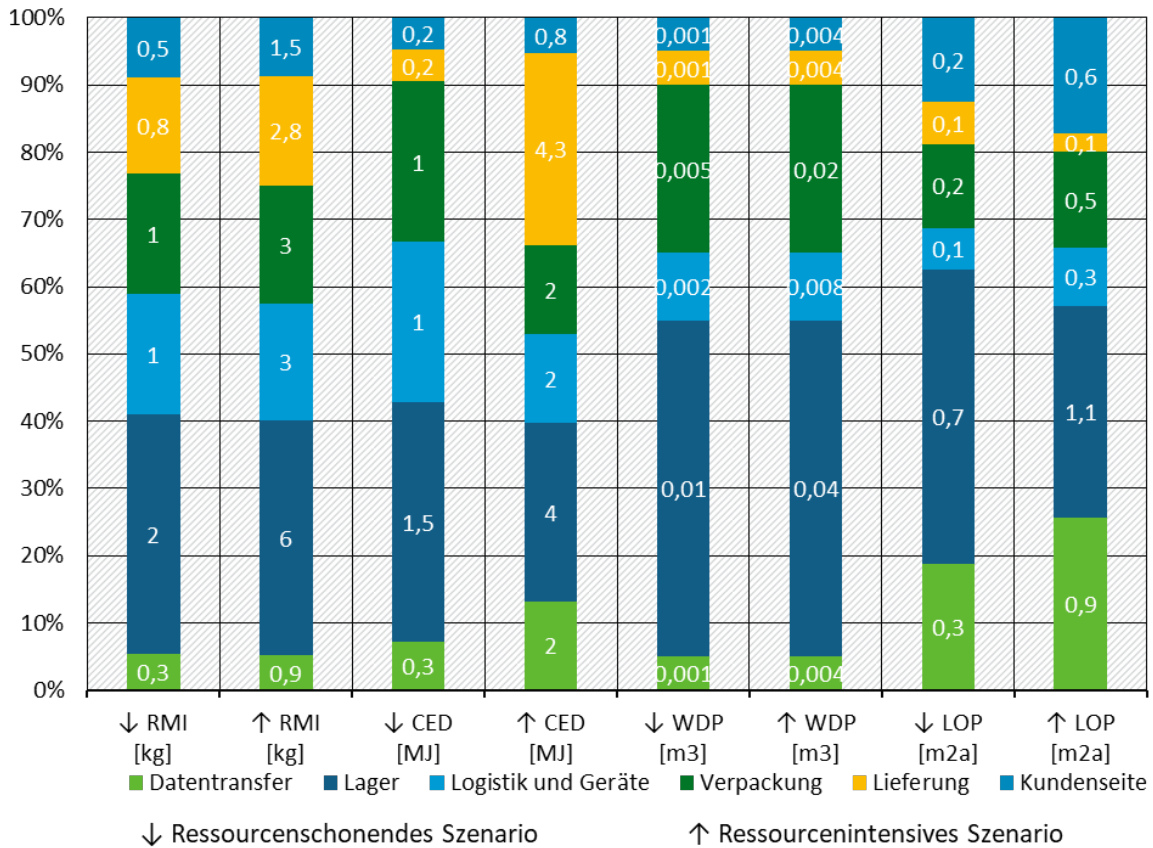
Sowohl der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck als auch der kumulierte Energieaufwand gehen in beiden Szenarien hauptsächlich auf den Energiebedarf des Lagers zurück (Abbildung 39). Dieser ist beim CO<sub>2</sub>-Fußabdruck für 80 % bzw. 89 % der Emissionen verantwortlich, beim kumulierten Energieaufwand für 74 % bzw. 85 % des Ergebnisses. Auch Lieferung und Verpackung tragen maßgeblich zu den Werten beider Indikatoren bei.

Der Wasserfußabdruck ist im ressourcenintensiven Szenario viermal so hoch wie im ressourcenschonenden Szenario (Abbildung 38). In beiden Szenarien ist er hauptsächlich durch den Energiebedarf des Lagers bedingt (Abbildung 39). Im ressourcenintensiven Szenario verursachen alle anderen Komponenten weniger als 9 % des errechneten Wasserfußabdrucks, im ressourcenschonenden Szenario hingegen 21 % – mit zusammen 20 % spielen Lieferung und Verpackung die Hauptrolle.

Der geringste Unterschied zwischen beiden Szenarien zeigt sich beim Landnutzungspotenzial (LOP) (Abbildung 38). Dieser Indikator spiegelt hauptsächlich die Herstellung, Behandlung und Entsorgung der Papierverpackung wider (Abbildung 39). Im ressourcenschonenden Szenario

entfallen 87 % des Landnutzungspotenzials darauf, im ressourcenintensiven Szenario sind es 80 %. Zweitwichtigster Faktor ist hier in beiden Szenarien der Energiebedarf zum Betrieb des Lagers.

**Abbildung 39: Vergleich ausgewählter Indikatoren der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ absolut und in Prozent nach Komponenten und Szenarien\***



\*Anmerkung/Erläuterung: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Fallstudie betrachtet die Ressourcenintensität von Bestellung, Bereitstellung und Lieferung einer Online-Lebensmittelbestellung. Aufgrund der unsicheren Datenlage werden zur Definition des Anwendungsfalls nicht nur Daten aus der Literatur herangezogen, sondern auch eine Reihe von Annahmen getroffen. Damit die Spannweite der Umwelteinflüsse sichtbar wird, werden die berechneten LCA-Indikatoren in zwei Szenarien, die sich in ihren Annahmen zur Ressourcenintensität unterscheiden, ins Verhältnis gesetzt. Die in der vorliegenden Fallstudie untersuchten Szenarien bilden also kein tatsächliches E-Grocery-Angebot ab, sondern sind als explorative Szenarien zu verstehen. Diese Szenarien sollen aufzeigen, welche Rohstoffbedarfe und Umweltwirkungen mit einem solchen Angebot verbunden sein können und welche Stellschrauben für eine möglichst umwelt- und ressourcenschonende Ausgestaltung existieren.

Grundsätzlich zeigt der Vergleich der Szenarien, wie stark Ressourcenbedarf und Umweltbelastung eines *E-Grocery*-Einkaufs von der Ausgestaltung des Angebots abhängen. Beim Landnutzungspotenzial beispielsweise hat die Verpackung der Waren in Papiertüten den größten Einfluss. Der relevanteste Faktor für die anderen Indikatoren ist der Energiebedarf für Heizen und Betrieb der Lagerhalle. Im Vergleich zum stationären Lebensmitteleinzelhandel wird hier ein Entlastungspotenzial sichtbar, denn dieser dürfte deutlich größere und energieintensivere Laden-/Lagerflächen benötigen. Es ist anzunehmen, dass sich der *E-Grocery*-Sektor in Zukunft weiter etablieren und verbreiten wird. Kommen dabei zukünftig E-Mobilität und neue Technologien wie z. B. Lieferdrohnen zum Einsatz, ist viel Potenzial für eine dynamische Entwicklung vorhanden.

#### 4.3.5 Fallstudie Carsharing

Der Verkehrssektor ist nicht nur einer der Hauptemittenten von Treibhausgasen: Er verursachte 2021 knapp 20 % der Emissionen (Umweltbundesamt, 2023). Er ist auch maßgeblich verantwortlich für die Luftverschmutzung in Städten: 43 % der Stickoxid-Emissionen in europäischen Städten entstammen dem Verkehrssektor (Umweltbundesamt, 2023). Innerhalb des Verkehrssektors ist der motorisierte Straßenverkehr für die meisten THG-Emissionen verantwortlich (96,3 % im Jahr 2019; BMUV, 2021). Gemäß Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) muss Deutschland seine Verkehrsemissionen bis zum Jahr 2045 auf null senken<sup>34</sup>. Deshalb hat sich Deutschland das Ziel gesetzt, durch mehr Elektrofahrzeuge seine Verkehrsemissionen um 40 bis 42 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Zur weiteren Reduktion und damit sich die Emissionen nicht vom Verkehrs- in den Energiesektor verlagern, muss zudem die Flotte verkleinert werden. Dazu können alternative Mobilitätskonzepte wie Carsharing einen Beitrag leisten.

Deutschland zählte im Jahr 2022 rund 30.000 Carsharing-Fahrzeuge und 3,3 Millionen angemeldete Carsharing-Nutzer\*innen (Umweltbundesamt, 2022). Allerdings hat das Carsharing bisher nur wenige private Pkw ersetzt. Eine Studie in einer Großstadt ergab, dass dort ein Carsharing-Pkw 0,3 bis 0,8 private Pkw ersetzte (Hülsmann *et al.*, 2018). Nur 12 % der Befragten einer Umfrage (Kurzweil *et al.*, 2023) gaben an, ihr Privatfahrzeug durch Carsharing-Angebote zu ersetzen.

Unter der Annahme, dass Carsharing-Angebote primär mit Elektrofahrzeugen betrieben werden, ist zunächst die Ökobilanz von Elektrofahrzeugen zu beleuchten. In der Literatur herrscht Konsens über zwei Sachverhalte: dass erstens die Batterieproduktion für viele Lebenszyklusemissionen entlang der Lieferkette verantwortlich ist und dass zweitens die Umweltwirkungen stark von dem in der Herstellungs- und Nutzungsphase dominanten Strommix abhängen (Aichberger & Jungmeier, 2020; Dai *et al.*, 2019; Dunn *et al.*, 2012; Kelly *et al.*, 2020; European Environment Agency, 2018; Emilsson & Dahllöf, 2019). Mit Blick auf die THG-Emissionen schneiden Elektrofahrzeuge – je nach Strommix in der Nutzungsphase – nach 44.000 bis 70.000 Kilometern besser ab als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (Ellingsen *et al.*, 2016).

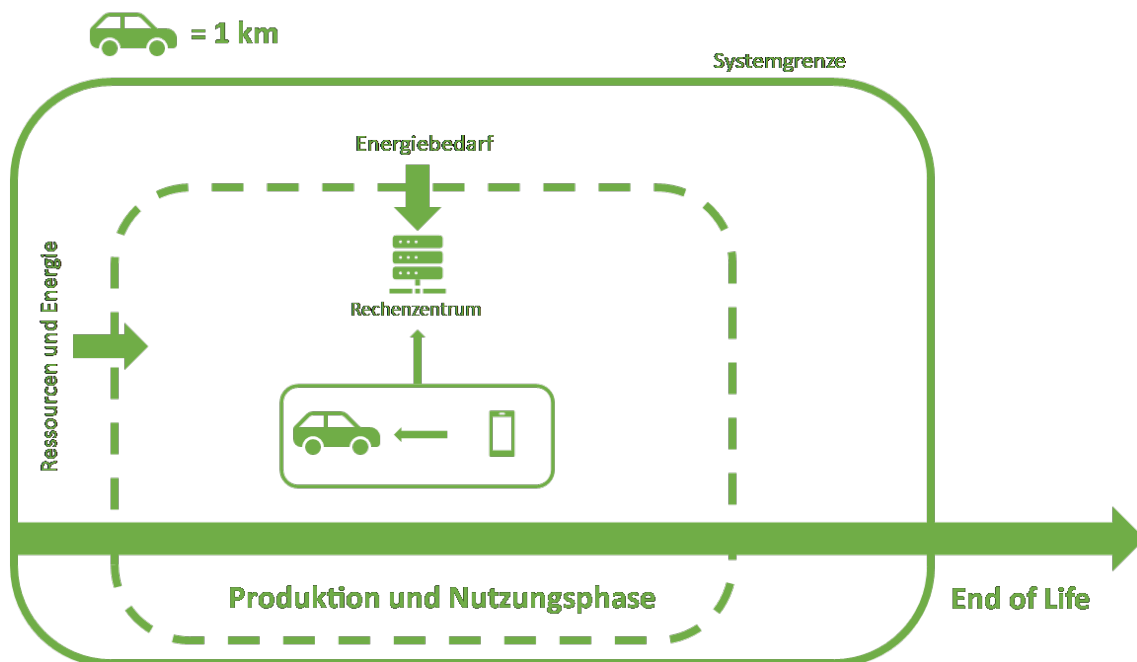
Unter zwei Voraussetzungen ist zu erwarten, dass Carsharing die THG-Emissionen des deutschen Verkehrssektors senken wird: Wenn die Fahrzeuge in der Nutzungsphase primär mit einem Grünstrommix geladen werden und wenn es durch Carsharing zu einer Reduktion der Autoflotte kommt. Allerdings kann eine Zunahme von Elektrofahrzeugen auch zu einem Anstieg der Stromnachfrage und zu einem höheren Bedarf an seltenen Erden und weiteren digitalisierungsrelevanten Rohstoffen führen.

---

<sup>34</sup> § 3 Absatz 2 KSG

Vor diesem Hintergrund untersucht die vorliegende Fallstudie die Ressourcenintensität und weitere Umwelteinflüsse von elektrischen Carsharing-Angeboten. Die Fallstudie geht von einer Nickel-Mangan-Cobalt-Lithium-Ionen-Batterie, einem Carsharing-Elektrofahrzeug und dem Zugriff mittels Smartphone-App aus (vgl. Abbildung 40). Mithilfe des Smartphones können Carsharing-Fahrzeuge freigeschaltet, Autos geortet, deren Verfügbarkeit und Ladestand abgefragt und die Fahrten bezahlt werden. Ressourcenintensität und weitere Umwelteinflüsse sind pro gefahrenem Kilometer angegeben. Damit der Einfluss des Strommixes deutlich wird, gibt es für die Nutzungsphase zwei Szenarien: Szenario 1 geht für das Laden des Elektroautos von einem Grünstrommix, Szenario 2 hingegen von einem konventionellen Strommix aus.

**Abbildung 40: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

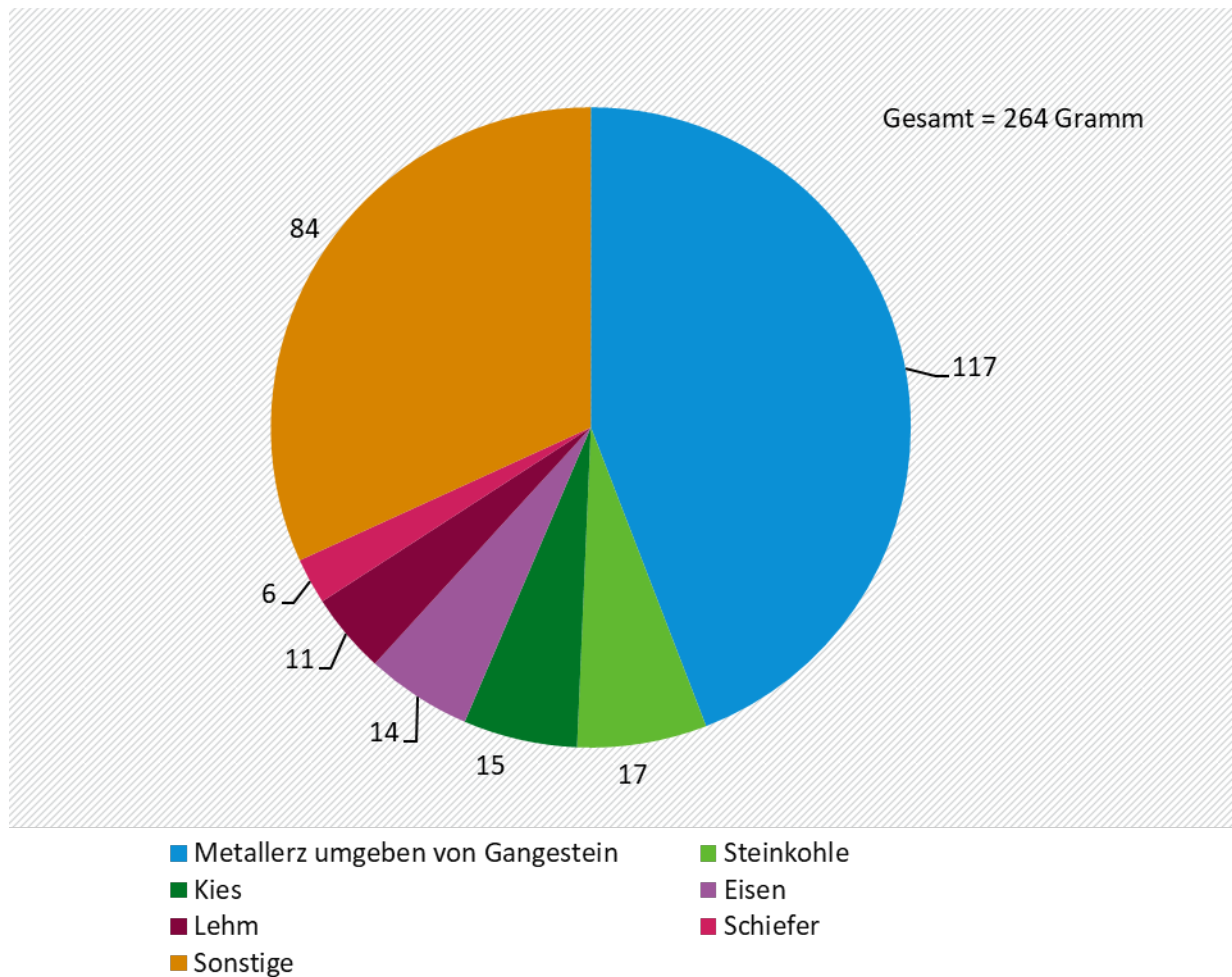
### Ressourcenintensität der Herstellungsphase

Die Fallstudie beleuchtet die im Forschungsvorhaben behandelten Ressourcenindikatoren für die Herstellung und Nutzung des Elektrofahrzeugs und des Smartphones sowie für die Bereitstellung der Internetverbindung. Entsorgungs- und Recyclingprozesse sind in dieser Fallstudie nicht berücksichtigt (vgl. Abbildung 40).

Für die anteilige Herstellung des Elektrofahrzeugs und des Smartphones wird ein Primärrohstoffeinsatz (RMI) von **263,8 g** pro Kilometer Fahrt angesetzt (vgl. Abbildung 44). Bezieht man auch die ungenutzte Materialentnahme ein, ergibt sich ein Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) von **330 g** pro Kilometer Fahrt (vgl. Abbildung 44).

Den größten Anteil mit 79 % (206 g/km, vgl. Abbildung 41) am RMI haben, wie auch bereits in den vorherigen Fallstudien, die mineralischen und fossilen Rohstoffe. Abbildung 41 zeigt die Anteile der Rohstoffarten am RMI in Gramm für die Herstellungsphase. Mineralische und fossile Rohstoffe werden in den meisten Fällen in der Produktionsvorkette und für die Energienutzung eingesetzt. Detaillierte Informationen zu den Rohstoffgruppen können in Abraham *et al.*, 2023b nachgelesen werden.

**Abbildung 41: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ in Gramm\***



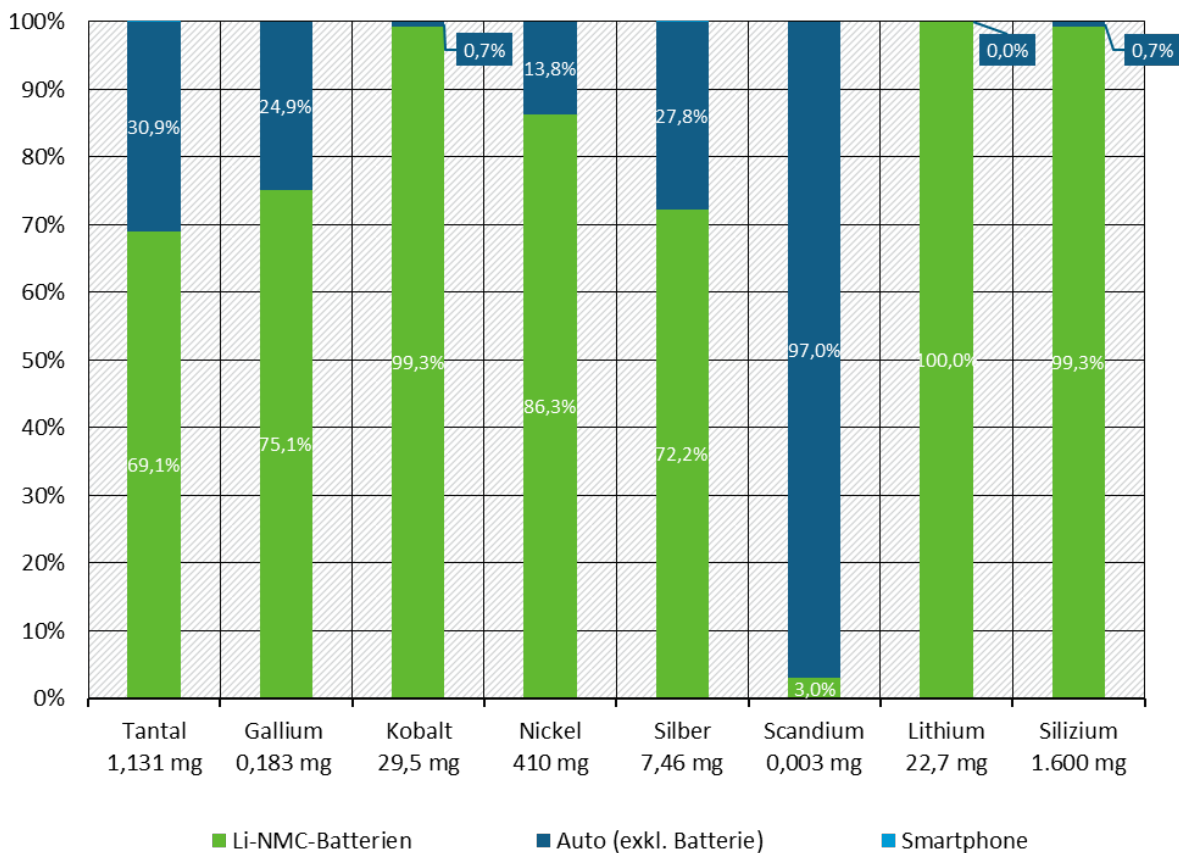
\* Die Abbildung zeigt gerundete Zahlen

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe

Erwartungsgemäß verursacht bei acht von neun näher betrachteten besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffen (**Gesamtmenge = 2.071,977 mg**) die Batterie des Elektroautos den größten Teil des Bedarfs (Abbildung 42). Lediglich der Bedarf an Scandium ist auf den elektrischen Motor zurückzuführen. Das Smartphone hat im Vergleich zum Elektroauto und zur Batterie bei allen Indikatoren einen maximalen Anteil von 0,01 % und ist deshalb in der Abbildung nicht sichtbar. Silizium, Kupfer, Nickel, Kobalt und Lithium sind die mengenmäßig wichtigsten digitalisierungsrelevanten Rohstoffe. Gegenüber den in kleineren Mengen benötigten Rohstoffen (Silber, Tantal, Gallium und Scandium) ist aber auch ihre Verfügbarkeit höher.

**Abbildung 42: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ in Prozent und Milligramm**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

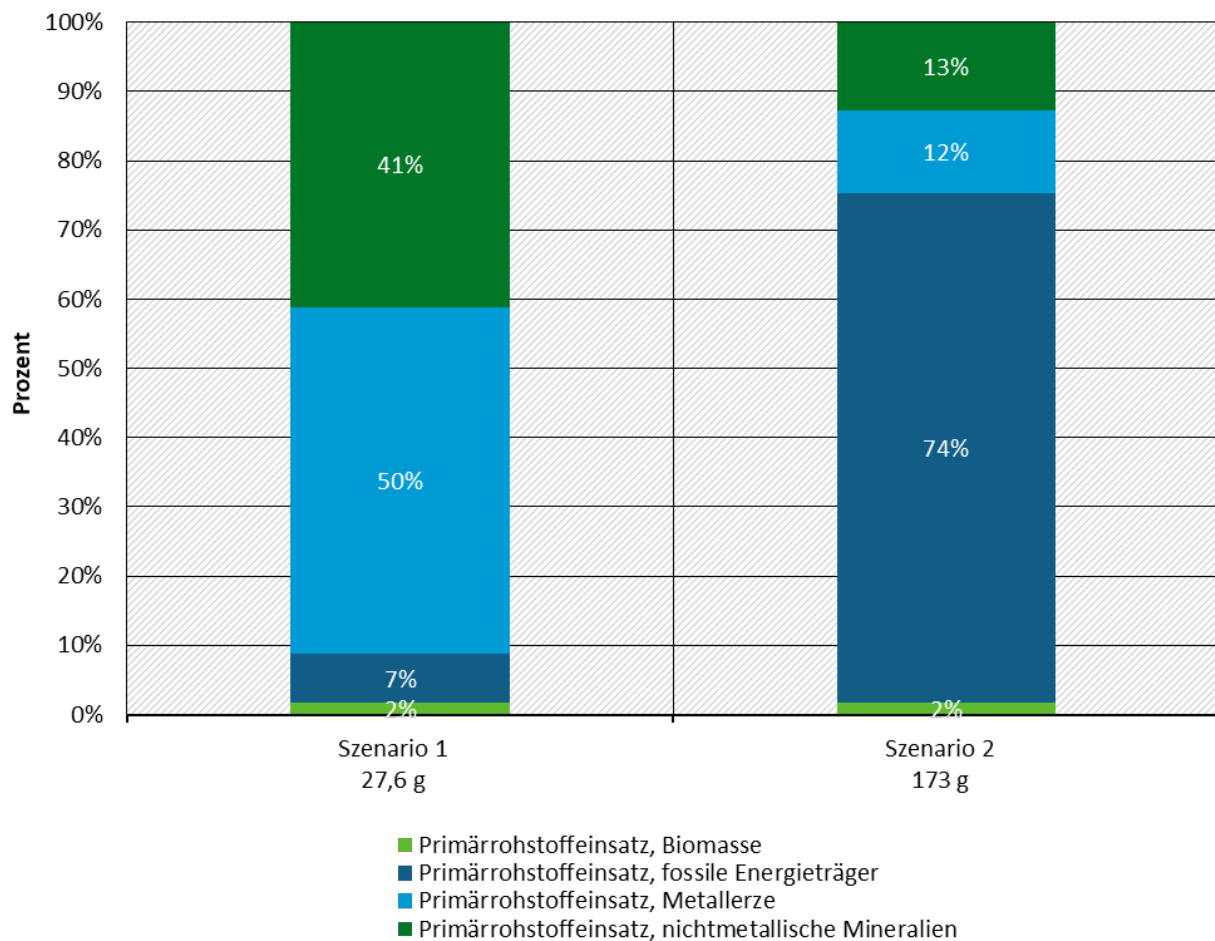
### Ressourcenintensität der Nutzungsphase

Für die Nutzungsphase werden zwei Szenarien verglichen: Szenario 1 mit einem Grünstrommix, Szenario 2 mit einem konventionellen Strommix für das Laden des Elektroautos.

Das Carsharing-System unter Szenario 1 verursacht in der Nutzungsphase einen Primärrohstoffbedarf von **27,6 g/km**. Der modellierte Gesamtprimärmaterialaufwand beläuft sich auf **30,4 g/km**. In Szenario 2 hingegen ergeben sich durch Carsharing ein signifikant höherer Primärrohstoffbedarf und Gesamtprimärmaterialaufwand: **172,6 g/km (RMI)** und **228,0 g/km (TMR)**. Der Primärrohstoffbedarf der Nutzung ist mit mehr als 98 % vor allem durch den Strombedarf des Elektroautos bedingt. Die Strombedarfe des Smartphones, der Datenübertragung und der Rechenzentren spielen eine untergeordnete Rolle.

Der zugrunde liegende Strommix entscheidet darüber, welche Rohstoffarten zum Einsatz kommen (Abbildung 43). So bedingt der hohe Anteil fossiler Energieträger am konventionellen deutschen Strommix deren Dominanz am Primärrohstoffbedarf der Nutzungsphase in Szenario 2 auffällig ist, dass der Primärrohstoffeinsatz in Szenario 1 einen deutlich höheren Anteil an Metallerzen umfasst als in Szenario 2. Diese Dominanz der Metallerze kommt in erster Linie durch das Verteilernetz (66,4 %) zustande, dass vergleichsweise viel Kupfer (63,7 %) enthält. Der hohe Anteil an nichtmetallischen Mineralien in Szenario 1 ist vor allem auf die Konstruktion von Wasserkraftanlagen (81,4 %) zurückzuführen.

**Abbildung 43: Anteile der Rohstoffarten am Primärrohstoffeinsatz in der Nutzungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ mit Grünstrom (Szenario 1) und mit konventionellem Strom (Szenario 2)**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

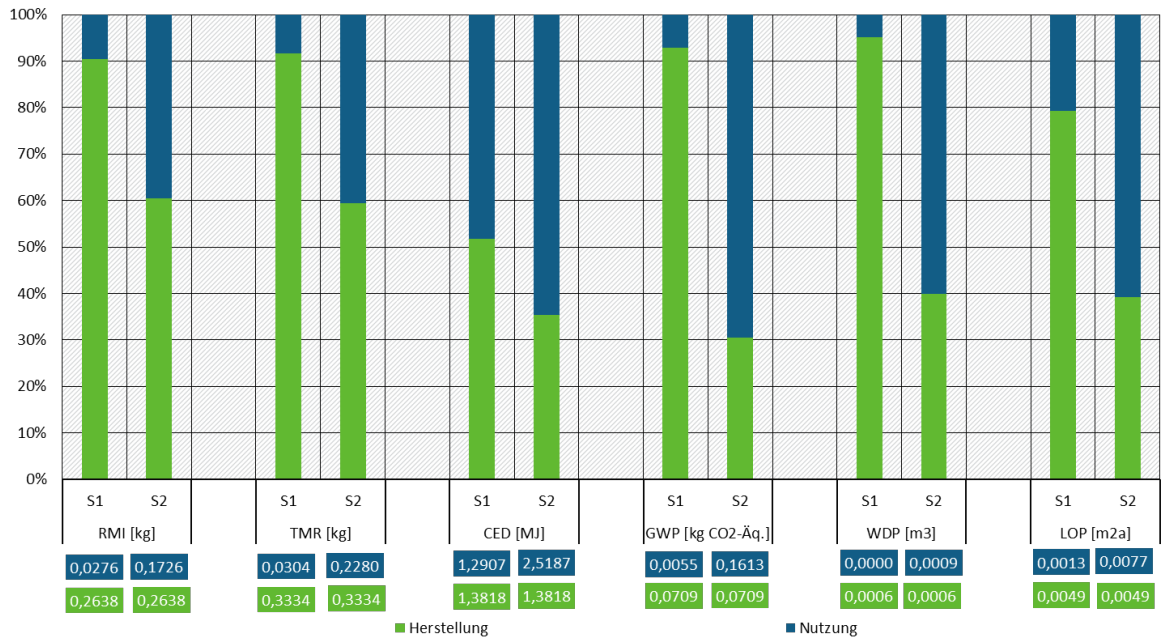
### Vergleich von Herstellungs- und Nutzungsphase

In Szenario 2 liegen die Werte für alle Ressourcen- und LCA-Indikatoren deutlich über jenen im Szenario 1 (Abbildung 44, Tabelle 12). Die geringsten Unterschiede zeigen sich beim kumulierten Energieaufwand (CED) (Szenario 2 ca. 1,4-mal höher als Szenario 1), die größten beim CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (Szenario 2 ca. dreimal höher als Szenario 1).

In Szenario 1 ist bei allen Indikatoren die Herstellungsphase dominant. Nur beim kumulierten Energieaufwand (CED) ist das Bild fast ausgeglichen. Verwendet man in der Nutzungsphase einen konventionellen Strommix (Szenario 2) für das Elektroauto, dann fällt die Nutzungsphase bei allen Indikatoren stärker ins Gewicht.



**Abbildung 44: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase in den Szenarien Grünstrom (Szenario 1 – S1) und konventioneller Strom (Szenario 2 – S2)\***



\*Anmerkung/Erläuterung: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.  
 Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

**Tabelle 12: Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase in den Szenarien Grünstrom (Szenario 1 – S1) und konventioneller Strom (Szenario 2 – S2) – Tabelle zu Abbildung 44**

Szenario	RMI (g)	TMR (g)	CED (MJ)	GWP (g CO <sub>2</sub> -Äq.)	WDP (m <sup>3</sup> )	LOP (m <sup>2</sup> a)
Szenario 1 (S1)	291,4	363,8	2,67	76,4	0,0006	0,0062
Szenario 2 (S2)	436,4	561,4	3,90	232,2	0,0015	0,0126
S2 / S1	1,50	1,54	1,46	3,04	2,39	2,03

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

**Zusammenfassung und Ausblick**

Die Fallstudie zeigt, dass die größten Umweltbelastungen im System Carsharing durch das Laden des Elektroautos entstehen. Die Nutzung und Datenspeicherung von Smartphone-Apps fallen kaum ins Gewicht. Somit ist das Umweltentlastungspotenzial von Carsharing mit E-Autos stark davon abhängig, mit welchem Strommix das Laden erfolgt. Die IKT-Nutzung führt in diesem Fall zu keiner nennenswerten Erhöhung der Ressourcenintensität. Aus der Literaturanalyse in Verbindung mit den Ergebnissen der Fallstudie lässt sich somit der Schluss

ziehen, dass schon allein die Nutzung von Grünstrom und Elektroautos eine Umweltentlastung zur Folge hat.

Vor allem die Herstellung von Elektroautos ist ressourcenintensiv. Über die gesamte Lebensdauer der Autos hinweg kommen die Ressourcen durch gemeinsames Nutzen effizienter zum Einsatz, als es bei privaten Pkw der Fall ist: Carsharing steigert die Nutzungsdauer im Vergleich zu privaten Fahrzeugen, die meist eine geringere Nutzungsdauer aufweisen. Würden 12 % der 3,3 Mio. angemeldeten Nutzer von Carsharing-Angeboten ihr Privatfahrzeug abschaffen (Kurzweil *et al.*, 2023), wären das 396.000 Fahrzeuge weniger. Würden 3,3 Mio. Personen 1 km mit einem Elektroauto fahren, ergäben sich Emissionen von 234.300 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Pro Kilometer für die Herstellungsphase. Besäßen von den 3,3 Mio. Menschen nicht alle, sondern nur 88 % ein eigenes Auto, ergäben sich 206.184 kg CO<sub>2</sub>-Äq. – eine Ersparnis von 28.116 kg CO<sub>2</sub>-Äq. Pro Kilometer. Allerdings ist bei dieser überschlägigen Rechnung kritisch anzumerken, dass die 88 % der Nutzenden, die ein privates Fahrzeug besitzen, das Carsharing zusätzlich nutzen. Daher ist fraglich, inwiefern Carsharing die deutsche Autoflotte verkleinern kann. Die Fallstudie zeigt, dass Carsharing mit Elektroautos und Grünstrommix ein hohes Umweltentlastungspotenzial hat. Allerdings sind attraktive Anreize für die Nutzenden nötig, wenn Carsharing die Autoflotte verkleinern soll.

#### 4.3.6 Fallstudie Kryptowährung

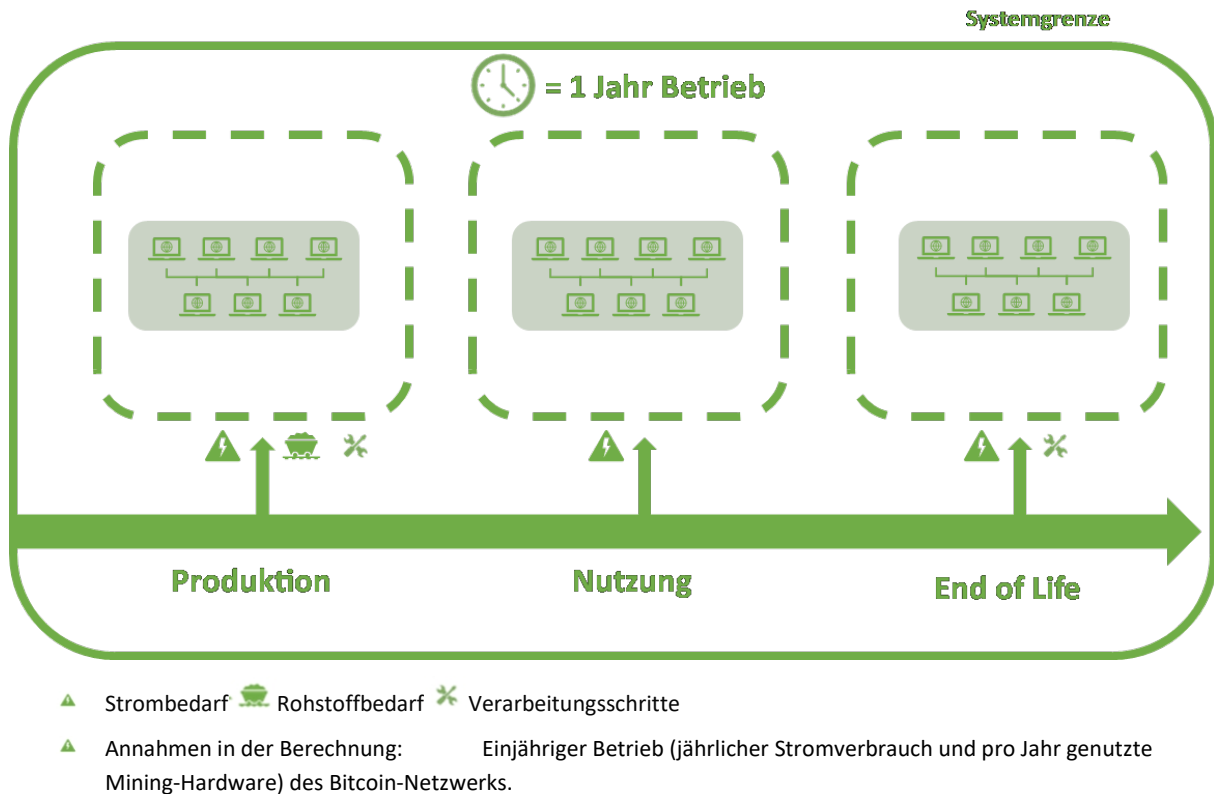
In den letzten Jahren erlangten Kryptowährungen zunehmend an gesellschaftlicher und politischer Relevanz. Erste Großunternehmen wie Microsoft und PayPal akzeptieren für ihre Zahlungen bereits Bitcoins, die bekannteste Kryptowährung (Scher, 2022). Transaktionen in Kryptowährungen basieren auf dezentralen Datenbanken, der Blockchain-Technologie, die durch sogenannte Miner bereitgestellt wird. Das sind Rechner, die neue Datenblöcke in einer Blockchain bilden und dafür in *Coins*, der entsprechenden Kryptowährung, entlohnt werden (Bundesnetzagentur, 2021). Durch ihre dezentrale Steuerung gelten Kryptowährungen als fälschungssicher und weltweite Zahlungen sind auch ohne Wechselgebühren möglich. Ein großer Nachteil der digitalen Vermögenswerte ist jedoch der hohe Strombedarf des sogenannten Minings: Bitcoin hat einen ähnlichen Strombedarf wie Argentinien oder die Niederlande (Criddle, 2021; Digiconomist, 2022). Bisher laufen erst weniger als 30 % des globalen Bitcoin-Netzwerks mit Strom aus erneuerbaren Energien (de Vries *et al.*, 2022). Daher entspricht momentan der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck einer Bitcoin-Transaktion dem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von über 1,5 Mio. Visa-Transaktionen (Digiconomist, 2022). Kryptowährungen haben aber nicht nur einen hohen Strombedarf und setzen viele Treibhausgase frei – mit ihren spezialisierten Mining-Rechnern verursachen sie auch viel Elektroschrott (Hern, 2021; de Vries & Stoll, 2021). Die beim Mining im Bitcoin-Netzwerk genutzten Chips sind nach weniger als 1,5 Jahren veraltet (de Vries, 2019; de Vries & Stoll, 2021). Dadurch müssen jährlich 41,11 Kilotonnen (kt) Mining-Hardware entsorgt werden (Digiconomist, 2022).

Das Bitcoin-Netzwerk ist für circa zwei Drittel des Energieverbrauchs aller Kryptowährungen verantwortlich. Für eine Darstellung der Umwelteffekte und des Ressourcengebrauchs von Kryptowährungen, die auf der *Proof-of-Work*-Methode<sup>35</sup> basieren, eignet es sich daher am besten (Gallersdörfer *et al.*, 2020). Das Forschungsvorhaben berechnet daher den jährlichen

<sup>35</sup> Zum Betrieb von Blockchains kommen aktuell hauptsächlich zwei Mechanismen zum Einsatz: *Proof of Work* (PoW) und *Proof of Stake* (PoS). In der PoW-Methode, die als der sicherste Konsensmechanismus gilt, treten alle beteiligten Miner gegeneinander an, komplexe mathematische Probleme zu lösen. Der Algorithmus ist dabei so konzipiert, dass die Komplexität der gestellten mathematischen Aufgaben angepasst wird. Daher sind mit steigender Größe des Netzwerks immer höhere Rechenleistungen notwendig, was mit einem stark zunehmenden Stromverbrauch einhergeht. Bei der PoS-Methode werden vergleichsweise geringe Rechenleistungen bei den Minern benötigt. Allerdings setzt diese Methode Vertrauen in von einem Algorithmus ausgewählte Akteure\* Akteurinnen innerhalb des Netzwerks voraus, sodass sie weniger Sicherheit als die PoW-Methode bietet (Bundesnetzagentur, 2021).

Stromverbrauch und die pro Jahr hergestellte und entsorgte Mining-Hardware des Bitcoin-Netzwerks (siehe Tabelle 13). Wegen der großen Mengen Elektroschrott geht die Fallstudie Kryptowährung von einer besonderen Relevanz der *end-of-life* Phase aus. Diese wird daher, im Gegensatz zu den anderen Fallstudien, explizit in den Untersuchungsrahmen einbezogen (Abbildung 45).

**Abbildung 45: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Es werden drei Szenarien betrachtet, die auf unterschiedlichen Annahmen für den jährlichen Strombedarf des Bitcoin-Netzwerks basieren (siehe Tabelle 13). Das „Standardszenario“ verwendet dafür den am niedrigsten geschätzten Wert des jährlichen Stromverbrauchs. Das „Szenario mit hohem Stromverbrauch“ modelliert mit dem am höchsten geschätzten Wert. Dem „Szenario Länder-Strommix“ liegen die Strommixe der einzelnen Länder, in denen das Mining hauptsächlich stattfindet (u. a. USA und Kasachstan), zugrunde. Es spiegelt demnach die länderspezifische Energienutzung wider.

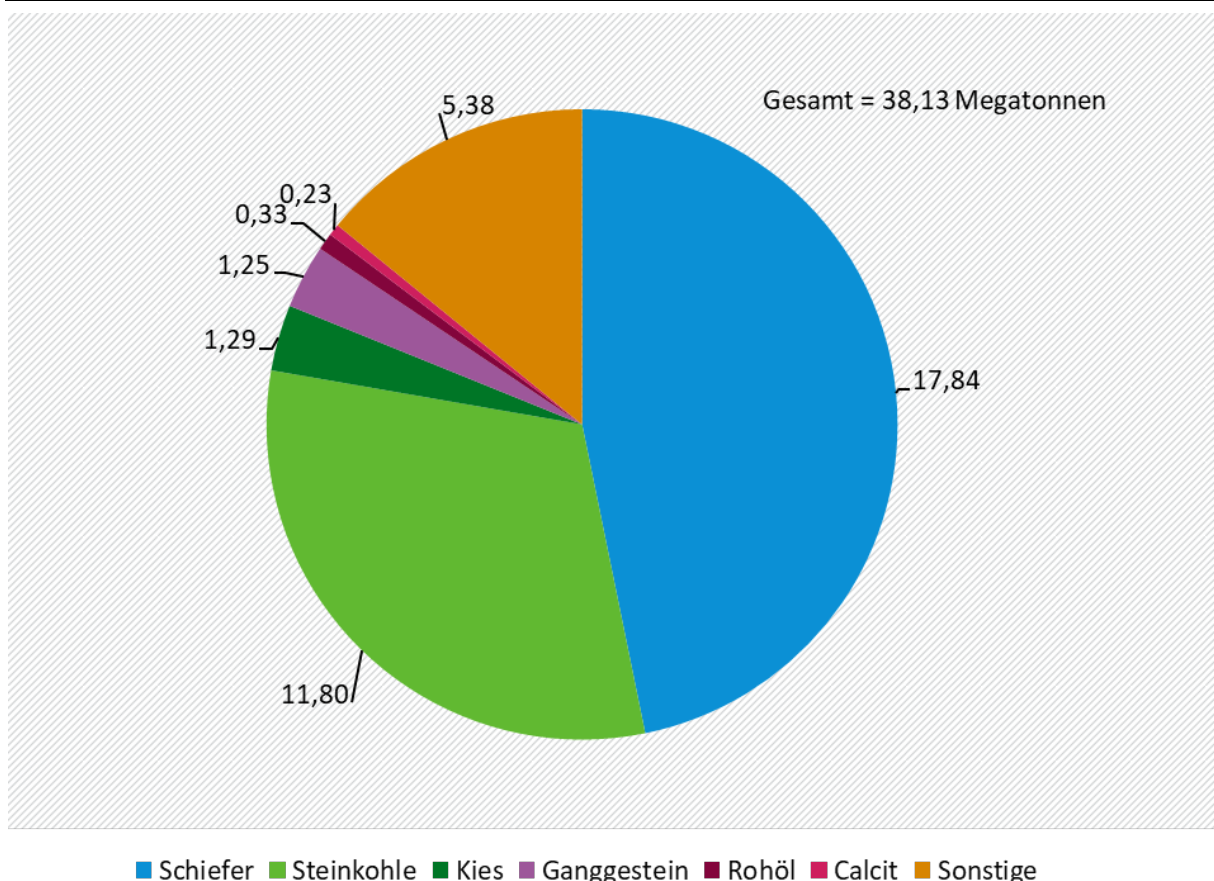
**Tabelle 13: Szenarien der Modellierung für die Fallstudie „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“**

Szenario	Annahme jährlicher Stromverbrauch des Bitcoin-Netzwerks (tWh)	Menge jährlich hergestellter und entsorgter Mining-Hardware (kt)
Standard	73,67*	41,11*
Hoher Stromverbrauch	96,46**	41,11
Länder-Strommix	73,67	41,11

Quellen: \*Digiconomist (2022); \*\*CCRI (2022)

Schiefer und Steinkohle (siehe folg. Abbildung 46) sind mit zusammen 89 % des Gesamtaufwandes die wichtigsten Input-Materialien. Der hohe Anteil ergibt sich aus der Energienutzung. Kies, Ganggestein, Rohöl und Calcit machen insgesamt weitere 9 % des Rohstoffeinsatzes aus. Alle anderen Rohstoffe kommen mit 2 % in vergleichsweise geringen Mengen zum Einsatz. Der errechnete Primärrohstoffeinsatz (RMI) für das *Standardszenario* nach einem einjährigen Betrieb des Bitcoin-Netzwerks liegt bei **38,1 Mt** pro Jahr für Herstellungs- und Nutzungsphase (vgl. Abbildung 48.) Der RMI des Szenarios *Länder-Strommix* ist rund 20 % niedriger, der RMI des Szenarios mit hohem Strombedarf rund 30 % höher als derjenige des Standardszenarios. In allen Szenarien ist der größte Teil des RMI auf den Stromverbrauch durch das Bitcoin-Mining und auf die fossilen Energiequellen zurückzuführen. Der RMI von fossilen und mineralischen Rohstoffen liegt bei 33,32 Mt (vgl. Abbildung 46). Bezieht man die ungenutzte Materialentnahme in die Berechnung ein, ergibt sich unter dem *Standardszenario* für den Betrieb des Bitcoin-Netzwerks ein Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) von **44,8 Mt** pro Jahr. Detaillierte Informationen zu den Rohstoffgruppen können in Abraham *et al.*, 2023b nachgelesen werden.

**Abbildung 46: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Megatonnen**

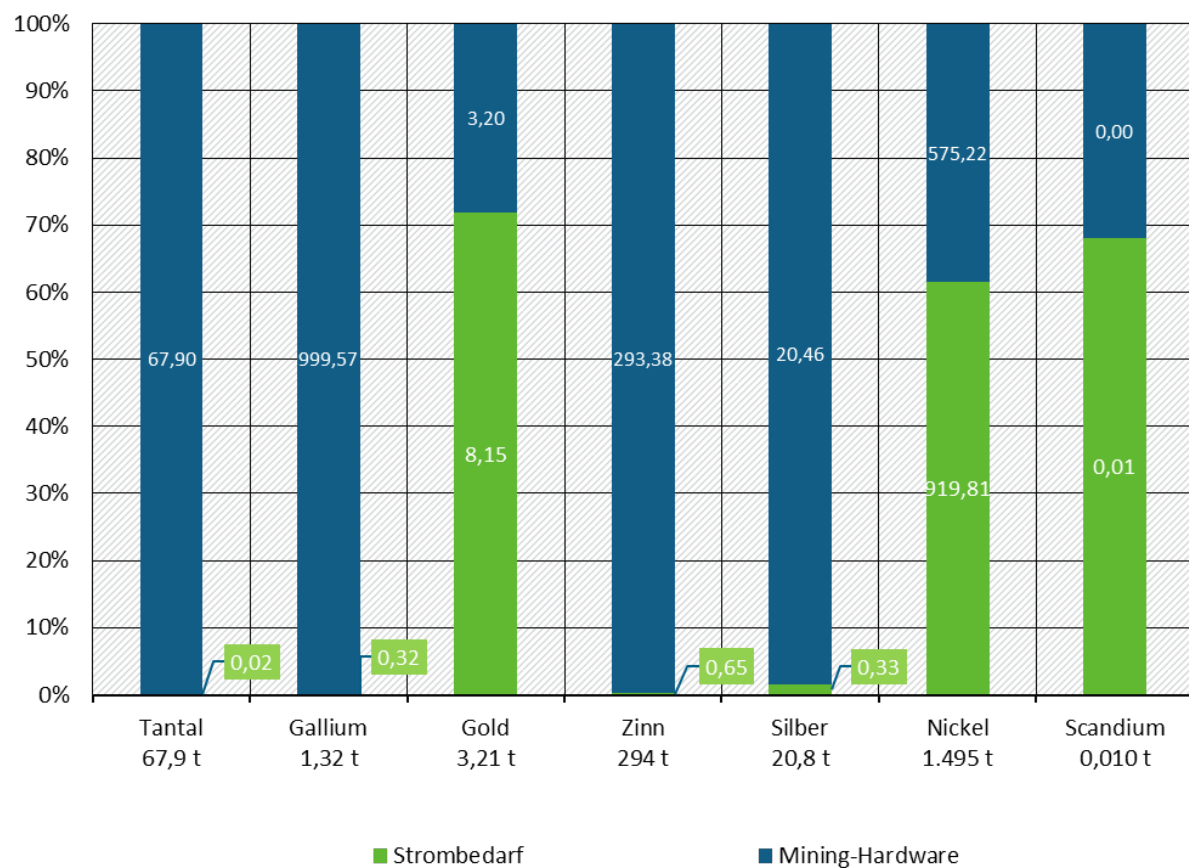


Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe

Unter den besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffen (**Gesamtmenge = 1.882,24 t**) ist vor allem Tantal herauszustellen (Abbildung 47). Die Herstellung der Mining-Hardware verbraucht 3,7 % der jährlichen globalen Gesamtentnahme von Tantal (die Stromerzeugung hat einen Anteil von < 0,1 % am errechneten Tantal-Bedarf). Den höchsten Bedarf an digitalisierungsrelevanten Rohstoffen unter den verschiedenen Szenarien hat mit 10,6 kt pro Jahr das „Szenario Länder-Strommix“. Dies mag überraschen, da der angenommene Strombedarf über 20 % niedriger ist als im Szenario mit hohem Stromverbrauch. Doch das Ergebnis kommt hauptsächlich durch den nationalen Strommix der USA und Kasachstans zustande: Beide Länder haben den stärksten Anteil am globalen Bitcoin-Mining und einen erhöhten Bedarf an Gallium, Silicon, Kobalt und Magnesium. Dieses Beispiel verdeutlicht die starken Schwankungen im Ressourcenbedarf, die durch verschiedene Strommixe in den Modellen entstehen können.

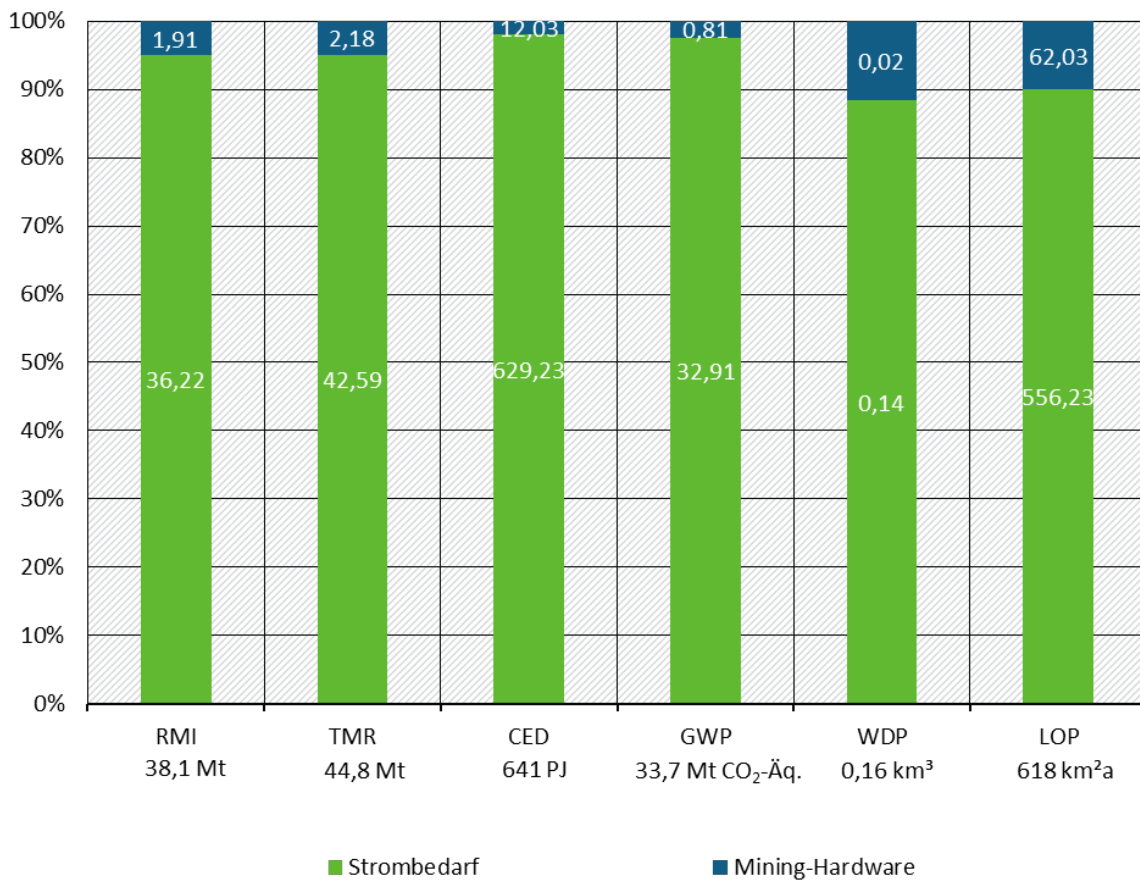
**Abbildung 47: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Prozent und Tonnen**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Den größten Anteil an allen Ressourcen- und LCA-Indikatoren hat der Strombedarf (Abbildung 48). Allerdings sollten die absoluten Ressourcenmengen, die für Mining-Hardware nötig sind, nicht außer Acht gelassen werden, da innerhalb kurzer Zeiträume erhebliche Mengen Elektroschrott anfallen.

**Abbildung 48: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ absolut und in Prozent nach Anteil des Strombedarfs und Mining-Hardware (Standardszenario)\***



\*Anmerkung/Erläuterung: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Der Ressourcenindikator CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (GWP) weist mit **45,7 Mt CO<sub>2</sub>-Äq.** den höchsten Wert im Szenario *Länder-Strommix* auf. Dies ist bemerkenswert, da der höchste Wert ursprünglich im Szenario *hoher Stromverbrauch* erwartet wurde, das einen deutlich höheren Energiebedarf als die beiden anderen Szenarien annimmt. Der hohe GWP-Wert im Szenario *Länder-Strommix* erklärt sich durch die geringeren Anteile CO<sub>2</sub>-armer Stromerzeugung wie beispielsweise mit Nuklearenergie. Der kumulierte Energieaufwand (CED) erreicht mit **836 PJ (Petajoule)** im Szenario *hoher Stromverbrauch* den höchsten Wert.

Im Szenario *Länder-Strommix* ergibt sich ein Wasserfußabdruck (WDP) von **0,23 km<sup>3</sup>** und eine Landnutzung (LOP) von **1.602 m<sup>2</sup>** pro Jahr. Damit weist dieses Szenario die höchsten Werte auf. Dies ist hauptsächlich zurückzuführen auf landwirtschaftlich genutzte Flächen, die in Form von Bioenergie einfließen und im Szenario *Länder-Strommix* deutlich größer sind. Der amerikanische Strommix mit hohem Anteil am globalen Mining beruht hauptsächlich auf der Verbrennung von Hackschnitzeln in Blockheizkraftwerken, was eine hohe Landnutzung zur

Folge hat. Bei allen untersuchten LCA-Indikatoren ist der Strombedarf des Bitcoin-Netzwerks der entscheidende Faktor für den Ressourcengebrauch.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die Fallstudie betrachtet den Strombedarf sowie die Herstellung und Entsorgung von Mining-Hardware des Bitcoin-Netzwerks über eine Betriebsdauer von einem Jahr. Unter drei Strommix-Szenarien werden verschiedene LCA-Indikatoren berechnet und miteinander verglichen. Bei allen Indikatoren hat der Strombedarf den Hauptanteil am Ressourcenbedarf und an den potenziellen Umweltwirkungen. Dies ist auf einen Primärrohstoffeinsatz aus hauptsächlich fossilen Energieträgern (77 %) zurückzuführen. Der Anteil an erneuerbaren Energien beläuft sich bisher erst auf rund 30 %. Aufgrund der kurzen Lebensdauer der Mining-Hardware können sich digitalisierungsrelevante Rohstoffe wie beispielsweise Tantal oder Gallium in Zukunft weiter verknappen. Das Umweltentlastungspotenzial von Bitcoin ist als gering einzuschätzen, weil die Kryptowährung einen hohen Strombedarf hat und pro Jahr 41,11 kt Elektroschrott verursacht (Digiconomist, 2022). Kryptowährungen dienen hauptsächlich als digitale Wertspeicher und Spekulationsobjekte. Die Berechnungen zeigen, dass Bitcoin als wichtigste Kryptowährung einen enormen Ressourcenbedarf und starke Umweltwirkungen haben kann. Die Modellierungen in dieser Fallstudie sind allerdings mit Unsicherheiten behaftet, da die Art der Stromerzeugung nicht genau bekannt war. Die Ergebnisse lassen jedoch beim aktuellem (oder zukünftig sogar zunehmendem) Volumen an Kryptowährungen und einer weiteren Nutzung der PoW-Methode zwei Effekte vermuten: Der Druck auf digitalisierungsrelevante Rohstoffe dürfte steigen und eine Reduktion des CO<sub>2</sub>-Ausstoßes wird wohl schwieriger werden. Die Entwicklung der Kryptowährungen und insbesondere von deren Umweltwirkungen sollten in den kommenden Jahren dringend im Blick behalten werden.

#### 4.3.7 Fallstudie *Consumer-to-Consumer-Plattform*

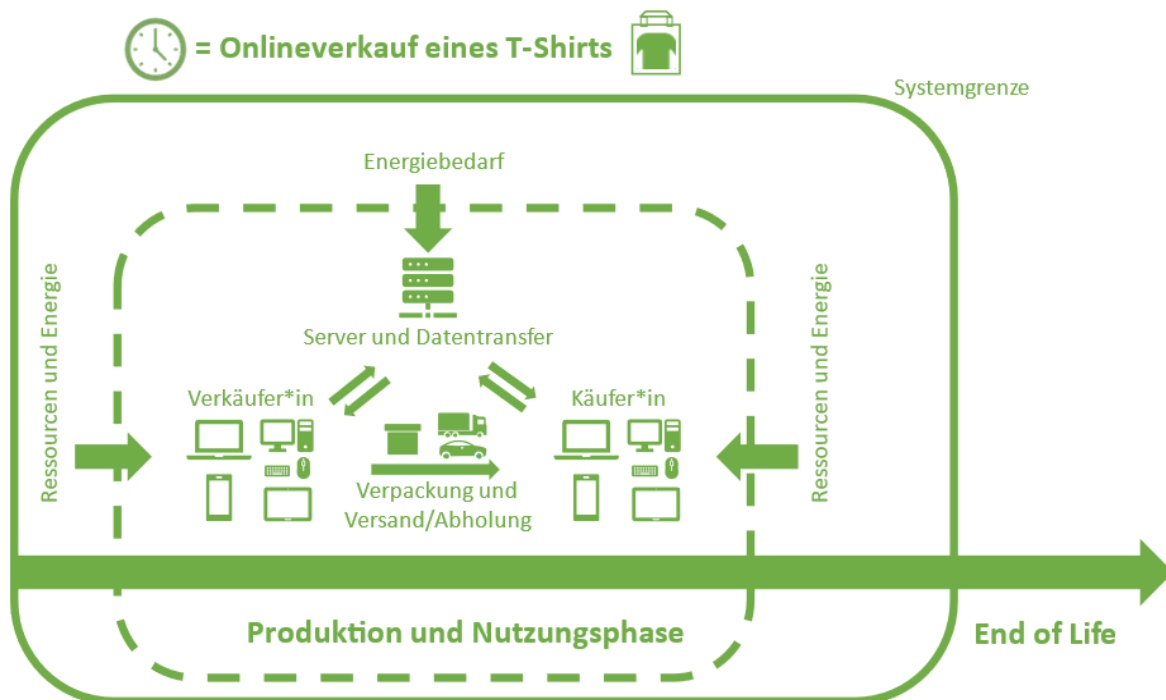
Unter *Consumer-to-Consumer-Plattformen* (C2C-Plattformen; auch *Peer-to-Peer-Plattformen*) versteht man Onlineportale für den Austausch zwischen Privatpersonen. Meist ermöglichen sie den Handel bzw. Austausch von Waren oder anderen Angeboten (Statista, 2022). Die Plattformen dienen dem Verkauf von Neu- und Gebrauchtwaren (Beispiele sind *eBay Kleinanzeigen* oder *Vinted*) sowie Dienstleistungen (Beispiele sind *Airbnb* oder *Uber*). Dabei spielt der Handel mit Gebrauchtwaren die größte Rolle. Die am häufigsten gehandelten Produkte sind Kleidungsstücke. Der Gebrauchtwarenhandel ermöglicht nachhaltigen Konsum im Sinne einer Kreislaufwirtschaft und führt meist zu ökonomischen Vorteilen für Käufer\*innen und Verkäufer\*innen. Bereits jede\*r achte Deutsche tätigt Verkäufe über derartige Onlineportale (Statista, 2022), während jede\*r vierte Deutsche mindestens einmal monatlich gebrauchte Produkte kauft (L'Observatoire Cetelem, 2022). Die hohe Beliebtheit von C2C-Plattformen zeigt sich auch an der Tatsache, dass *eBay Kleinanzeigen* in Deutschland das reichweitenstärkste Onlineangebot ist (Statista, 2022). Als Folge von steigendem Umweltbewusstsein und vom Wandel hin zu einer Kreislaufwirtschaft erwartet man auch für die Zukunft eine vermehrte Nutzung von C2C-Angeboten. Für den globalen Second-Hand-Kleidungsmarkt wird bis 2025 ein jährliches Wachstum von 15 bis 20 % geschätzt (L'Observatoire Cetelem, 2022).

Bisherige Studien befassen sich mit dem Umweltentlastungspotenzial, das durch den Handel mit gebrauchten Waren auf den Plattformen gehoben werden kann. Die gehandelten Produkte werden wiederverwendet, wodurch sich ihr Lebenszyklus verlängert, Abfall und Emissionen vermieden werden und weniger Ressourcen für Neuwaren zum Einsatz kommen (Gossen *et al.*, 2019; Zhu & Liu, 2021). Es besteht aber die Gefahr von Rebound-Effekten durch gesteigerten Konsum (Ludmann, 2018). Darüber hinaus geht auch die Nutzung einer C2C-Plattform mit Ressourcenbedarfen einher. Genau darauf konzentriert sich die vorliegende Fallstudie.

Die Fallstudie betrachtet die digitale C2C-Plattform und ermittelt die Ressourcenintensität von Transaktionen über das Onlineportal und der darauffolgenden Übergabe der Waren. Dies umfasst somit die IKT-Endgeräte der Kaufenden und Verkaufenden, deren Energiebedarf während des Zugriffs auf die Plattform, die notwendige Datenübertragung und den Energiebedarf der Rechenzentren. Nicht betrachtet werden die Herstellungsphase der Rechenzentren und die Herstellung des T-Shirts, das in der Fallstudie über die Plattform gehandelt wird.

Die gewählte Untersuchungseinheit in der vorliegenden Fallstudie ist „Verkauf eines T-Shirts über eine C2C-Plattform inkl. Versand bzw. Abholung“ (Abbildung 49). Angenommen wird, dass für den Handel auf der C2C-Plattform vier Endgeräte zu gleichen Teilen zum Einsatz kommen: ein Smartphone, ein Tablet, ein Laptop sowie ein Desktop-Computer. Zusätzlich wird für alle Geräte ein Router genutzt. Darüber hinaus umfasst die Berechnung den Strombedarf für das Rechenzentrum und das Übertragungsnetz. Aufgrund der großen Unsicherheiten bei den entsprechenden Eingangsdaten gibt es zwei Szenarien: Szenario  $RZ_{2011}$  bezieht sich auf Daten zum Strombedarf des Rechenzentrums von 2011, Szenario  $RZ_{effizient}$  nimmt einen um Faktor 10 geringeren Strombedarf an, um der Effizienzsteigerung seit 2011 Rechnung zu tragen (Tabelle 14). Verpackung und Transport des gehandelten T-Shirts über eine Distanz von 250 km sind ebenfalls Teil der Betrachtung. Da es auch üblich ist, über die Plattform gekaufte Gegenstände persönlich abzuholen, wird das T-Shirt in einem weiteren Szenario in 5 km Entfernung zum Wohnort des/der Kaufenden mit einem Pkw abgeholt (Szenario Abholung: Tabelle 14).

**Abbildung 49: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“**



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023



**Tabelle 14: Übersicht zu den Annahmen in den betrachteten Szenarien für die Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Wattstunden**

Szenario	Energiebedarf Rechenzentrum und Übertragungsnetz	Transport	Verpackung
Szenario RZ <sub>effizient</sub>	65,4 Wh pro Anzeige (Rechenzentrum) 43,6 Wh pro Anzeige (Übertragungsnetz)	Versanddienstleister, 250 km mit Lieferwagen (Verbrenner)	Versandkarton (100 g)
Szenario RZ <sub>2011</sub>	654 Wh pro Anzeige (Rechenzentrum) 436 Wh pro Anzeige (Übertragungsnetz)	Versanddienstleister, 250 km mit Lieferwagen (Verbrenner)	Versandkarton (100 g)
Szenario Abholung	65,4 Wh pro Anzeige (Rechenzentrum) 43,6 Wh pro Anzeige (Übertragungsnetz)	Privat, 10 km mit Pkw (Verbrenner)	keine

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8 und Erdmann (2011).

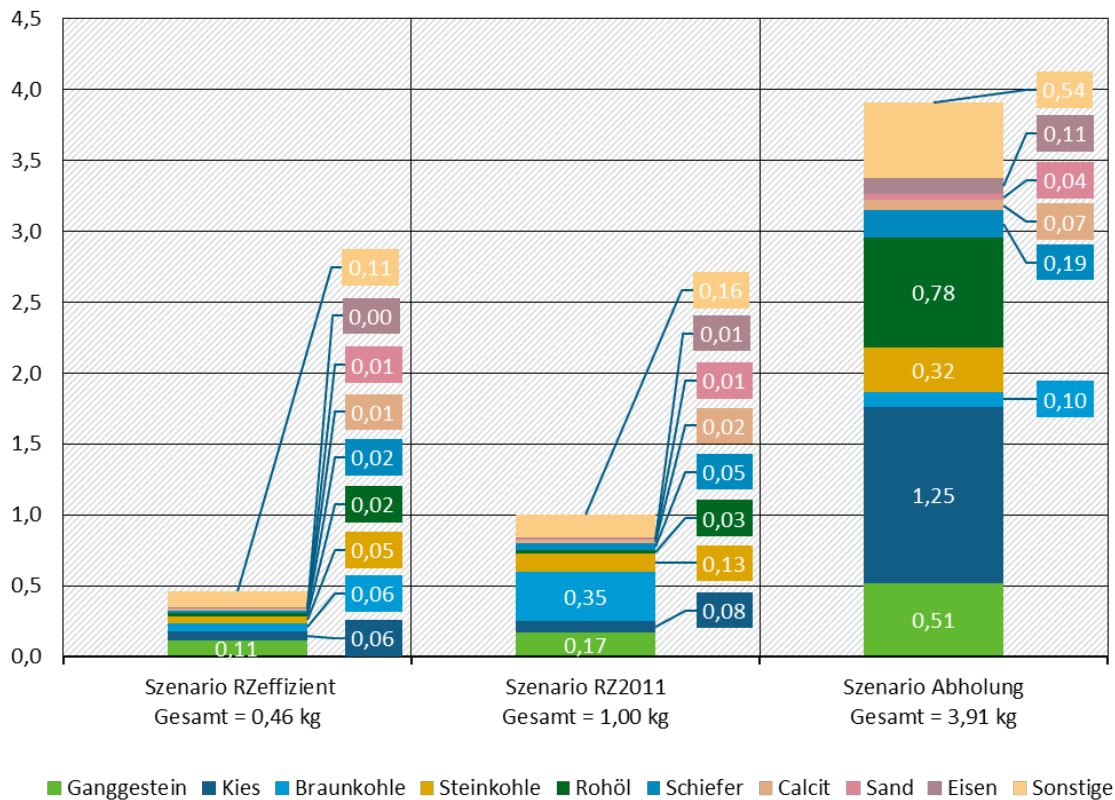
### Ressourcenintensität der Szenarien

Die Fallstudie betrachtet die im Forschungsvorhaben behandelten Ressourcenindikatoren für die drei Szenarien. Enthalten sind die anteilige Herstellung und Nutzung der Endgeräte, der Energiebedarf der Rechenzentren und Übertragungsnetze sowie die Verpackung und der Transport des gehandelten Produkts (Abbildung 49).

Das „Szenario Abholung“, in welchem der/die Kaufende das T-Shirt mit dem privaten Pkw abholt, hat einen deutlich höheren Ressourcenbedarf als die anderen beiden Szenarien (Abbildung 50). Dies ist vor allem deshalb bemerkenswert, weil dieses Szenario im Vergleich zum „Szenario RZ<sub>2011</sub>“, von der effizienteren Übertragungsnetzwerks- und Rechenzentrumsleistung ausgeht (vgl. Tabelle 14). Die Art des Transports hat also einen hohen Einfluss auf den gesamten Rohstoffbedarf.

Die fossilen und mineralischen Rohstoffe Ganggestein, Kies, Braunkohle, Steinkohle, Rohöl, Schiefer und Calcit sind in allen Szenarien der Masse nach am stärksten vertreten. Abbildung 50 zeigt die Verteilung des RMIs nach Rohstoffarten in der Herstellungsphase. Fossile und mineralische Rohstoffe machen 78 % (0,36 kg) im Szenario RZ<sub>effizient</sub>, 86 % (0,86 kg) im Szenario RZ<sub>2011</sub> und 91 % (3,56 kg) im Szenario Abholung von den gesamten RMIs von **0,46 kg** (Szenario RZ<sub>effizient</sub>), **1kg** (Szenario RZ<sub>2011</sub>) und **3,91 kg** (Szenario Abholung) aus. Im Szenario RZ<sub>2011</sub> fällt der anteilig höhere Bedarf an Braunkohle und zu einem geringeren Grad auch an Steinkohle auf (vgl. Abbildung 50). Er lässt sich mit dem erhöhten Energiebedarf der Datenübertragung und -verarbeitung in den Rechenzentren erklären. Im Szenario Abholung wiederum ist der Bedarf an Rohöl, Kies und Eisen im Vergleich zu den anderen Szenarien erhöht. Dies ist auf den Treibstoffbedarf des Fahrzeugs für die Abholung sowie den hohen Flächenbedarf durch die Fahrzeugnutzung und auf den Fahrzeugbau zurückzuführen.

**Abbildung 50: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Kilogramm**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Der entsprechende Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) beträgt **0,58 kg bis 4,64 kg** (siehe Tabelle 16). Detaillierte Informationen zu den Rohstoffgruppen können in Abraham *et al.*, 2023b nachgelesen werden.

### Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe

Die besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffe spielen allokiert auf die Untersuchungseinheit mengenmäßig mit **0,65 g** (Szenario RZ<sub>effizient</sub>) bis **5,74 g** (Szenario Abholung) kaum eine Rolle. Sie sind aber rohstoffstrategisch und politisch von großer Bedeutung –unter anderem, weil sie geologisch selten sind oder von Ländern wie Deutschland aus geopolitischen Gründen nur eingeschränkt bezogen (importiert) werden können. Der insgesamt höhere Bedarf im Szenario Abholung ist darauf zurückzuführen, dass der Fahrt zur Abholung des T-Shirts neben dem Kraftstoffverbrauch auch ein Teil der Pkw-Herstellung zugerechnet wird.

Beim Blick auf ausgewählte digitalisierungsrelevante Rohstoffe (Tabelle 15) fällt auf, dass sich für drei Rohstoffe – Scandium, Platin und Rhodium – in den Szenarien RZ<sub>effizient</sub> und RZ<sub>2011</sub> lediglich ein minimaler Bedarf ergibt (im Bereich von Pikogramm), wohingegen im Abholungsszenario deutlich höhere Bedarfe entstehen. Die übrigen in Tabelle 15 dargestellten Rohstoffe sind in allen Szenarien relevant, da sie in den IKT-Endgeräten bei Kaufenden und Verkaufenden enthalten sind. Dieser Bedarf steht also nicht im Zusammenhang mit dem Transport des T-Shirts.

**Tabelle 15: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Gramm**

Rohstoff	Aufgewendete Rohstoffe pro Szenario (g)		
	Szenario RZ <sub>effizient</sub>	Szenario RZ <sub>2011</sub>	Szenario Abholung
Gallium	0,00011	0,00018	0,00202
Tantal	0,00213	0,00220	0,00915
Gold	0,00034	0,00035	0,00064
Silber	0,00206	0,00227	0,00673
Zinn	0,01736	0,01775	0,03210
Scandium	< 0,00001	< 0,00001	0,00001
Platin	< 0,00001	< 0,00001	0,00011
Rhodium	< 0,00001	< 0,00001	0,00002
Lithium	0,00037	0,00037	0,00037
Kupfer	0,31000	0,55000	1,54000

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Vergleich der Ressourcen- und LCA-Indikatoren

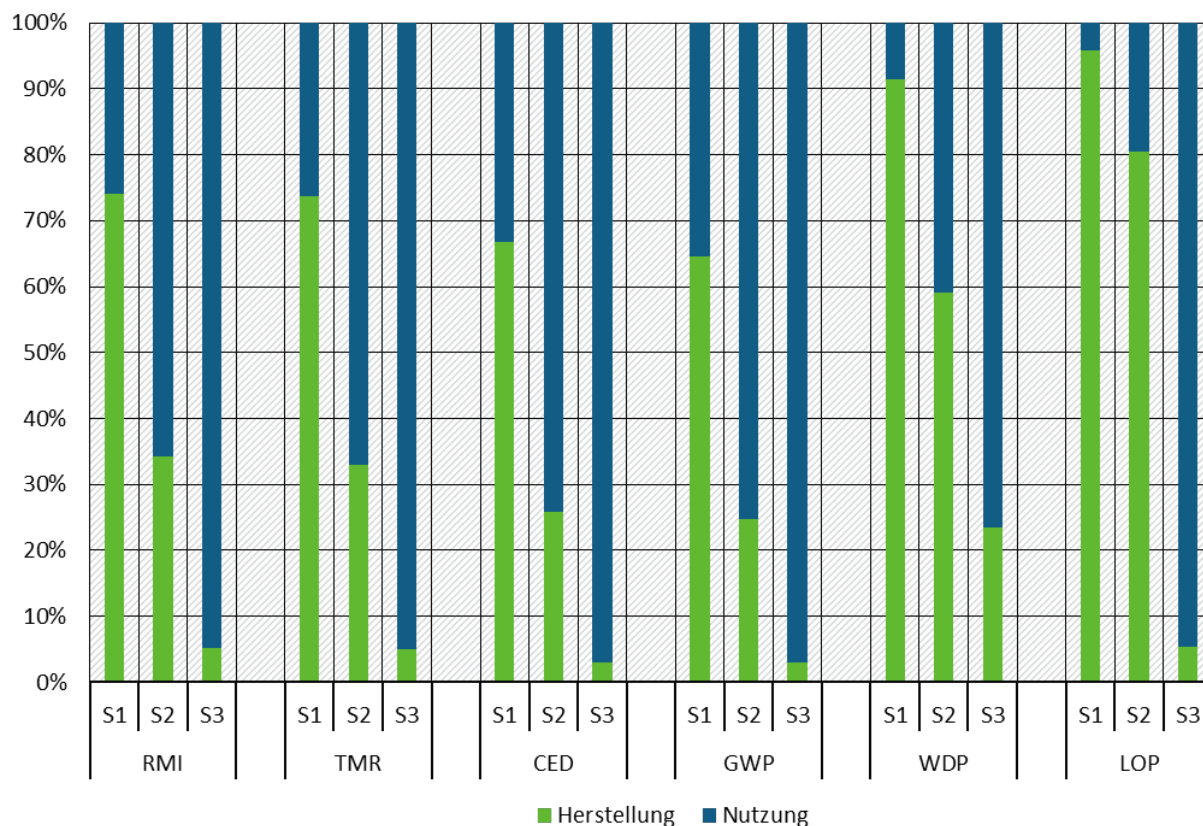
Neben dem RMI und dem TMR werden auch die weiteren im Forschungsvorhaben berechneten Indikatoren dargestellt, differenziert nach Szenarien sowie Anteilen an der Herstellungs- bzw. Nutzungsphase (und Tabelle 16).

Für die Indikatoren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (GWP) und kumulierter Energieaufwand (CED) ergeben sich die höchsten Werte im Szenario Abholung. Hier ist der Einfluss der Pkw-Fahrt entscheidend. Im Szenario RZ<sub>2011</sub> ist dagegen der Energiebedarf der Übertragungsnetze und des Rechenzentrums der relevanteste Faktor für GWP und CED, während im Szenario RZ<sub>effizient</sub> beide Indikatoren die Herstellung des Versandkartons widerspiegeln.

Die Indikatoren Wasserfußabdruck (WDP) und Landnutzungspotenzial (LOP) stehen in den Szenarien RZ<sub>2011</sub> und RZ<sub>effizient</sub> unter dem Einfluss des Versandkartons. Beim Szenario Abholung fällt der Transport des T-Shirts mit dem Pkw stark ins Gewicht, doch der Wegfall des Versandkartons spart wiederum die damit verbundenen potenziellen Umweltfolgen ein.

Im Szenario RZ<sub>effizient</sub> ist bei allen Indikatoren ein dominanter Einfluss der Herstellungsphase auf den Gesamtwert erkennbar. Im Szenario Abholung hingegen überwiegt die Nutzungsphase, die die Abholung mit dem Pkw beinhaltet. Für das Szenario RZ<sub>2011</sub> ergibt sich ein weniger eindeutiges Bild.

**Abbildung 51: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase in den drei Szenarien; S1 = RZ<sub>effizient</sub>, S2 = RZ<sub>2011</sub>, S3 = Abholung\***



\*Anmerkung/Erläuterung: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial. Für genaue Daten siehe Tabelle 16.

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

**Tabelle 16: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ im Vergleich der Szenarien**

Szenario	RMI (g)	TMR (g)	CED (MJ)	GWP (g CO <sub>2</sub> -Äq.)	WDP (m <sup>3</sup> )	LOP (m <sup>2</sup> a)
RZ <sub>effizient</sub> (S1)	0,46	0,58	5,77	0,31	0,005	0,12
RZ <sub>2011</sub> (S2)	1,00	1,28	14,86	0,81	0,008	0,15
Abholung (S3)	3,91	4,64	50,63	3,33	0,006	0,14

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Zusammenfassung und Ausblick

Für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft ist unter anderem auch die vermehrte Wiederverwendung von Produkten notwendig. Damit steigt deren Lebensdauer und der Ressourcenbedarf von Endverbraucher\*innen sinkt. Zu diesem Zweck haben sich verschiedene C2C-Plattformen etabliert, auf denen vor allem Gebrauchsgüter wie Kleidung verkauft werden.

Vor diesem Hintergrund beschäftigte sich die vorliegende Studie mit der Frage, welche Ressourcenintensität und andere Umweltwirkungen mit einer Transaktion über eine C2C-Plattform einhergehen.

Der Vergleich der Szenarien zeigt, dass diese digitale Anwendung besonders unter der Annahme eines umweltverträglichen Transports Ressourcen schont. Bereits wenige Fahrkilometer für die Abholung verschlechtern die Umweltwirkung. Darüber hinaus wirkt sich besonders der Energiebedarf für Datenübertragung und -speicherung in den Rechenzentren auf alle berechneten Rohstoffbedarfs- und Umweltwirkkategorien aus.

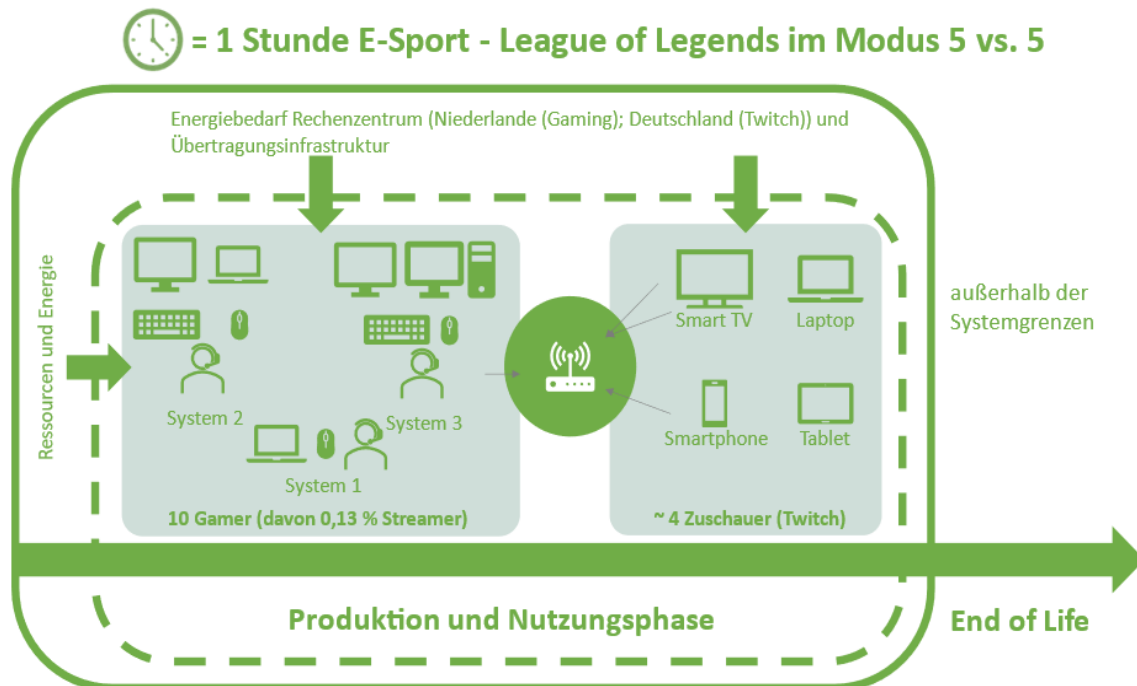
Überschlägig ist mit der Herstellung des Materials für ein T-Shirt ein Primärrohstoffeinsatz von 2,3 kg verbunden. Der Verkauf eines gebrauchten T-Shirts über eine C2C-Plattform geht in den Szenarien, die eine Lieferung des T-Shirts annehmen, mit einem deutlich geringeren Primärrohstoffeinsatz einher. Wird das T-Shirt allerdings mit einem Pkw abgeholt, ist der Primärrohstoffeinsatz des C2C-Verkaufsprozesses höher. Dieser überschlägige Vergleich zeigt, dass die Wahl des Transports entscheidend für das Umweltentlastungspotenzial durch C2C-Plattformen ist.

#### **4.3.8 Fallstudie E-Sport**

E-Sport steht für das sportwettkampfmäßige Spielen von Computer- oder Videospielen im Einzel- oder Mehrspielermodus (eSport-Bund Deutschland e. V., 2018). Bereits im Jahr 2018 gab jede\*r fünfte Deutsche an, ein elektronisches *Sportmatch* verfolgt zu haben (Game, 2019). Im Zeitraum 2016 bis 2018 hat sich der deutsche E-Sport-Markt fast verdoppelt. Weltweit gibt es derzeit mehr als 2,4 Mrd. Spieler\*innen und es ist weiterhin mit einem Anstieg der Popularität sowie der offiziellen Anerkennung von E-Sport als Sportart zu rechnen (Gray, 2018; Speight, 2018; Game, 2019). Aufgrund dieses rasanten Wachstums ist es wichtig, die Ressourcenintensität dieser Branche zu betrachten.

Da E-Sport eine junge Branche ist, die aufgrund technologischer Entwicklungen einem stetigen Wandel unterliegt, sind wenig Daten zur Ressourcenintensität verfügbar. In der vorliegenden Fallstudie wird, basierend auf Statistiken und Annahmen, ein Anwendungsfall definiert: das Gaming und Streaming von *League of Legends* (LoL) für 1 Stunde mit einem geeigneten Endproduktsystem für Gaming und Live-Streaming bei 10 Spielenden und anteiligen Stream-Zuschauenden (Abbildung 52 und Tabelle 17). Die Fallstudie berücksichtigt also das Spielen sowie das Streamen des Spiels (aufseiten von Spieler\*innen und Zuschauer\*innen).

**Abbildung 52: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Eine Stunde E-Sport“**



Verwendete Einflussgrößen: E-Sport-Game: League of Legends im Modus 5 vs. 5, Streaming-Plattform: Twitch, Gerätekombination für Gaming und Streaming: siehe Tabelle 17, Servernutzung für Gaming und Streaming: 0,055 GB/h und 2,025 GB/h (Twitch, 2023.; Global Gaming, 2022), Energiebedarf für Datenübertragung: 0,0016 kWh/GB für eine VDSL-Verbindung (Zimmermann *et al.*, 2020).

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

**Tabelle 17: Berücksichtigte Gerätekombinationen und Anteile in Prozent für die Fallstudie „Eine Stunde E-Sport“**

Systembestandteil	Anteil	Gerätekombinationen für Gaming/Streaming
Gaming und Streaming (Sendende)	10 %	Laptop und externe Maus
	30 %	Gaming-Laptop, externer Monitor, externe Maus, externe Tastatur
	60 %	Gaming-Computer, 2 x externer Monitor, externe Maus, externe Tastatur
	100 %	Router
Streaming (Zuschauende)	27 %**	Tablet
	22 %**	Fernseher
	24 %**	Smartphone
	27 %**	Laptop
	100 %**	Router

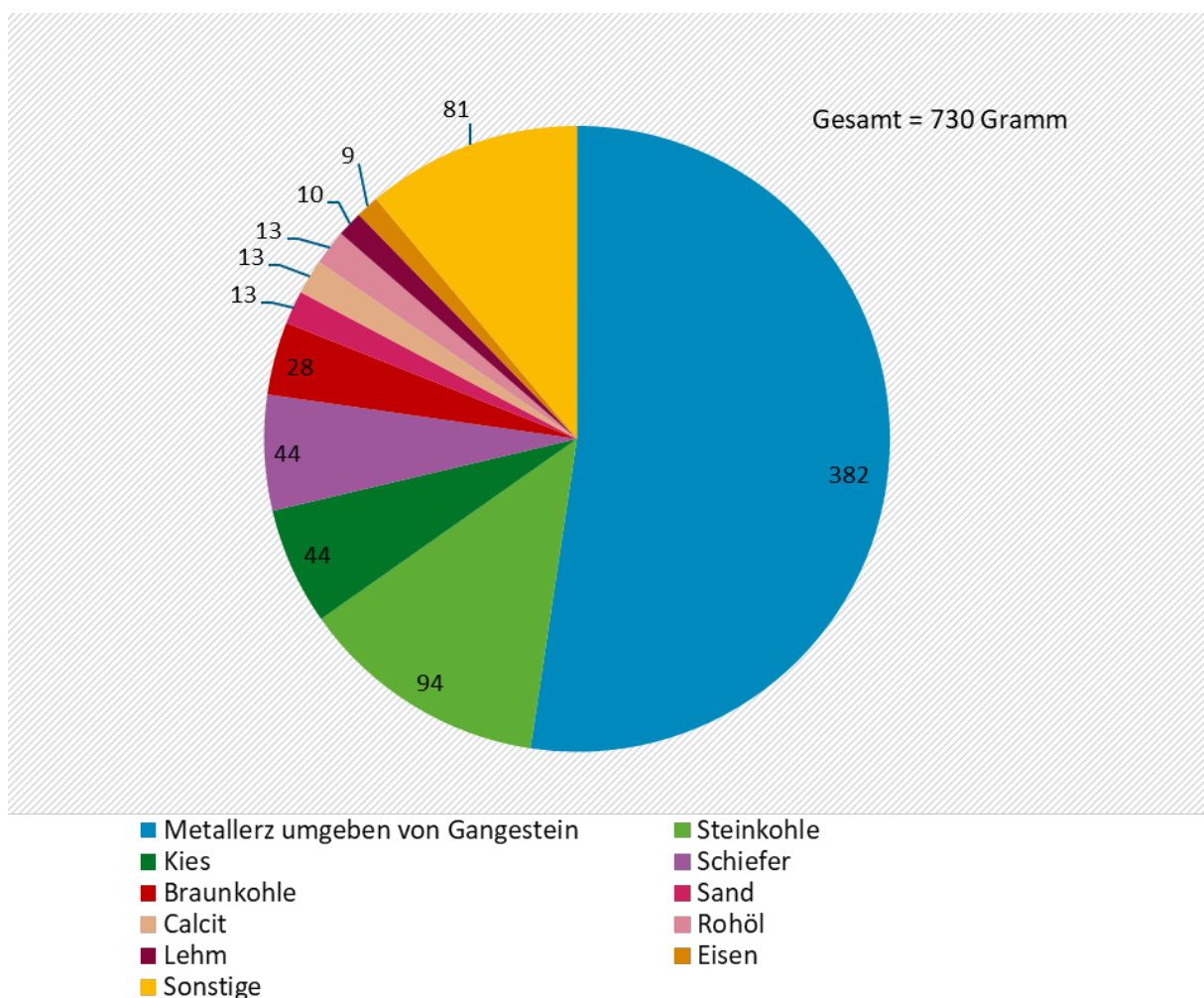
Quellen: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), \*\*Statista (2021a); LeagueFeed (2023).

### Ressourcenintensität der Herstellungsphase

Die Fallstudie betrachtet die im Forschungsvorhaben behandelten Ressourcenindikatoren, die sich auf die Herstellung und Nutzung der *Gaming*- und Streaming-Geräte sowie die Bereitstellung der Internetverbindung beziehen. Entsorgungs- und Recyclingprozesse sind in dieser Fallstudie nicht berücksichtigt (vgl. Abbildung 52).

Beim Blick auf die einzelnen Elementarflüsse fällt auf: Die Ressourcenintensität der Herstellungsphase ist – rein nach Masse betrachtet – vorrangig durch die Entnahme von Ganggestein, Stein- und Braunkohle, Kies und Schiefer geprägt (vgl. Abbildung 53). Insgesamt haben die fossilen und mineralischen Rohstoffe einen RMI von 686 g pro Stunde E-Sport (94 % des gesamten RMIs der Herstellungsphase). Für die Herstellung der Gaming-Gerätekombination beläuft sich der gesamte Primärrohstoffeinsatz (RMI) auf insgesamt rund **730 g** pro Stunde E-Sport (vgl. Abbildung 55). Bezieht man auch die ungenutzte Materialentnahme in die Berechnung ein, ergibt sich ein Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) von **830 g** pro Stunde E-Sport (Gaming) (vgl. Abbildung 55).

**Abbildung 53: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Eine Stunde E-Sport“ in Gramm\***



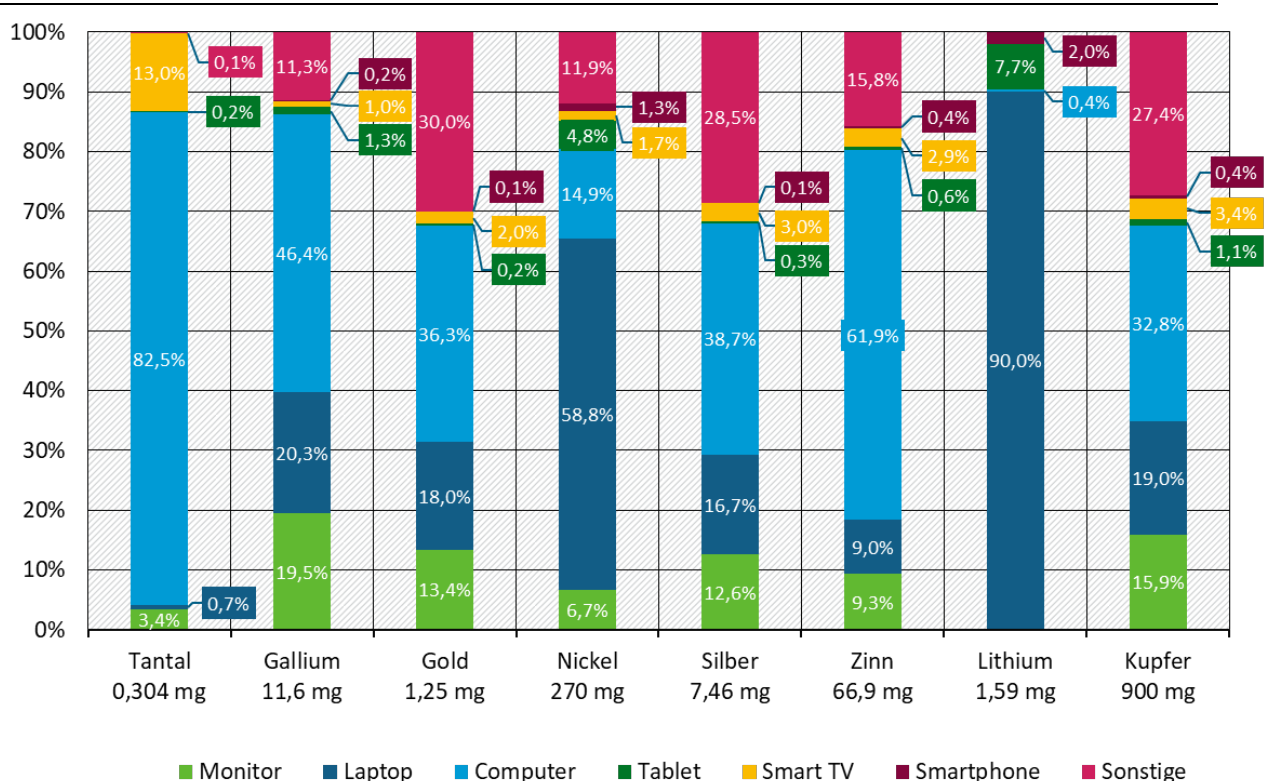
\* Die Abbildung zeigt gerundete Zahlen

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe

Auffällig ist, dass für alle näher betrachteten besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffe (**Gesamtmenge = 1.259,1 mg**) der Großteil des Bedarfs auf eines oder mehrere der folgenden Endgeräte entfällt: den Monitor, Computer, Laptop und „Sonstige“ (im Wesentlichen Router, Tastatur und PC-Maus; siehe Abbildung 54). Rund 90 % des Lithiumbedarfs sind auf die Herstellung des Laptops und über 80 % des Tantalbedarfs auf die Herstellung des Computers zurückzuführen.

**Abbildung 54: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ in Milligramm und Prozent**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Ressourcenintensität der Nutzungsphase

Die einstündige Nutzung des aufgezeigten E-Sport-Systems verursacht einen Primärrohstoffeinsatz (RMI) von **2,34 kg** in der Nutzungsphase. Maßgeblich sind der Strombedarf der Endgeräte und der Internetnutzung. Der Hauptanteil (74 %) des Primärrohstoffbedarfs in der Nutzungsphase geht auf fossile Energieträger zurück, die im zugrunde liegenden Strommix in Deutschland (Standort des Twitch-Streaming-Servers) und den Niederlanden (Standort des LoL-Gaming-Servers) enthalten sind. Der modellierte Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) beläuft sich auf **3,09 kg**.

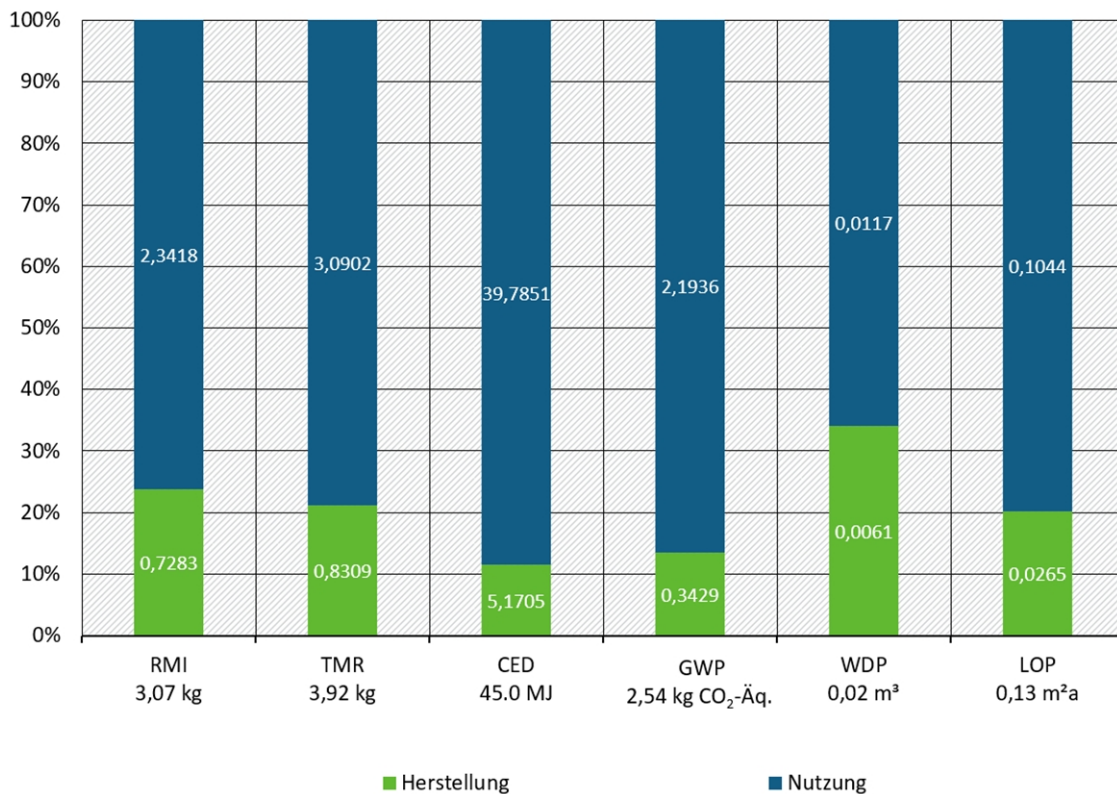
### Vergleich von Herstellungs- und Nutzungsphase

Neben dem RMI und dem TMR stellt Abbildung 55 auch die weiteren im Forschungsvorhaben berechneten Indikatoren je Stunde E-Sport dar – mit absoluten Werten sowie nach Anteilen an der Herstellungs- bzw. Nutzungsphase. Die Vorgehensweise ist analog zu den Berechnungen von RMI und TMR. Über alle Indikatoren hinweg dominiert der Einfluss der Nutzungsphase. Bei den



Indikatoren CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (GWP) und kumulierter Energieaufwand (CED) hat die Nutzungsphase gegenüber der Herstellungsphase das größte Gewicht. Ausschlaggebend dafür ist der Energiebedarf der Endgeräte, insbesondere der Gamer\*innen, der mit fossilen Energieträgern gedeckt wird. Beim Wasserfußabdruck (WDP) hat die Herstellungsphase im Vergleich zu den anderen Indikatoren mit rund 34 % den höchsten Einfluss. Dies ist vorwiegend auf die Produktion des Computers und auch des Laptops zurückzuführen. Detaillierte Informationen zu den Rohstoffgruppen können im Anhang (Abraham *et al.*, 2023b) im Detail nachgelesen werden.

**Abbildung 55: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ absolut und in Prozent nach Herstellungs- und Nutzungsphase\***



\*Anmerkung/Erläuterung: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Fallstudie untersucht ein einstündiges E-Sport-Match des Onlinespiels *League of Legends*. Sie berechnet den Ressourcenaufwand der dafür benötigten IKT-Endgeräte inklusive Herstellung sowie die Energiebedarfe bei der Datenbereitstellung und -übertragung. Die Ressourcenintensität in dieser Fallstudie wird stark durch die Nutzungsphase dominiert: Über alle Indikatoren hinweg entfallen mehr als 65 % der Auswirkungen auf diesen Teil des Lebenszyklus. Hervorzuheben ist, dass die Energiebedarfe der Endgeräte bei den Spielenden den größten Anteil an den Ressourcen der Nutzungsphase haben. Somit könnten energiesparende Geräte die untersuchten Umweltwirkungen reduzieren. Außerdem ließen sich die Umwelteinflüsse durch mehr erneuerbare Energien im Strommix abschwächen. Die

Ressourcenintensität der Datenübertragung über das Internet spielt in dieser Fallstudie eine untergeordnete Rolle. Da aber die übertragenen Datenmengen steigen und möglicherweise ein Übergang zum Cloud-Gaming bevorsteht, wäre es wichtig, ein genaueres Bild des Energiebedarfs für die Datenübertragung und -verarbeitung zu gewinnen.

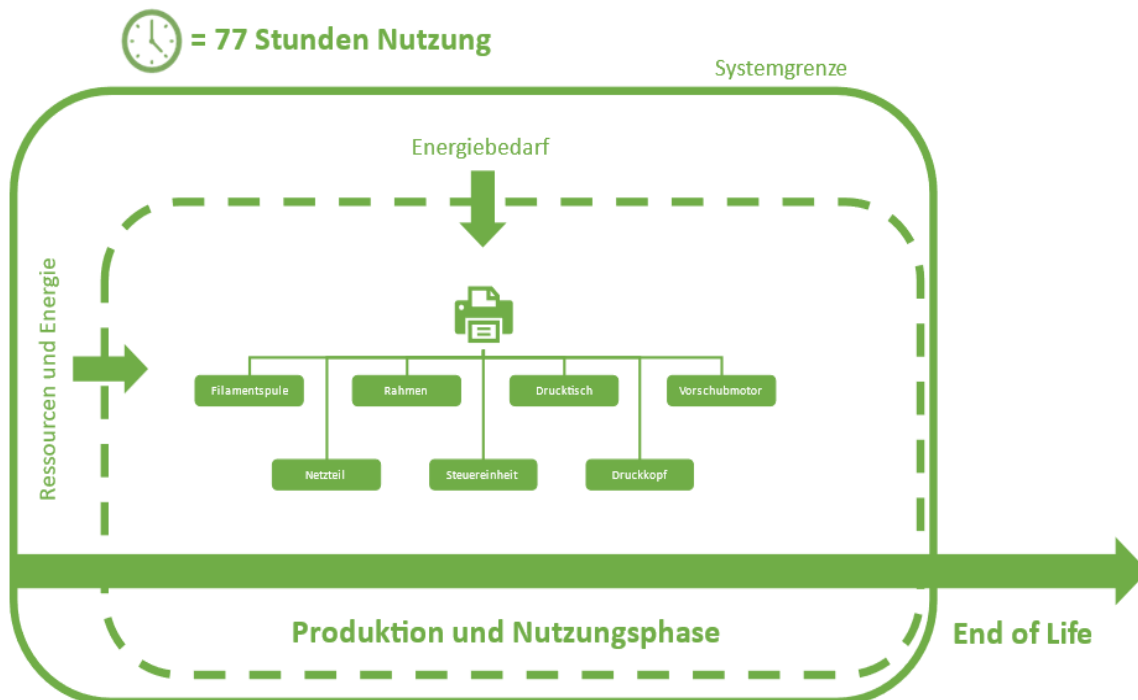
Besonders hervorzuheben ist, dass alle Ergebnisse lediglich eine Annäherung an die Thematik des Ressourcenbedarfs durch E-Sport darstellen. Aufgrund des stark wachsenden E-Sport-Markts wird es jedoch immer dringender, eine valide Datengrundlage zu erheben.

#### 4.3.9 Fallstudie privater 3D-Druck

Der 3D-Druck ist eine Technologie, die sowohl die Herstellung von Kunststoffprodukten im heimischen Gebrauch als auch in hohen Stückzahlen in der Industrie ermöglicht. Ihrem Einsatz wird ein hohes Umweltentlastungspotenzial zugesprochen, da man von weniger Transporten und Materialbedarf ausgeht. Obwohl der 3D-Druck schon in den 1980er-Jahren erfunden wurde, gilt er in der industriellen Anwendung als Nischentechnologie. Bis heute kann er sich kaum gegen die bewährten industriellen Fertigungsverfahren – etwa Urformen (beispielsweise Spritzgießen) und Umformen (Walzen, Pressen, Ziehen, Biegen) – durchsetzen (Keppner *et al.*, 2018). Im Gegensatz zu anderen Verfahren (beispielsweise dem Spritzgussverfahren) kommt es beim 3D-Druck selten zu Verschnitt und Materialentsorgung, weil das schichtweise Auftragen des Filaments einen Überschuss an Druckmaterial verhindert. Durch die bedarfsgerechte industrielle Herstellung der Produkte kann der 3D-Druck auch den Transport- und Logistikaufwand verringern, obwohl das Druckmaterial transportiert werden muss (Keppner *et al.*, 2018). Dem gegenüber stehen die lange Produktionsdauer und die geringere Qualität der Produkte. In der Heimanwendung ist aufgrund der Lieferung des Druckmaterials nicht von kürzeren Transportwegen auszugehen (Keppner *et al.*, 2018). In der Kritik steht darüber hinaus der hohe Energiebedarf durch die lange Druckzeit.

Die vorliegende Fallstudie untersucht die Herstellung aller Komponenten für einen Desktop-3D-Drucker und einer Filamentspule für den Heimgebrauch sowie die Nutzung des Druckers für einen Druckzyklus (Abbildung 56). Ein Druckzyklus entspricht dem Verbrauch einer Filamentspule zur Druckprodukterzeugung und einer Druckzeit (Nutzungsdauer) von 77 Stunden. Die Ressourcenintensität in der Nutzungsphase, bezogen auf die Dauer eines Druckzyklus, wird mit einem Strombedarf von 0,15 kW und einem Filamentbedarf von 10 g pro Stunde berechnet. Es ist in diesem Fallbeispiel nicht möglich, die Ressourcenintensität der Herstellung des Druckers und seiner Komponenten anteilig auf einen Druckzyklus umzurechnen. Daher bezieht sich die Ressourcenintensität der Herstellungsphase auf den gesamten Drucker und all seine Komponenten sowie auf eine Filamentspule.

**Abbildung 56: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“**



Anmerkung/Erläuterung. Die einzelnen Komponenten des 3D-Druckers weisen teils eine sehr unterschiedliche Nutzungsdauer auf. Daher bezieht sich die Ressourcenintensität der Herstellungsphase auf die einmalige Erzeugung aller Komponenten. Die Ressourcenintensität der Nutzungsphase bezieht sich auf einen Druckzyklus (= Verbrauch einer Filamentspule) von 77 Stunden Druckzeit.

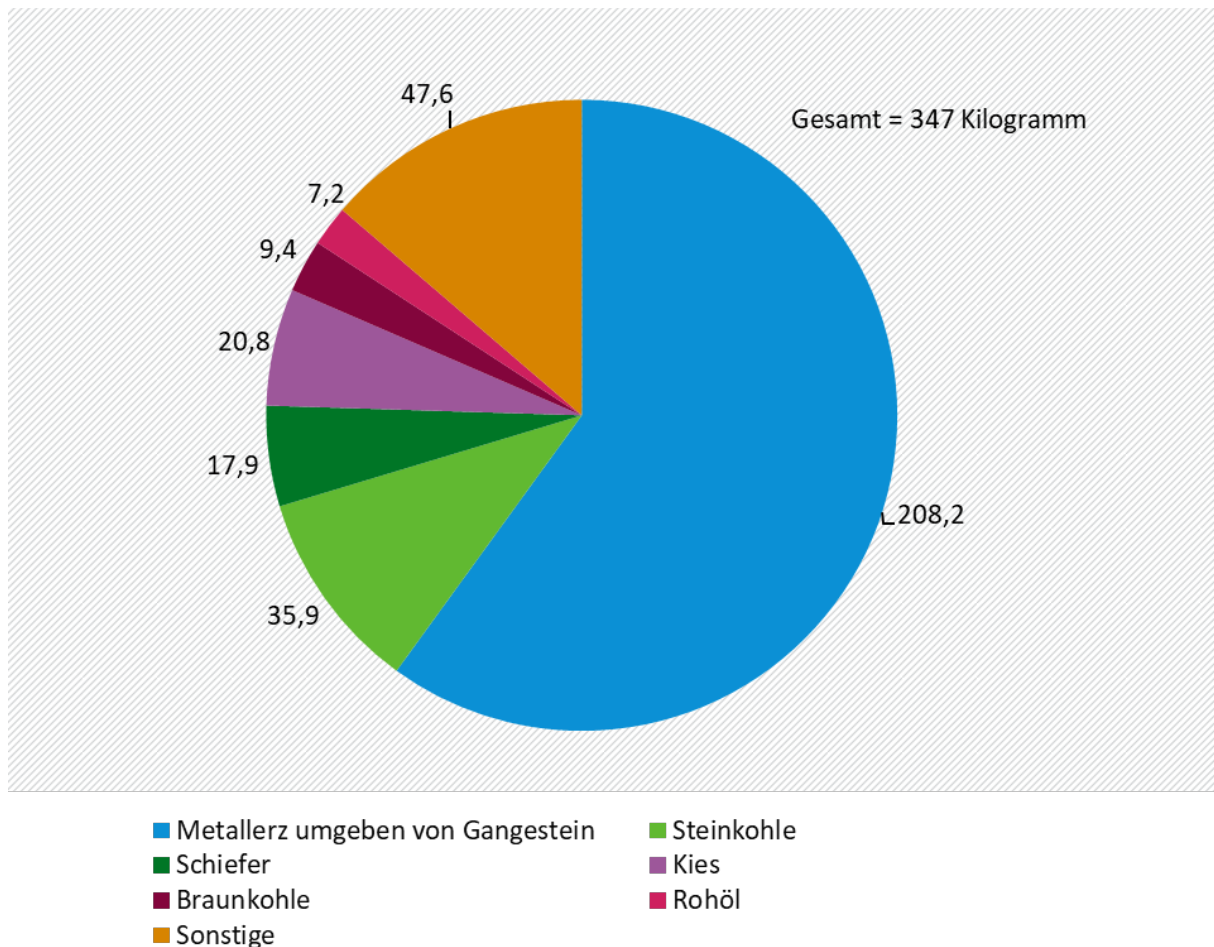
Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### Ressourcenintensität der Herstellungsphase

Die Fallstudie berechnet die einzelnen Ressourcenindikatoren für die Herstellung eines 3D-Druckers inklusive aller Komponenten und einer Filamentspule (Abbildung 56). Die Entsorgungs- und Recyclingprozesse sind in dieser Fallstudie nicht berücksichtigt.

Die Elementarflüsse während der Herstellungsphase des Druckers sind – nach Masse betrachtet – geprägt durch den Rohstoff Ganggestein, der rund 61,9 % der benötigten Rohstoffe ausmacht (siehe Abbildung 57). Darauf folgen Steinkohle (10,3 %), Kies (6,0 %), Schiefer (5,2 %), Braunkohle (2,7 %), Rohöl (2,1 %) und sonstige Materialien (13,7 %). Der Primärrohstoffbedarf (auf Basis der in genannten Elementarflüsse) für die Herstellung des 3D-Druckers beläuft sich auf insgesamt **347,4 kg** (vgl. Abbildung 59). Davon fallen 97% (336,5 kg) auf fossile und mineralische Rohstoffe. Bezieht man auch die ungenutzte Materialentnahme in die Erhebung ein, ergibt sich ein Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) der Herstellung von insgesamt **429,6 kg** (vgl. Abbildung 59). Detaillierte Informationen zu den Rohstoffgruppen können in Abraham *et al.*, 2023b nachgelesen werden.

**Abbildung 57: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Kilogramm\***



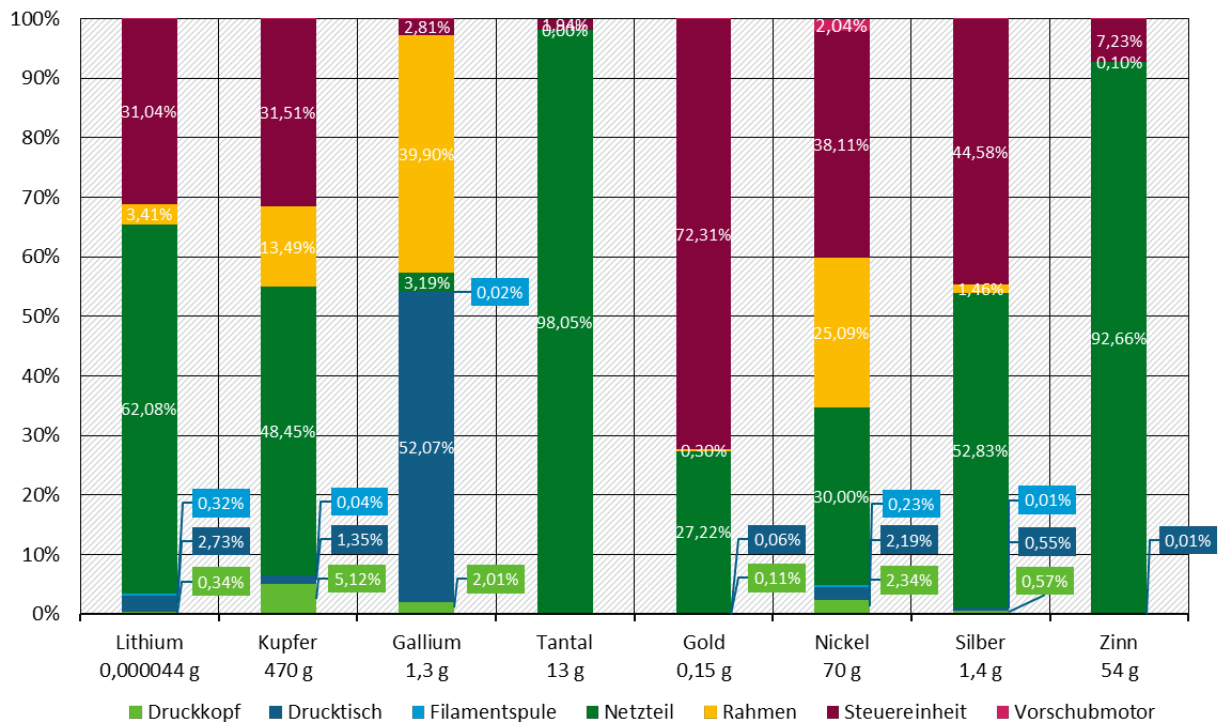
\* Die Abbildung zeigt gerundete Zahlen

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe

Die einzelnen Komponenten des 3D-Druckers enthalten besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe wie beispielsweise seltene Erden (Gesamtmenge = 609,85 g, vgl. Abbildung 58). Der höchste prozentuale Anteil der digitalisierungs-relevanten Rohstoffe entfällt meist auf die Netzteil-Komponente des 3D-Druckers, wie im Fall von Lithium, Kupfer, Tantal (98 %), Silber und Zinn (Abbildung 58). Dies lässt sich auf den recht hohen Gewichtsanteil von 20 % am Gesamtgewicht des Druckers sowie auf spezifische Bestandteile des Netzteils zurückführen. Obwohl die Steuereinheit des 3D-Druckers nur rund 2,6 % am Gesamtgewicht ausmacht, entfällt darauf der größte Goldbedarf. Kupfer spielt für die Herstellung des Druckers mengenmäßig mit **0,47 kg** die größte Rolle. Bezogen auf die jährliche Gesamtentnahmemenge an Kupfer ist das aber nicht problematisch. Am kritischsten ist das verbaute Tantal zu bewerten: Es macht rund **0,00000068 %** der jährlichen Gesamtentnahme aus.

**Abbildung 58: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Gramm und Prozent**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Ressourcenintensität der Nutzungsphase

Dem Einsatz des 3D-Druckers kann keine konkrete Nutzungsdauer zugeschrieben werden, da diese durch den Austausch einzelner verschlissener Komponenten stark variiert. Die hier betrachtete Nutzungsphase bezieht sich daher explizit auf die Ressourcenintensität der Nutzung einer einzelnen Filamentspule. Mit einer Filamentspule lassen sich ca. 10 Produkte mit einem Gewicht von je 70 g herstellen.

Für die Nutzungsphase des 3D-Druckers ergibt sich ein Primärrohstoffeinsatz (RMI) von **6,3 kg**, der hauptsächlich durch den Stromverbrauch während des Druckvorgangs bedingt ist. Da 3D-Drucker hauptsächlich mit dem deutschen Strommix betrieben werden, machen die fossilen Energieträger, insbesondere Braunkohle, rund **74 %** des RMI aus. Der Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) beläuft sich auf **8,3 kg**.

### Vergleich von Herstellungs- und Nutzungsphase

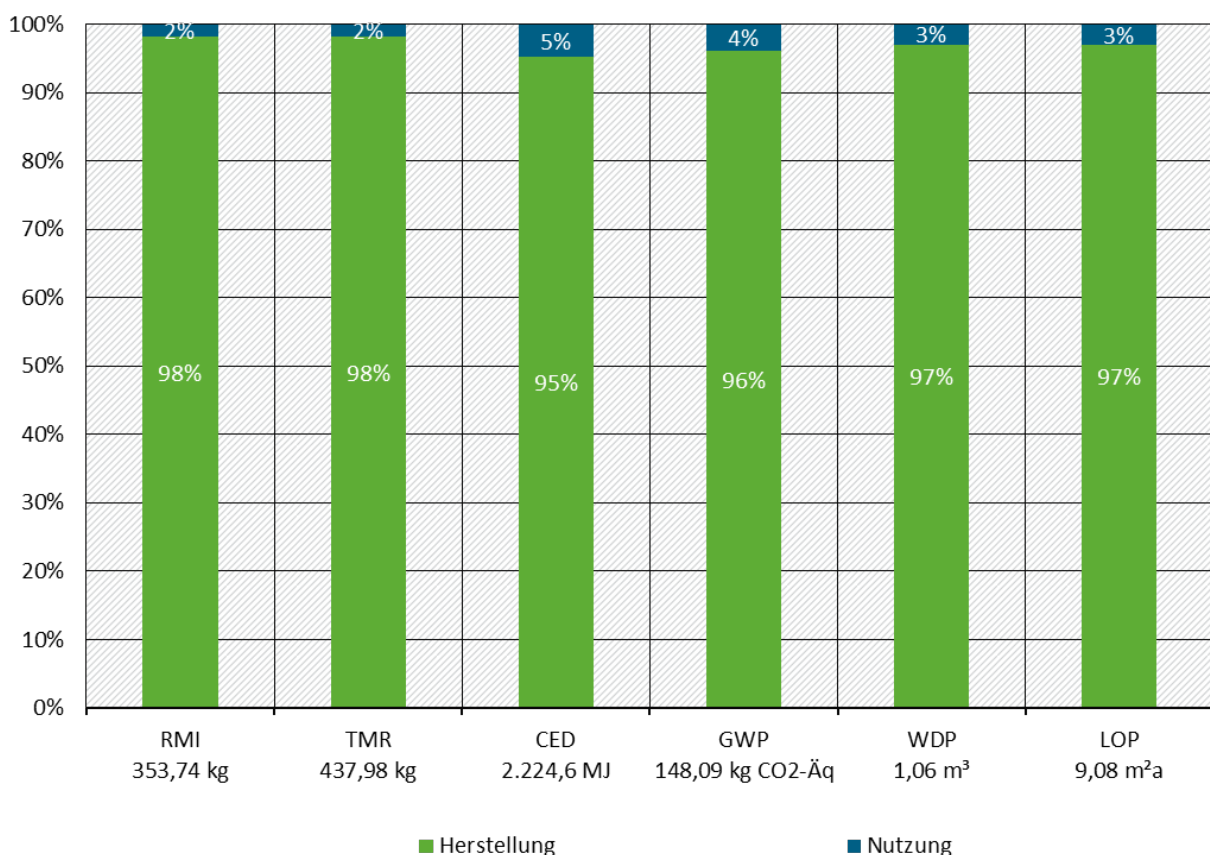
Ein Vergleich von Herstellung und Nutzung ist in dieser Fallstudie nur bedingt möglich, da die einmalige Herstellung der 3D-Drucker-Komponenten und die Nutzungsdauer während des Verbrauchs einer Filamentspule einander gegenübergestellt werden. Das bedeutet: Mit jeder neuen Filamentspule nimmt der Unterschied zwischen Herstellung und Nutzung ab. Dazu kommt, dass einzelne Bauteile wie der Druckkopf nach etwa 1.000 Druckstunden abgenutzt sind und ausgetauscht werden müssen.

Bei allen Ressourcenindikatoren dominiert die Herstellungsphase mit über 90 % (Abbildung 59). Vom kumulierten Energieaufwand (CED) entfallen **2.118 MJ** (95 %) auf die Herstellung und nur **107 MJ** (5 %) auf die Nutzung des 3D-Druckers. Von den THG-Emissionen (GWP) fallen

**142 kg** (96 %) in der Herstellungsphase und **5,9 kg** (4 %) in der Druckphase an. Beim Blick auf die einzelnen Komponenten des 3D-Druckers sticht mit dem höchsten Energieverbrauch und Treibhausgaspotenzial während Herstellung und Nutzung besonders die Steuereinheit hervor (28 % des CED und 29 % des GWP).

Mit jeder neuen Filamentspule nimmt der Unterschied zwischen Herstellung und Nutzung ab. Der Break-even-Point zwischen Herstellung und Nutzung ist nach 35 zugekauften Filamentspulen erreicht. Dies entspricht ca. 2.700 Druckstunden bzw. 112 Tagen durchgehendem Druckprozess. Während dieser Zeit ist ein zweimaliger Austausch des Druckkopfes und ggf. weiterer Komponenten zu erwarten, was wiederum den Ressourcenbedarf für die Herstellung der Komponenten erhöht.

**Abbildung 59: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ absolut und in Prozent nach Herstellungs- und Nutzungsphase\***



\*Anmerkung/Erläuterung: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

## Zusammenfassung und Ausblick

Diese Fallstudie berechnet verschiedene Ressourcenindikatoren für den Heimgebrauch eines 3D-Druckers und stellt die Herstellungs- und Nutzungsphase einander gegenüber. Die Daten für die Berechnung stammen aus der LCA-Datenbank und der Datenbank von Ecoinvent 3.8. Die einzelnen Komponenten basieren auf mehreren Materiallisten aus webbasierter Recherche. Der Bedarf an materiellen Rohstoffen ist vergleichbar mit jenen anderer elektronischer Alltagsgegenstände wie Mobiltelefone, Fernsehgeräte und Laptops. Eine explizite Rohstoffverknappung durch 3D-Druckgeräte in Privathaushalten lässt sich aus den Ergebnissen nicht ableiten. Auch bei den digitalisierungsrelevanten Rohstoffen wird nicht von einer Verknappung durch 3D-Drucker ausgegangen. Bei allen Indikatoren dominiert die Herstellungsphase des 3D-Druckers. Mit der Zeit gleichen sich die Herstellungs- und Nutzungsphase jedoch an: Der Break-even-Point wird nach 35 zugekauften Filamentspulen erreicht.

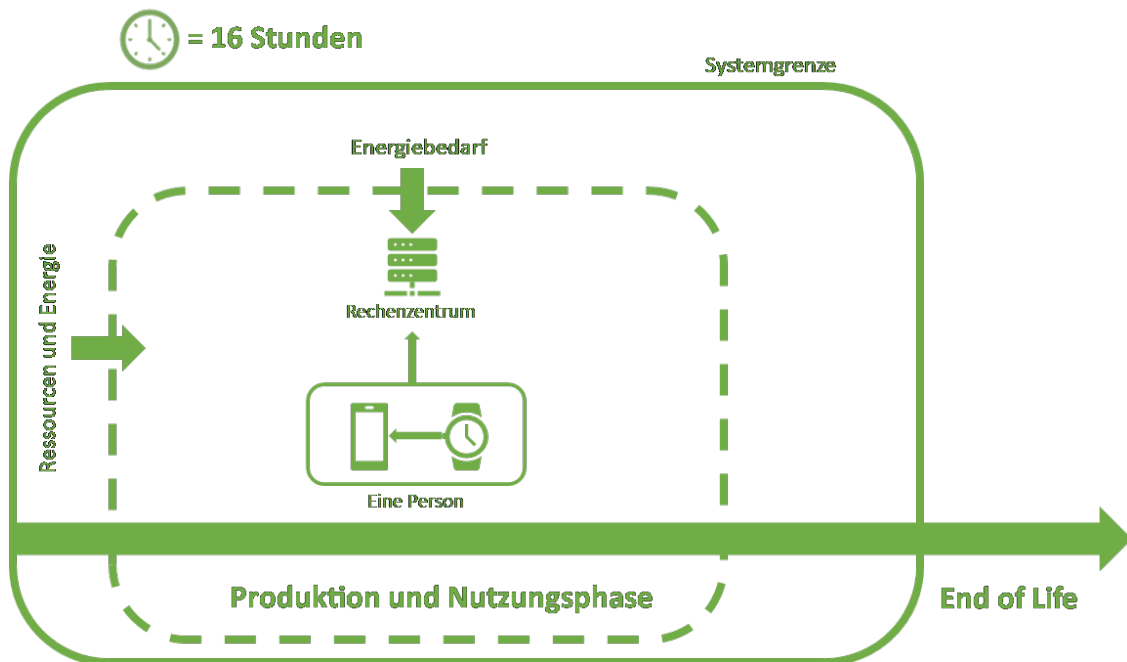
### 4.3.10 Fallstudie E-Health: Smartwatch für digitale Fitness und Gesundheit

Digitale Technologien erobern zunehmend den Gesundheits-, Fitness- und *Wellbeing*-Bereich (Hollasch & Sahl, 2021). Hier sind besonders Smartwatches gefragt (Hollasch & Sahl, 2021), die sich mit dem Smartphone verbinden lassen. Sie vermitteln neben der Uhrzeit weitere Informationen und erfassen Daten wie Schrittzahl oder Puls (Bendel, 2021). 2019 trug bereits mehr als ein Drittel der Deutschen eine Smartwatch (Tenzer, 2022). Allein zwischen 2019 und 2020 stieg der Anteil deutscher Smartwatch-Tragender um 9 %. Für 2023 wird der Branche ein Umsatz von 1,253 Mrd. Euro prognostiziert (Hollasch & Sahl, 2021). Der Markt wird derzeit von Apple (40 % Marktanteil) und Samsung (30 % Marktanteil) dominiert (BVDW, 2016).

Zum Umweltentlastungspotenzial kann die Fallstudie wenig direkte Aussagen treffen: Diese digitale Anwendung ist eine neue Form der Selbstanalyse und -optimierung und bietet ganz unterschiedliche, teils neue Funktionen. Es ist also davon auszugehen, dass Smartwatches und ähnliche Geräte in Kombination mit Apps und Smartphones den Ressourcenbedarf insgesamt steigern, sofern die Nutzer\*innen zuvor keine Gesundheits- bzw. Fitnessdaten erfasst haben.

Die vorliegende Fallstudie untersucht die Ressourcenintensität des Anwendungsfalls „Nutzung einer Smartwatch in Kombination mit einem Smartphone für 16 Stunden“ (Abbildung 60). Bei der Nutzung der Apple Watch werden Daten erzeugt und empfangen. Die Smartwatch überträgt die Daten dann über Bluetooth auf das Smartphone. Das Smartphone wiederum speichert die Daten über den Fitness- und Gesundheitszustand in der Cloud. Grundlage der Fallstudie ist eine 30-minütige Nutzung des Smartphones innerhalb der 16 Stunden zur Analyse der Gesundheits- und Fitnessdaten. Betrachtet werden die anteilige Ressourcenintensität der Produktions- und Nutzungsphase exemplarisch für eine Apple Watch in Kombination mit einem Smartphone sowie der Energieaufwand der Datenübertragung während der Nutzungsphase.

**Abbildung 60: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“**



Verwendete Einflussgrößen: Nutzung des Smartphones zur Analyse von Gesundheitsdaten: 30 Minuten.

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

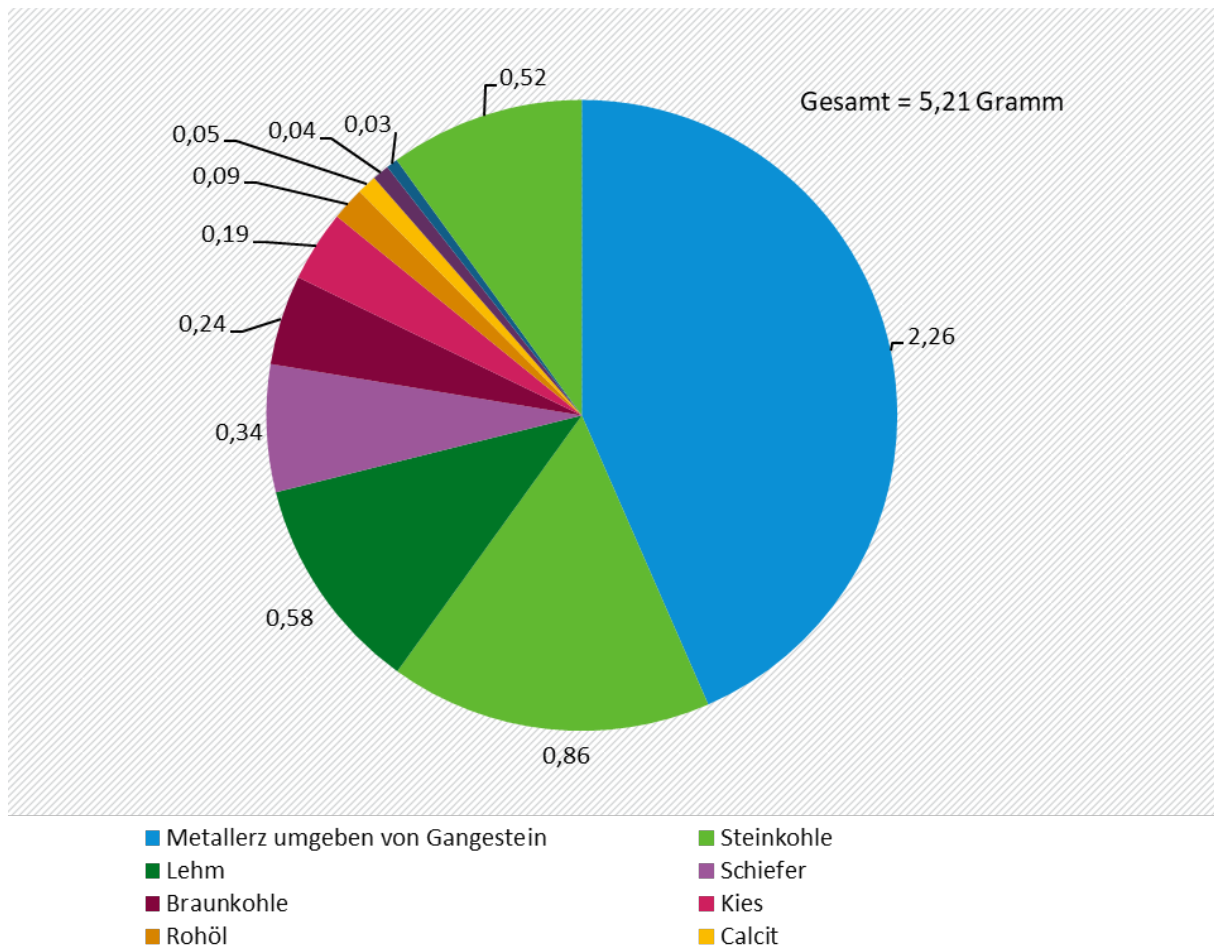
### Ressourcenintensität der Herstellungsphase

Gegenstand der Fallstudie sind die im Forschungsvorhaben behandelten Ressourcenindikatoren bezüglich der Herstellung und Nutzung der Endgeräte sowie der Bereitstellung der Internetverbindung. Entsorgungs- und Recyclingprozesse sind in der vorliegenden Fallstudie nicht berücksichtigt (vgl. Abbildung 60).

Der RMI der Herstellungsphase von **5,21 g** besteht zu 99 % (5,18 g) aus fossilen und mineralischen Rohstoffen. Mit Blick auf die einzelnen Elementarflüsse wird der RMI (Abbildung 61) – rein der Masse nach – vorrangig durch die Entnahme von Ganggestein, Stein- und Braunkohle, Lehm und Schiefer geprägt. Der verbleibende Anteil von umfasst vorrangig Kies, Rohöl, Calcit, Sand und Eisen. Dabei sind in den meisten Fällen die Produktionsvorkette und Energienutzung für den Einsatz der entsprechenden Ressourcen verantwortlich.



**Abbildung 61: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ in Gramm**



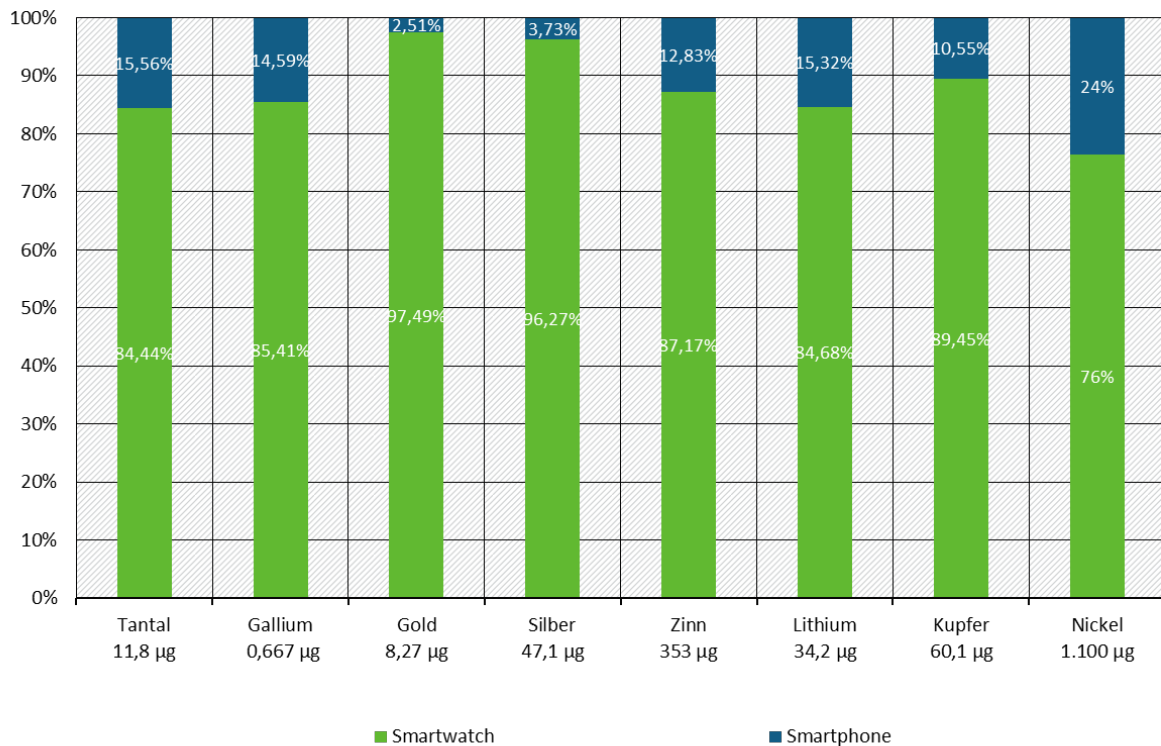
Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Wird auch die ungenutzte Materialentnahme in die Berechnung einbezogen, ergibt sich ein Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) von **6,6 g** pro 16 Stunden Nutzung der Smartwatch.

**Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe**

Bei allen näher betrachteten besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffen (Gesamtmenge = 1615,14 µg, vgl. Abbildung 62) entfällt der Großteil des Bedarfs auf die Smartwatch. Der geringe Beitrag des Smartphones zum Rohstoffbedarf geht auf die Annahme einer lediglich 30-minütigen Nutzung zurück. Abbildung 62 zeigt die Verteilung des Bedarfs auf Smartwatch bzw. Smartphones für sechs der zwölf als relevant identifizierten Rohstoffe. Bei den anderen sechs Rohstoffen (Samarium, Praseodymium, Cerium, Lanthan, Nickel und Europium) liegt ein Verhältnis von 99 % durch die Smartwatch-Produktion zu 1 % durch die Smartphone-Produktion vor.

**Abbildung 62: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ in Mikrogramm und Prozent**



Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Ressourcenintensität der Nutzungsphase

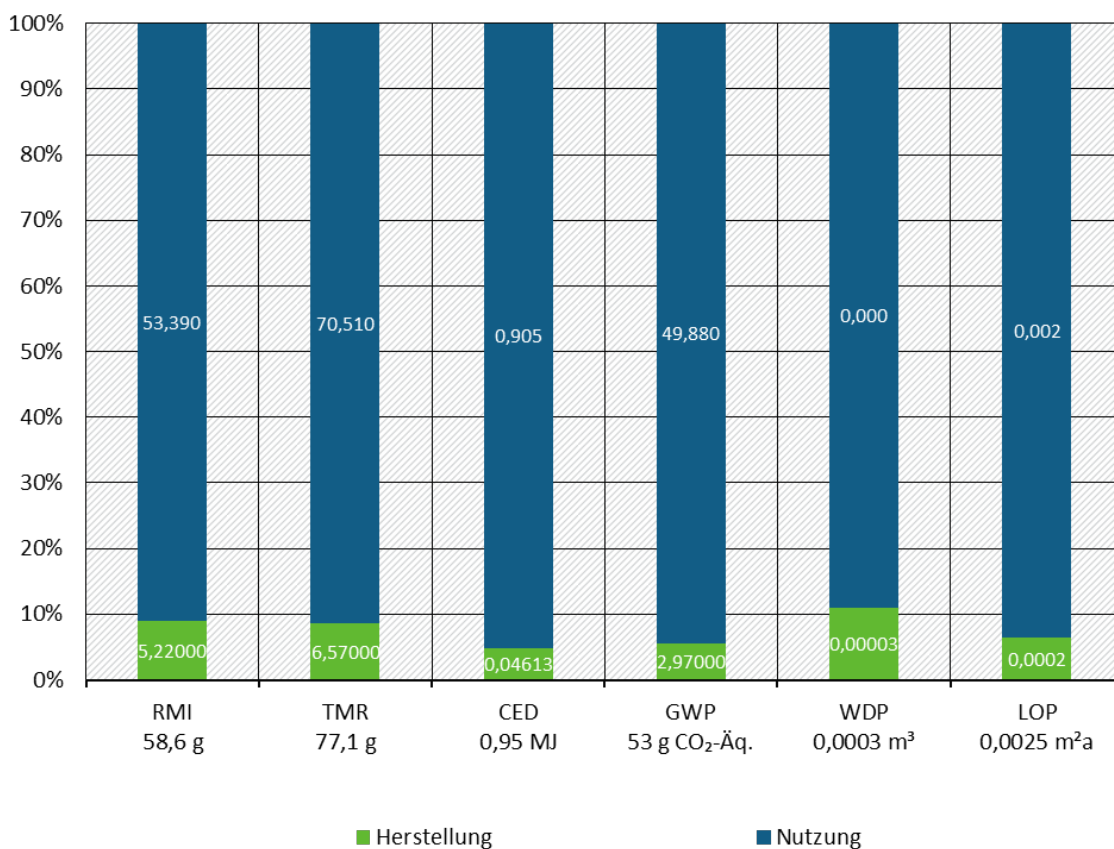
Die 16-stündige Nutzung des aufgezeigten E-Health-Systems verursacht einen Primärrohstoffbedarf von **53,4 g** in der Nutzungsphase, der hauptsächlich auf die Datenspeicherung in Rechenzentren zurückgeht. Der modellierte Gesamtprimärmaterialaufwand beläuft sich auf **70,5 g**. Den Primärrohstoffbedarf der Nutzung verursachen zu mehr als 50 % die Strombedarfe der Rechenzentren. Der hierfür angenommene deutsche Strommix führt zu einer Dominanz fossiler Energieträger am Primärrohstoffbedarf der Nutzungsphase.

### Vergleich von Herstellungs- und Nutzungsphase

Neben dem RMI und dem TMR stellt Abbildung 63 auch die weiteren im Forschungsvorhaben berechneten Indikatoren dar. Dabei wird nach Anteilen an der Herstellungs- bzw. Nutzungsphase differenziert. Über alle Indikatoren hinweg ist die Nutzungsphase dominant. Sowohl beim Wasserfußabdruck (WDP) als auch beim Landnutzungspotenzial (LOP) macht die Datenspeicherung in Rechenzentren einen Großteil des Einflusses aus. Ein erheblicher Anteil des Wasserfußabdrucks bei der Herstellung der Smartwatch entfällt auf die Leiterplatte. Dieses Ergebnis deckt sich mit den Untersuchungen des Green Electronic Councils: Demnach ist die Herstellung der Leiterplatte besonders energieintensiv, und es kommen umweltschädliche Chemikalien bei ihrer Produktion zum Einsatz (Green Electronics Council, 2020).

Eine Sensitivitätsanalyse des mit hohen Unsicherheiten behafteten Eingangsparameters „Energiebedarf bei der Datenspeicherung“ ergibt, dass je nach Annahme für den Energiebedarf auch die Herstellungsphase den höheren Anteil an den Ressourcen ausmachen kann.

**Abbildung 63: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ absolut und in Prozent nach Herstellungs- und Nutzungsphase\***



\*Anmerkung/Erläuterung: RMI = Primärrohstoffeinsatz, TMR = Gesamtprimärmaterialaufwand, CED = kumulierter Energieaufwand, GWP = CO<sub>2</sub>-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

### Zusammenfassung und Ausblick

Smartwatches kommen in Deutschland bereits in großer Zahl zum Einsatz – und ein weiterhin starkes Wachstum steht zu erwarten. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die vorliegende Fallstudie mit der Frage, mit welcher Ressourcenintensität und ausgewählten anderen Umweltwirkungen diese Form des digitalen Wandels in unserer Gesellschaft einhergeht.

Der Verwendung von E-Health-Anwendungen und insbesondere von Smartwatches zum Gesundheits- und Fitnesstracking kann kein direktes Umweltentlastungspotenzial zugeschrieben werden.

Die Ressourcenintensität in der Herstellungsphase der Smartwatch entfällt zum großen Teil auf die Produktion der Leiterplatte. Insgesamt überwiegt jedoch der Einfluss der Nutzungsphase auf alle Indikatoren, was hauptsächlich auf den Energiebedarf der Datenspeicherung zurückzuführen ist. Es besteht dringender Forschungsbedarf für die Erfassung des Energiebedarfs bei der Datenspeicherung, da dieser Parameter mit großen Unsicherheiten behaftet ist und einen signifikanten Einfluss auf die Ergebnisse hat.

Auf Basis der Fallstudie lässt sich zudem überschlägig die Ressourcenintensität im gesamtdeutschen Kontext berechnen. Unter der Annahme, dass im Jahr 2022 circa ein Drittel der 84,6 Mio. Deutschen eine Smartwatch trug, ergibt sich ein Gesamtwert von mehr als 73 t CO<sub>2</sub>-Äquivalente allein durch die anteilige Herstellung der Uhren für die 16-stündige Nutzung. Der entsprechende Primärrohstoffbedarf summiert sich auf mehr als 139 t.

#### 4.4 Diskussion der Ergebnisse und Fazit zu den Fallstudien

Bei der Diskussion der Ergebnisse und etwaigen Folgerungen sind die gewählten System- und Betrachtungsgrenzen sowie die gewählte Untersuchungseinheit zu beachten.

Das Lebenszyklusende wurde bei den meisten Fallstudien ausgeklammert: Die Literaturanalyse ergab keine hohe Signifikanz dieser Phase für die Ressourcen- und Umweltwirkungen und die Datenlage erlaubte keine tiefergehende Analyse.

Grundsätzlich stellen alle Fallstudien die Anwendung selbst in den Mittelpunkt – und zwar in Form einer speziell dafür gewählten Untersuchungseinheit (zum Beispiel „Eine Stunde Videokonferenz“). Durch diesen nutzenbasierten Bezugspunkt lässt sich der anteilige Herstellungsaufwand allokalieren. Die dafür notwendigen Annahmen (beispielsweise zu Nutzungsdauern und -profilen), die bei der Auslegung der Ergebnisse zwingend zu berücksichtigen sind, sind in den entsprechenden ausführlichen Versionen der Fallstudien im Anhang dokumentiert (vgl. Abraham *et al.*, 2023b, Abschnitt B).

Die Ergebnisse zeigen je nach Fallstudie bei den Haupttreibern des Ressourcenbedarfs und des Treibhausgaspotenzials ein diverses Bild. Bei einigen Anwendungsfällen entfällt der Großteil des Ressourcenaufwands auf die Herstellungsphase (beispielsweise in den Fallstudien Videokonferenz und 3D-Druck). Bei anderen Fallstudien geht der Ressourcenaufwand hauptsächlich auf die Nutzungsphase zurück (beispielsweise in den Fallstudien Smart-Home, Kryptowährung und E-Sport).

Die Nutzungsphase ist in allen Fallstudien vom Strombedarf des Anwendungsfalls und seiner Ressourcenintensität geprägt. Je nach Fallstudie ist dies auf den Strombedarf der Endgeräte bei den Anwendenden oder auf den Strombedarf der Datenübertragung (inklusive Rechenzentren) zurückzuführen. Maßgeblich für den Ressourcenbedarf in der Herstellungsphase wiederum sind die verwendeten Materialien und die damit assoziierten Beschaffungs- und Herstellungsprozesse in der Vorkette. Doch 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 (Manhart *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2019). Bei Rechenzentren hingegen leistet die Nutzungsphase beziehungsweise der Betrieb einen deutlich erhöhten Beitrag zum abiotischen Rohstoffbedarf (Köhn *et al.*, 2020). Diese Ergebnisse wurden, sofern verfügbar, mit Literaturinformationen verglichen. Die allgemeine Literaturrecherche zur Ressourcenintensität der Digitalisierung steht im Einklang mit dem Gesamteindruck der dargestellten Fallstudienresultate in diesem Forschungsvorhaben.

Bei der Analyse der Ressourcenintensität wurden verschiedene Indikatoren untersucht. Im Fokus steht der Rohstoffbedarf insgesamt (als Primärrohstoffeinsatz sowie ergänzt um die ungenutzte Materialentnahme als Gesamtprimärmaterialaufwand). Beim Blick auf die Aufteilung zwischen den Rohstoffgruppen zeigt sich, dass in allen Fallstudien Metallerze als Rohstoffinputs in der Herstellungsphase dominieren. Wird die Nutzungsphase zusätzlich oder allein betrachtet, herrschen – aufgrund der durch fossile Energien dominierten Strommische – fossile Energieträger vor. Unter den Massenrohstoffen ist in den meisten Fallstudien Ganggestein das am stärksten abgebaute Material. Ganggestein fällt als Nebenprodukt beim Erzabbau zwangsläufig mit an,

sodass hier im Vergleich zu z. B. Energieträgern große Mengen nicht verwundern. Andere Rohstoffe, die in den Fallstudien rein ihrer Masse nach zu den wichtigsten Materialien gehören, sind in unterschiedlicher Reihenfolge und Gewichtung: Stein- und Braunkohle, Kies, Schiefer, Sand und Rohöl.

Darüber hinaus wurden auch Rohstoffe betrachtet, die zwar bezogen auf ihre Masse nicht zu den Haupttreibern des Rohstoffaufwands in der Herstellungsphase zählen, die jedoch für die Digitalisierung besonders relevant sind. Einige besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe stachen in fast allen Fallstudien bei der Analyse heraus: Gallium, Tantal, Gold, Silber, Zinn, Nickel und teils Lithium sowie Scandium. Kritisch im Sinne der EU-Klassifikation sind davon alle außer Gold, Silber, Nickel und Zinn<sup>36</sup>. Letztere sind jedoch zur Herstellung verschiedenster IKT-Komponenten ebenfalls essenziell. In den Fallstudien zeigt sich generell, aber besonders beim Blick auf digitalisierungsrelevante Rohstoffe, dass sich die Haupttreiber je nach betrachtetem Produktsystem und Rohstoff unterscheiden. Oft sind es einzelne Geräte oder Komponenten des betrachteten Produktsystems, die einen erheblichen Teil des Bedarfs an digitalisierungsrelevanten Rohstoffen verursachen. Ein Beispiel dafür sind (*Gaming*-)Computer in der E-Sport-Fallstudie oder das Netzteil beim 3D-Drucker. Es zeigt sich aber auch, dass einzelne Rohstoffbedarfe fast ausschließlich auf bestimmte Endgeräte oder Komponenten zurückgehen. Ein Beispiel: der Lithiumbedarf zur Herstellung des Laptops in der Fallstudie zur Videokonferenz.

Alle Fallstudien analysieren sechs gleiche Indikatoren. Wie zu erwarten, korrelieren die Indikatoren zum kumulierten Energieaufwand und zum Treibhauspotenzial. Bemerkenswert ist jedoch, dass in allen Fallstudien alle Indikatoren bei der Aufteilung zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase eine ähnliche Tendenz aufweisen. Das heißt, in keinem der untersuchten Anwendungsfälle liegen die Treiber der Ressourcenintensität in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen. Das gilt auch dann, wenn sich beispielsweise die Anteile von Wasserfußabdruck oder Landnutzung um über 20 Prozentpunkte von denen der anderen Indikatoren unterscheiden. Dies verdeutlicht eine Korrelation vor allem zwischen den berechneten Rohstoffbedarfsindikatoren und dem Treibhauspotenzial beziehungsweise dem kumulierten Energieaufwand. Diese Korrelation ist, bis auf einzelne Szenarien in der Fallstudie zum Carsharing, in jeder untersuchten Fallstudie und in allen Szenarien erkennbar.

Die gewählte Methodik sowie die verwendeten Daten weisen verschiedene Unsicherheiten auf, die einerseits fallstudienpezifisch diskutiert wurden, andererseits aber auch allgemeine Schlüsse zulassen. Umso wesentlicher sind die Bereitstellung aktuellerer Daten und Datensätze, etwa für robuste Annahmen zur Energieintensität der Datenübertragung oder Herstellung von Übertragungsinfrastruktur. Allerdings kann zum Beispiel die Aktualität der Datensätze aus der LCA-Datenbank oftmals nicht mit der rasanten technischen Entwicklung von digitalen Endgeräten mithalten.

Die Fallstudien sollten abschließend auch beleuchten, ob die digitale Anwendung ein Umweltentlastungspotenzial mit sich bringt. In einigen Fallstudien lässt sich das bejahen (vgl. Videokonferenz). Bei anderen Fallstudien dient der betrachtete Anwendungsfall lediglich der Komfortsteigerung (vgl. Smart-Home in den meisten Szenarien) oder einem neuen Hobby (vgl. 3D-Druck als Heimanwendung). Hier hat die digitale Anwendung in Bezug auf den Ressourcenbedarf und die Umweltwirkungen vermutlich keine Vorteile oder sogar einen

---

<sup>36</sup> Der im März 2023 von der Europäischen Kommission eingebrachte Vorschlag für eine aktualisierte Liste kritischer Rohstoffe (Europäische Kommission, 2023f) konnte im Rahmen der Fallstudienerarbeitung und -analyse nicht mehr berücksichtigt werden. Es sei an dieser Stelle jedoch erwähnt, dass sich Nickel unter den Neuzugängen auf der aktualisierten Liste befindet.

erhöhten negativen Einfluss auf die Umwelt. In diesen Fällen ist eine nachhaltig, ressourcen- und umweltschonend gestaltete Digitalisierung besonders wichtig.

Weiterer Forschungsbedarf, der sich aus diesen Arbeiten ergibt, wird in Kapitel 8 skizziert. Folgende Ergebnisse könnten interessante Anknüpfungspunkte für die folgenden Arbeiten in diesem Forschungsvorhaben bieten:

- ▶ Die Nutzungsphase war in allen Fallstudien vom Strombedarf des Anwendungsfalls geprägt. Anknüpfend daran kann ergründet werden, wie sich in Zukunft ein geänderter Strombedarf digitaler Anwendungsfälle (beispielweise durch Effizienzsteigerungen) auf den Ressourcenbedarf der Digitalisierung auswirkt.
- ▶ Zwischen den berechneten Rohstoffbedarfsindikatoren und dem Treibhauspotenzial beziehungsweise dem kumulierten Energieaufwand kam eine Korrelation zum Ausdruck. Dieser Umstand kann in die Interpretation der Ergebnisse folgender Arbeitspakete einfließen.
- ▶ Erkenntnisse zu Umweltentlastungspotenzialen können in die Erarbeitung der Gestaltungsfelder hineinwirken.

**Tabelle 18** Übersicht über die Endergebnisse der betrachteten zehn Fallstudien

Themengebiet der Fallstudie	Anwendungsfall	Ergebnisse für ausgewählte Indikatoren im Vorhaben DigitalRessourcen		Überblick
1. Videokonferenz im Homeoffice	Teilnahme einer Person an einer einstündigen Gruppen-Videokonferenz im beruflichen Kontext	RMI: 116 g CED: 1,03 MJ WDP: 0,85 L	TMR: 134 g GWP: 70 g CO <sub>2</sub> -Äq. LOP: 0,0044 m <sup>2</sup> a	H > N ↑
2. Smart-Home-System	Fünfstufige Nutzung eines Energiemanagementsystems für Gebäude	RMI: 2.938,11 kg CED: 40.795 MJ WDP: 14,61 m <sup>3</sup>	TMR: 3.698,8 kg GWP: 2.321,8 kg CO <sub>2</sub> -Äq. LOP: 123,1 m <sup>2</sup> 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 <sup>3</sup>	TMR: 54,8 g GWP: 0,03 kg CO <sub>2</sub> -Äq. LOP: 0,0016 m <sup>2</sup> a	H > N ↑ (!) ↻
4. E-Grocery	Durchführung, Bereitstellung und Lieferung einer Online-Lebensmittelbestellung <sup>c</sup>	RMI: 5,6 – 17,2 kg CED: 82,5 – 286,3 MJ WDP: 0,02 – 0,08 m <sup>3</sup>	TMR: 7,4 – 22,9 kg GWP: 4,2 – 15,1 kg CO <sub>2</sub> -Äq. LOP: 1,6 – 3,5 m <sup>2</sup> a	↑ (!)
5. Carsharing	Fahrt im Carsharing Auto über einen Kilometer <sup>c</sup>	RMI: 291,4 – 436,4 g CED: 2,67 – 3,90 MJ WDP: 0,0006 – 0,0015 m <sup>3</sup>	TMR: 363,8 – 561,4 g GWP: 76,4 – 232,2 g CO <sub>2</sub> -Äq. LOP: 0,0062 – 0,0126 m <sup>2</sup> a	H > N (exemplarisches Szenario) ↑ ↻
6. Kryptowährung <sup>b</sup>	Betrieb des Bitcoin-Netzwerks über ein Jahr	RMI: 38,1 Mt CED: 641 PJ WDP: 0,16 km <sup>3</sup>	TMR: 44,8 Mt GWP: 33,7 Mt CO <sub>2</sub> -Äq. LOP: 618 km <sup>2</sup> a	↓ (!)
7. Consumer-to-Consumer-Plattform	Verkauf eines T-Shirts über eine C2C-Plattform inkl. Versand bzw. Abholung <sup>c</sup>	RMI: 0,46 – 3,91 g CED: 5,77 – 50,63 MJ WDP: 0,005 – 0,008 m <sup>3</sup>	TMR: 0,58 – 4,64 g GWP: 0,31 – 3,33 g CO <sub>2</sub> -Äq. LOP: 0,12 – 0,15 m <sup>2</sup> a	H > N (exemplarisches Szenario S1) ↑ (!) ↻
8. E-Sport	Eine Stunde Gaming und Streaming von League of Legends (LoL)	RMI: 3,07 kg CED: 45,0 MJ WDP: 0,02 m <sup>3</sup>	TMR: 3,92 kg GWP: 2,54 kg CO <sub>2</sub> -Äq. LOP: 0,13 m <sup>2</sup> a	H < N ↓ (!)
9. Privater 3D-Druck	77 Stunden Nutzung eines 3-D-Druckers für den Heimgebrauch	RMI: 353,74 kg CED: 2.224,6 MJ WDP: 1,06 m <sup>3</sup>	TMR: 437,98 kg GWP: 148,09 kg CO <sub>2</sub> -Äq. LOP: 9,08 m <sup>2</sup> 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 <sup>3</sup>	TMR: 77,1 g GWP: 53 g CO <sub>2</sub> -Äq. LOP: 0,0025 m <sup>2</sup> a	H < N ↓

## 5 Makroökonomische Berechnungen

### 5.1 Aufgabenstellung, Zielsetzung und Vorgehensweise

Die folgenden Kapitel (Kapitel 5 bis 6) analysieren die Rohstoffintensität des digitalen Wandels in Deutschland auf Makro- bzw. Mesoebene.

Die Aufgabenstellung laut Leistungsbeschreibung bestand aus zwei zentralen Punkten:

1. Die makroökonomischen Berechnungen sollten sich mit der Frage beschäftigen, wie der Einsatz natürlicher Ressourcen (hier: Rohstoffanspruchnahme) **gesamtwirtschaftlich (Makroebene)** quantifiziert werden kann und welche Datenbasis bzw. welches Datenmodell dafür verwendbar ist. Es sollten makroökonomische Berechnungen inklusive aller relevanten Vorketten (auch im Ausland) durchgeführt werden. Dazu sollten geeignete Modelle (z. B. Input-Output-Modelle, ökonometrische Modelle, systemdynamische Modelle etc.) sowie die Ergebnisse aus Kapitel 3 „System- und Betrachtungsgrenzen“ zum Einsatz kommen. Als Indikatoren waren die Rohstoffanspruchnahme (RMC, engl. *raw material consumption*) und deren Teilbereiche – nichtmetallische Mineralien, fossile Energieträger, Metallerze und Biomasse sowie Treibhausgasemissionen ( $t\ CO_{2\text{Äq}}$ ) – auszuweisen.
2. Aufbauend auf den Ergebnissen der makroökonomischen Berechnungen waren **mögliche zukünftige Entwicklungspfade (Szenarien)** des in diesem Vorhaben definierten „Systems Digitalisierung“ (Kapitel 2.4) quantitativ zu modellieren. Entsprechende Modellierungen bzw. Simulationen sollten unter Maßgabe einer ressourcenschonenden und ressourcenextensiven Entwicklung bis zum Jahr 2050 erarbeitet werden (wiederum RMC und Treibhausgasemissionen). Als mögliche „Stellschrauben“ nannte die Leistungsbeschreibung die folgenden beispielhaften Faktoren: Bedarfsentwicklung bestimmter Produkte/Technologien, Nachfrage-/Konsumentwicklungen, mögliche Effizienzsteigerungen in der Produktion und in der Betriebsphase, mögliche Recyclingpotenziale, allgemeine Wirtschaftsentwicklung, mögliche Kompensations- und Überkompensationseffekte (Rebound-Effekte), Änderungen im Energiemix etc.

Bei der Berechnung umweltrelevanter Auswirkungen von Produktion und Konsum auf Makro- und Mesoebene kommen grundsätzlich zwei unterschiedliche Vorgehensweisen in Frage: „*Bottom-up*“-Analysen beruhen auf Analysen von Gütern und Dienstleistungen, die für das zu analysierende Gesamtsystem relevant sind. Für sämtliche ausgewählten Güter und Dienstleistungen werden daraufhin die jeweiligen Umweltauswirkungen sehr detailliert erfasst. Auf Basis dieser individuellen Erfassung erfolgt anschließend eine Hochrechnung auf Makro- oder Mesoebene. „*Top-down*“-Ansätze verzichten auf die detaillierte Betrachtung einzelner Güter und Dienstleistungen. Stattdessen erfolgt eine Analyse ausschließlich auf Makro- oder Mesoebene. Dabei werden beispielsweise die volkswirtschaftlichen Lieferketten und Nachfragestrukturen der ausgewählten Produktionssektoren und der von diesen Produktionssektoren hergestellten Güter- und Dienstleistungsaggregate systematisch analysiert.

Die in diesem Vorhaben durchgeführten Lebenszyklusbetrachtungen (Sachbilanzen) sind typische Beispiele für „*Bottom-up*“-Analysen. Wie dem Kapitel 4 zu entnehmen ist, zeichnen sie sich durch einen sehr hohen Detailgrad aus. Da für entsprechende Lebenszyklusbetrachtungen ein großer Informationsumfang notwendig ist, konnten entsprechende Analysen allerdings nur für die ausgewählten Güter und Dienstleistungen bzw. digitalen Anwendungen der einzelnen Fallbeispiele durchgeführt werden.

Zur gesamtwirtschaftlichen Bewertung der umweltökonomischen Auswirkungen des digitalen Wandels wurden daher ergänzend makroökonomische Berechnungen und Simulationen als



eigenständige „*Top-down*“-Analysen durchgeführt. Die folgenden Kapitel 5 bis 6 dokumentieren diese makroökonomischen Forschungs- und Entwicklungsleistungen.

Kapitel 5.2 beginnt mit einer einführenden Vorstellung der methodischen und empirischen Grundlagen, die zum Verständnis der angewandten Bewertungsmethodik notwendig sind. Die in diesem Vorhaben entwickelten Input-Output-Modellierungen ermöglichen eine detaillierte Bewertung der Produktionstätigkeiten, die durch die deutsche Nachfrage nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen global ausgelöst werden, und der damit einhergehenden Rohstoffinanspruchnahmen und CO<sub>2</sub>-Emissionen. Die multinationalen Produktionsketten von final in Deutschland nachgefragten Produkten und Dienstleistungen und von Zwischenprodukten und Dienstleistungen, die für deren Herstellung nötig sind, werden in den folgenden Bewertungen jeweils vollständig ökonomisch erfasst. Detaillierte Produkt- und Dienstleistungsgruppen sowie globale volkswirtschaftliche Verflechtungen zwischen unterschiedlichen Nachfragekomponenten und Produktionssektoren werden mithilfe der umfangreichen makroökonomischen Detailinformationen der globalen multiregionalen Input-Output(GMRIO)-Datenbank GLORIA (Lenzen *et al.*, 2017; 2022). Die Datenbank GLORIA wurde im Auftrag des *International Resource Panel* (IRP) der Vereinten Nationen zur Berechnung von Materialfußabdrücken (Wiedmann *et al.*, 2013) und zum Ausweis dieser Berechnungsergebnisse in der IRP *Material Flows Database* an der Universität Sydney in Australien erstellt. Dieser Datensatz wurde erst während der Bearbeitungszeit des Vorhabens „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“ veröffentlicht.<sup>37</sup> Die im vorliegenden Bericht dokumentierten eigenen makroökonomischen Berechnungen stellen daher eine der ersten Anwendungen dieses Datensatzes außerhalb des unmittelbaren IRP-Kontextes dar. Zuvor wurden umweltökonomische Bewertungen mit GMRIO-Bewertungsansätzen zumeist unter Rückgriff auf die Datenbank EXIOBASE (Stadler *et al.*, 2018; Wood *et al.*, 2015) vorgenommen (siehe beispielsweise Prakash *et al.* (2022), Pfaff und Walz (2020), Wiebe *et al.* (2019) oder Wiebe *et al.* (2018)). Während der Arbeit am Vorhaben „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“ wurden eigene Evaluationen grundlegender makroökonomischer Berichtsgrößen vorgenommen. Diese verdeutlichen, dass die Datenqualität der Datenbank GLORIA im Vergleich zu EXIOBASE verlässlicher ist. Daher wurde in diesem Vorhaben mit GLORIA gearbeitet.

Die Klassifikation wissenschaftlich etablierter GMRIO-Datenbanken basiert auf international harmonisierten Berichterstattungssystemen zur statistischen Erfassung volkswirtschaftlicher Aktivitäten. Diese Berichterstattungssysteme, auf die auch die Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) des Statistischen Bundesamtes abgestimmt sind, bieten keine expliziten Informationen zur Entwicklung „des Digitalisierungssektors“. Daher mussten für die makroökonomischen Berechnungen des gegenständigen Vorhabens unter Beachtung der Ergebnisse aus Arbeitspaket 2 zunächst konzeptionelle Betrachtungsgrenzen festgelegt werden. Dann ließen sich auf Basis der Originalbeobachtungen von GLORIA diejenigen wirtschaftlichen Entwicklungen abschätzen, die der Digitalisierung in Deutschland zuzurechnen sind. Im Rahmen dieses Vorhabens wurde entschieden, „Digitalisierung in Deutschland“ in den makroökonomischen Berechnungen und Simulationen als inländische Verwendung von Gütern und Dienstleistungen der Informations- und Kommunikationstechnik (IKT) zu erfassen. Hierzu zählen sowohl die Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen zur Herstellung sämtlicher Güter und Dienstleistungen im Inland wie auch die Endnachfrage nach den im Inland hergestellten Gütern und Dienstleistungen. Weitergehende Details der Vorgehensweise zur Operationalisierung dieses Bewertungsansatzes finden sich in einem eigenen Unterkapitel von Kapitel 5.2.

---

<sup>37</sup> Die technische Dokumentation dieses Datensatzes wurde im Jahr 2021 veröffentlicht.

Im Rahmen der zuvor beschriebenen Bewertungsgrenzen, Datensätze und Methoden dokumentiert Kapitel 5.3 die Entwicklung der Digitalisierung in Deutschland für den Zeitraum 2000 bis 2020. Die Ergebnisdarstellung beginnt mit einer Vorstellung der ökonomischen Berechnungen, Kapitel 5.4 beschreibt anschließend anhand der Material- und CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke die umweltrelevanten Auswirkungen dieser ökonomischen Entwicklungen. Zentrale Berichtsgrößen zur Bemessung von Umweltintensitäten der Digitalisierung in Deutschland sind dabei die Indikatoren **RMC** und **RMI** sowie der **CO<sub>2</sub>-Fußabdruck**.

Kapitel 6 betrachtet die zukünftigen **Entwicklungspfade** des „Systems Digitalisierung“ in Deutschland unter Berücksichtigung entsprechender multinationaler Umfeldentwicklungen. Ein Unterkapitel dieses Kapitels zeigt, wie der in diesem Vorhaben entwickelte Bewertungsansatz die künftigen Rohstoffansprünahmen und Treibhausgasemissionen im Zuge der Digitalisierung in Deutschland erfolgreich simulieren kann.

Das **Trendszenario** dient als Grundlage und Ausgangspunkt für verschiedene Simulationen. In Kapitel 6.1.1 erfolgt zunächst eine Einordnung des Modells GRAMOD (engl. *Global Resource Accounting MODeL*). Die Modelleigenschaften werden unter Bezugnahme auf die früheren GWS-Modellentwicklungen GRAM (engl. *Global Resource Accounting MODeL*) und GINFORS (*Global Interindustry Forecasting System*) erläutert. Außerdem werden die Differenzen von GRAMOD und GINFORS herausgearbeitet. In Kapitel 6.1.2 erfolgt eine Parametrisierung der Trendprojektion. Unterkapitel 6.1.2.1 beschäftigt sich hierfür zunächst mit dem gesamtwirtschaftlichen Umfeld. Es stellt das Wachstum des preisbereinigten BIP in der Trendprojektion dar, erläutert die Endnachfrage-Komponenten in GRAMOD und erklärt die Veränderung von Konsummustern in GRAMOD. Unterkapitel 6.1.2.2 betrachtet das energie- und klimapolitische Umfeld. Themenfelder sind die Substitution von fossilen Energieträgern durch EE in der Stromerzeugung, die Energieintensität in der Produktion (außer Stromerzeugung) sowie die Dekarbonisierung der Produktion (außer Stromerzeugung). Das Unterkapitel 6.1.2.3 fasst die im Kontext der Digitalisierung in der Parametrisierung der Trendprojektion berücksichtigten Annahmen zusammen. Es werden jeweils Ausgaben für IKT-Güter und -Dienstleistungen spezifiziert. Kapitel 6.2 sowie 6.3 bilden die **Ergebnisse der Trendprojektionen und Simulationen** ab.<sup>38</sup>

## 5.2 Hintergrund: Quantitative Analysen von Rohstoff- und Emissionsintensitäten auf Makro-/Mesoebene

### 5.2.1 Methodische Grundlagen

#### 5.2.1.1 Grundsätzlich anwendbare Methoden

Wie bereits einleitend dargestellt, lassen sich die umweltrelevanten Auswirkungen von Produktion und Konsum auf Makro- und Mesoebene grundsätzlich nach zwei unterschiedlichen Vorgehensweisen berechnen:

**„Bottom-up“-Analysen** beruhen auf Analysen von Gütern und Dienstleistungen, die für das zu analysierende Gesamtsystem relevant sind. Für sämtliche ausgewählten Güter und Dienstleistungen werden die jeweiligen Umweltauswirkungen sehr detailliert erfasst. Auf Basis dieser individuellen Erfassung werden anschließend die vollständigen Effekte auf Makro- oder Mesoebene abgeschätzt.

---

<sup>38</sup> Ergänzende Angaben finden sich im Anhang, Abschnitte C bis F, der als eigenes Dokument veröffentlicht wurde; siehe: Abraham *et al.* (2023b).

„**Top-down**“-Ansätze verzichten auf die detaillierte Betrachtung einzelner Güter und Dienstleistungen. Stattdessen erfolgt eine Analyse ausschließlich auf Makro- oder Mesoebene. Dabei werden beispielsweise die volkswirtschaftlichen Lieferketten und Nachfragestrukturen der ausgewählten Produktionssektoren und der von diesen Produktionssektoren hergestellten Güter- und Dienstleistungsaggregate systematisch analysiert.

Die in den Fallstudien dieses Vorhabens durchgeführten Lebenszyklusbetrachtungen sind typische Beispiele für „**Bottom-up**“-Analysen. Da für entsprechende Lebenszyklusbetrachtungen ein großer Informationsumfang notwendig ist, konnten entsprechende Analysen allerdings nur für die ausgewählten Güter und Dienstleistungen bzw. digitalen Anwendungen der einzelnen Fallbeispiele durchgeführt werden. Zur gesamtwirtschaftlichen Bewertung der umweltökonomischen Auswirkungen des digitalen Wandels wurden daher ergänzend eigenständige „**Top-down**“-Analysen vorgenommen. Die dabei angewandte Methodik zur Berechnung globaler Fußabdrücke des digitalen Wandels in Deutschland wird in den folgenden Unterkapiteln kurz vorgestellt.

Die Darstellungen zielen darauf ab, den im Rahmen des gegenständigen Vorhabens entwickelten Ansatz zur Analyse einer ausgewählten global geschlossenen multiregionalen Input-Output (MRIO)-Datenbank vorzustellen. Für weitergehende Referenzen zu früheren Anwendungen von MRIO-Datenbanken in umweltökonomischen Fußabdruck-Analysen (sowie zu alternativen Berechnungsansätzen zur Bestimmung von Fußabdruck-Indikatoren) verweisen wir ergänzend auf das eigenständige Forschungspapier von Meyer *et al.* (2021).

### 5.2.1.2 Das Grundkonzept Input-Output-basierter Zuordnungen multinationaler Lieferverflechtungen zu heimischen Nachfrageentwicklungen

Input-Output-Tabellen sind integraler Bestandteil der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) und werden auf Grundlage international harmonisierter Standards und Klassifikationen durch nationale statistische Ämter publiziert. Sie zeigen die monetären Verflechtungen innerhalb einer Volkswirtschaft.

Abbildung 64 zeigt das Grundschemata einer I-O-Tabelle. Der erste Quadrant dokumentiert die intermediäre Verwendung ( $Z$ ) der unterschiedenen  $n$  Produktgruppen (= Zeilen der Matrix) in der Produktion der unterschiedenen  $n$  Produktionsbereiche (= Spalten der Matrix). Im zweiten Quadranten findet sich die letzte Verwendung ( $y$ ), differenziert nach den  $n$  Produktgruppen. Der dritte Quadrant erfasst die Produktionswerte ( $x$ ) der  $n$  Produktionsbereiche.

**Abbildung 64: Schema einer Input-Output-Tabelle (I-O-Tabelle)**

$$\begin{array}{c}
 \begin{bmatrix}
 Z_{11} & Z_{12} & \dots & \dots & Z_{1n} \\
 Z_{21} & Z_{22} & \dots & \dots & Z_{2n} \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 \vdots & \vdots & \ddots & \ddots & \vdots \\
 Z_{n1} & Z_{n2} & \dots & \dots & Z_{nn}
 \end{bmatrix}
 \begin{bmatrix}
 y_1 \\
 y_2 \\
 \vdots \\
 \vdots \\
 y_n
 \end{bmatrix} \\
 \\
 [ x_1 \quad x_2 \quad \dots \quad \dots \quad x_n ]
 \end{array}$$

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Der Standardansatz, der die mit einer bestimmten Endnachfrage verbundene Produktion ermittelt und dabei alle Vorketten berücksichtigt, geht auf Wassily Leontief zurück (Leontief, 1966). Bei diesem Ansatz wird zunächst die Matrix der Inputkoeffizienten  $A$  berechnet:

$$(1) \quad A_{ij} = Z_{ij} / x_j$$

Inputkoeffizienten geben an, wie viele Einheiten von Produkt  $i$  direkt für die Produktion einer Einheit von Produkt  $j$  benötigt werden. Mit  $I$  wird in nachstehender Formel die Einheitsmatrix bezeichnet. Diese Matrix weist auf der Hauptdiagonalen ( $i = j$ ) den Wert 1 auf, während die übrigen Elemente den Wert 0 annehmen. Bildet man die Inverse aus der Differenz von  $I$  und  $A$ , so erhält man die Leontief-Inverse  $L$ .

$$(2) \quad L = (I - A)^{-1}$$

Wie von Leontief nachgewiesen wurde, zeigen die einzelnen Koeffizienten  $L_{i,j}$  dieser Matrix nun die Einheiten von Produkt  $i$ , die unter Berücksichtigung aller direkten und indirekten Vorketten für die Produktion einer Einheit von Produkt  $j$  benötigt werden. Wird diese Leontief-Inverse mit der Endnachfrage  $y$  multipliziert, lässt sich die gesamte Produktion (Vorleistungen, welche im Produktionsprozess verbraucht werden, sowie final erzeugte Güter und Dienstleistungen) bestimmen, die zur Bereitstellung der final nachgefragten Güter und Dienstleistungen notwendig ist:

$$(3) \quad x = L * y .$$

Derart konzipierte gesamtwirtschaftliche Input-Output-Berechnungen ermöglichen vollständige und auf Mesoebene sehr detaillierte Analysen der Herstellungsphase von individuellen Produkt- und Dienstleistungsgruppen. Die bisherigen Ausführungen haben davon abstrahiert, dass in offenen Volkswirtschaften nach I-O-Tabellen für die inländische Produktion, für Importe sowie für inländische Produktion und Importe unterschieden wird. Bezeichnen wir aus diesem erweiterten Datenangebot die gesamte Endnachfrage nach inländischen Gütern mit  $y_d$ , die Matrix der Inputkoeffizienten der Inlandsmatrix mit  $A_D$  und die Leontief-Inverse hierzu mit  $L_D$ , so ergibt die Multiplikation von  $L_D$  und  $y_d$  die gesamte inländische Produktion  $x_d$ .

Die Koeffizienten der Leontief-Inversen der Inlandsmatrix berücksichtigen aber nur die Vorketten aus dem Inland. Damit gehen zwei wesentliche Aspekte für die Analyse der globalen Implikationen von lokalem Handeln verloren: auf der einen Seite die globalen Implikationen von inländischer Endnachfrage nach importierten Gütern und auf der anderen Seite die globalen Implikationen von importierten Vorleistungen und deren Vorketten in der heimischen Produktion.

Dass es sich hierbei in der heutigen globalisierten Welt keineswegs um randständige Aspekte handelt, sei anhand folgender Relationen für die deutsche Volkswirtschaft verdeutlicht (Zahlen auf Basis der I-O-Tabelle für das Jahr 2018 (Statistisches Bundesamt, 2022c)):

Von der gesamten letzten inländischen Verwendung von Erzeugnissen des verarbeitenden Gewerbes (641,2 Milliarden Euro) entfielen 44,4 % (284,6 Milliarden Euro) auf importierte Erzeugnisse. Bei der intermediären Verwendung dieser Erzeugnisse (1104,4 Milliarden Euro) betrug der Importanteil 36,8 % (406,7 Milliarden Euro).

Betrachtet man nur die Gütergruppe Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse (Abteilung 26 der amtlichen statistischen Güterklassifikation CPA), so zeigen sich nochmals deutlich höhere Importanteile: 92,0 % bei der letzten inländischen Verwendung und 71,3 % bei der intermediären Verwendung.

In der (umwelt-)ökonomischen Forschung haben sich bei der I-O-basierten Analyse von globalen, produktionsseitigen Implikationen heimischer Konsumententwicklungen zwei Grundansätze etabliert:

- I. Die Unterstellung der Gültigkeit nationaler Strukturen für ausländische Systemzusammenhänge (*domestic technology assumption*, DTA)
- II. Die Durchführung von I-O-Analysen unter Anwendung einer globalen multiregionalen Input-Output (MRIO)-Datenbasis

Ansatz I lässt sich in Analogie zu den Ausführungen weiter oben wie folgt formal darstellen: Die gesamte Endnachfrage nach Gütern aus in- und ausländischer Produktion sei mit  $y_t$  bezeichnet. Die Inputkoeffizienten der I-O-Tabelle für inländische Produktion und Importe ( $A_T$ ) berechnen sich wiederum durch Division der entsprechenden I-O-Werte ( $Z_T$ ) und der Produktion ( $x$ ). Anschließend wird die Matrix der inversen Leontief-Koeffizienten ( $L_T$ ) bestimmt. Die Multiplikation von  $L_T$  und  $y_t$  ergibt dann den Vektor der globalen Produktion für die gesamte inländische Endnachfrage ( $x_g$ ) unter der Annahme global einheitlicher Produktionsstrukturen (wie im Inland):

$$(4) \quad x_g = L_T * y_t$$

Der so bestimmte Vektor  $x_g$  berücksichtigt dann keine Informationen zu geografisch unterschiedlichen Produktionsweisen. Dies ist insbesondere von Relevanz, wenn auf Grundlage dieses Vektors auf die damit verbundene Umweltinanspruchnahme geschlossen werden soll.

Zur Erläuterung von Ansatz II verweisen wir auf Abbildung 65. Diese Abbildung stellt die Grundstrukturen einer MRIO-Tabelle vor. Dabei wird aus didaktischen Gründen vereinfachend angenommen, dass lediglich drei Länder/Weltregionen  $R_a$ ,  $R_b$  und  $R_c$  analysiert werden. In den mit  $R_a$  überschriebenen Spalten sind die Inputstrukturen der Produktionsbereiche in Land/Region  $R_a$  (ZA) zusammengefasst. Dabei wird zeilenweise unterschieden, woher die intermediären Inputs stammen (Index a bis c): Handelt es sich um Inputs aus dem Inland (in Abbildung 65 jeweils grau hinterlegt), so finden sich die Angaben in den mit  $R_a$  titulierten Zeilen. Handelt es sich um Inputs aus Land/Region  $R_b$ , so finden sich die Angaben im zweiten Block von oben usw.

In den mit  $R_b$  überschriebenen Spalten finden sich nach demselben Schema die Inputstrukturen der Produktionsbereiche in Land/Region  $R_b$  (ZB) dokumentiert und in den  $R_c$ -Spalten diejenigen von Land/Region  $R_c$  (ZC).

**Abbildung 65: Schema einer MRIO-Tabelle**

	$R_a$	$R_b$	$R_c$	$R_a$	$R_b$	$R_c$
$R_a$	$\begin{bmatrix} ZA_{a11} & \cdots & ZA_{a1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ZA_{an1} & \cdots & ZA_{ann} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ZB_{a11} & \cdots & ZB_{a1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ZB_{an1} & \cdots & ZB_{ann} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ZC_{a11} & \cdots & ZC_{a1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ZC_{an1} & \cdots & ZC_{ann} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ya_{a1} \\ \vdots \\ ya_{an} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} yb_{a1} \\ \vdots \\ yb_{an} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} yc_{a1} \\ \vdots \\ yc_{an} \end{bmatrix}$
$R_b$	$\begin{bmatrix} ZA_{b11} & \cdots & ZA_{b1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ZA_{bn1} & \cdots & ZA_{bnn} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ZB_{b11} & \cdots & ZB_{b1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ZB_{bn1} & \cdots & ZB_{bnn} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ZC_{b11} & \cdots & ZC_{b1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ZC_{bn1} & \cdots & ZC_{bnn} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ya_{b1} \\ \vdots \\ ya_{bn} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} yb_{b1} \\ \vdots \\ yb_{bn} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} yc_{b1} \\ \vdots \\ yc_{bn} \end{bmatrix}$
$R_c$	$\begin{bmatrix} ZA_{c11} & \cdots & ZA_{c1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ZA_{cn1} & \cdots & ZA_{cnn} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ZB_{c11} & \cdots & ZB_{c1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ZB_{cn1} & \cdots & ZB_{cnn} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ZC_{c11} & \cdots & ZC_{c1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ ZC_{cn1} & \cdots & ZC_{cnn} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} ya_{c1} \\ \vdots \\ ya_{cn} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} yb_{c1} \\ \vdots \\ yb_{cn} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} yc_{c1} \\ \vdots \\ yc_{cn} \end{bmatrix}$
	$[ xa_1 \quad \cdots \quad xa_n ]$	$[ xb_1 \quad \cdots \quad xb_n ]$	$[ xc_1 \quad \cdots \quad xc_n ]$			

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die gleiche Struktur wird auch für die Erfassung der Ausgaben für die letzte Verwendung (Spalten ya bis yc) angewandt. Auch hier wird zeilenweise differenziert nach Herkunft der verwendeten Güter. Zu beachten ist, dass bei dieser Darstellung in den y-Spalten ausschließlich die letzte inländische Verwendung – also der Konsum der privaten Haushalte, der privaten Organisationen ohne Erwerbszweck und des Staates sowie die Investitionen (Anlageinvestitionen, Vorratsveränderungen und Nettozugang an Wertsachen) – explizit abgebildet wird. Die Exporte eines Landes / einer Region werden hingegen durch die entsprechenden Einträge in den Spalten der anderen Länder/Regionen (= importierte Vorleistungen bzw. importierte Endnachfragegüter) erfasst. Im dritten Quadranten der MRIO finden sich schließlich die Produktionswerte (xa bis xc), differenziert nach Wirtschaftsbereichen und Ländern/Regionen.

Auf Grundlage einer solchen MRIO-Tabelle lässt sich ermitteln, welche globale Produktion (mx) mit einer inländischen Endnachfrage (y) verbunden ist. Hierfür wird zunächst wiederum die Matrix der Inputkoeffizienten berechnet. Dabei bezeichnet MA die Matrix der multiregionalen Inputkoeffizienten, MZ die Matrix der multiregionalen intermediären Verwendung (im Schema der Abbildung der gesamte Bereich von ZA<sub>a11</sub> bis ZC<sub>cn1</sub>)<sup>39</sup> und mx den Vektor der multiregionalen Produktionswerte (im Schema der Abbildung alle Elemente von xa<sub>1</sub> bis xc<sub>n</sub>):<sup>40</sup>

$$(5) \quad MA_{ij} = MZ_{ij}/mx_j .$$

Auch für diese Matrix lässt sich die Leontief-Inverse (ML) berechnen, die nun nicht mehr nur Auskunft über alle direkt und indirekt eingesetzten Güter gibt, sondern auch die Herkunft der intermediären Inputs lokalisiert:

$$(6) \quad ML = (I - MA)^{-1} .$$

Multipliziert man nun in einem letzten Schritt diese Matrix mit der inländischen Endnachfrage eines Landes (my), die nach Herkunft der Güter differenziert ist, so erhält man die globale Produktion (mx), die mit dieser Endnachfrage verbunden ist.

$$(7) \quad mx = ML * my .$$

Im Unterschied zu Gleichung 4 gibt dieser Vektor auch Auskunft darüber, in welchem Land / in welcher Region die jeweilige Produktion stattfindet. Zudem wird in Gleichung 7 auf allen Ebenen der globalen Vorleistungsketten auf die Produktionsgegebenheiten des jeweiligen Landes / der jeweiligen Region Bezug genommen.

Unabhängig davon, ob die Gültigkeit der *Domestic Technology Assumption* unterstellt wird oder aber eine vollständige MRIO-Analyse zur Zuordnung von Produktionsaktivitäten für heimische Konsumententwicklungen vorgenommen wird, können den jeweiligen Produktionsniveaus dann unterschiedliche Umweltauswirkungen zugeordnet werden. Hierzu werden die berechneten Produktionsniveaus mit umweltrelevanten Intensitäten (beispielsweise der Menge benötigter Primärrohstoffe) für die Herstellung einer Outputeinheit der jeweiligen Produktionssektoren multipliziert. Wiedmann und Barrett (2013) enthalten ein früheres Beispiel einer Analyse zur Bewertung der Materialinanspruchnahmen und Treibhausgasemissionen heimischer Nachfrageentwicklungen im Vereinigten Königreich, die globale multiregionale Input-Output-Datenstrukturen verwendet.

<sup>39</sup> In den Zeilen differenziert nach n\*r Elementen (n ~ Gütergruppen; r ~ Regionen/Länder) und in den Spalten ebenfalls differenziert nach n\*r Elementen (n ~ Produktionsbereiche; r ~ Regionen/Länder).

<sup>40</sup> Differenziert nach n\*r Elementen (n ~ Produktionsbereiche; r ~ Regionen/Länder).

## 5.2.2 Empirische Grundlagen

### 5.2.2.1 Für makroökonomische Berechnungen etablierte globale MRIO-Datenbanken

Ein Überblick über die Datenbanken, die in der wissenschaftlichen Literatur etabliert und zu Beginn der konzeptionellen Vorarbeiten für die makroökonomischen Berechnungen eines MRIO-basierten Fußabdruck-Bewertungsansatzes verfügbar waren, findet sich in Tukker *et al.* (2020). Dieser Beitrag kann (ebenso wie Tukker *et al.* (2018)) als richtungsweisend für die Konzeption des eigenen Bewertungsansatzes angesehen werden: Er hebt die zentrale Bedeutung der OECD Inter-Country Input-Output (ICIO)<sup>41</sup> hervor – als zum damaligen Zeitpunkt einzige durch eine internationale Organisation autorisierte globale MRIO-Datenbank. Die ICIO wurde hauptsächlich für Analysen von Handelsströmen entwickelt. Sie gilt in der wissenschaftlichen Literatur hinsichtlich ihrer Akzeptanz durch nationale Institutionen (z. B. nationale statistische Ämter) inzwischen als „die maßgebliche“ derzeit verfügbare MRIO-Datenbank (Tukker *et al.*, 2018).

Diese Datenbank wurde mithilfe von CO<sub>2</sub>-Emissionsdaten der Internationalen Energieagentur (IEA) auch bereits für CO<sub>2</sub>-Fußabdruck-Berechnungen genutzt (Yamano & Guilhoto, 2020). Gleichzeitig veröffentlicht die OECD lediglich monetäre Strukturinformationen in regelmäßigen Intervallen. Wenn also OECD-ICIO-Daten für umweltökonomische Bewertungen herangezogen werden, müssen die jeweiligen Entwicklerteams daher in der Regel ergänzende Intensitätsfaktoren (beispielsweise Rohstoffextraktionen extrahierender Wirtschaftssektoren in Relation zu den monetären Outputs dieser Sektoren) einbeziehen, um physische Informationen zu berücksichtigen. Sie müssen diese in einer auf die OECD-ICIO-Daten abgestimmten geografischen und sektoralen Auflösung erfassen und damit kombinieren. Zu Beginn des Vorhabens waren die vier MRIO-Datenbanken **WIOD**, **Eora**, **Global Trade Analysis Project (GTAP)** und **EXIOBASE** in der wissenschaftlichen Literatur als potenzielle Quellen für physische Informationen etabliert, die zur Berechnung entsprechender Intensitätsfaktoren nötig sind. Allerdings wird keine dieser Datenbanken für die Berichterstattung supranationaler Institutionen verwendet.<sup>42</sup>

Zur Herleitung der in diesem Vorhaben benötigten Intensitätsfaktoren wurde bis zum Frühjahr 2022 auf eine Nutzung der Datenbank EXIOBASE hingearbeitet. Diese Entscheidung beruhte auf der Beobachtung, dass sich EXIOBASE unter den vier wissenschaftlich etablierten MRIO-Datenbanken durch einen konsistent hohen Detailgrad bei der sektoralen Untergliederung von Produktionsaktivitäten auszeichnet. Insbesondere für Analysen des ökologischen Fußabdrucks ist entscheidend, dass die am Anfang der Wertschöpfungsketten angesiedelten Sektoren möglichst detailliert abgebildet werden. Umweltintensive Sektoren wie Landwirtschaft, Bergbau und Energieerzeugung haben in EXIOBASE – im Vergleich zu den übrigen oben genannten MRIO-Datenbanken – einen hohen Detailgrad.<sup>43</sup> In der jüngeren Vergangenheit kam EXIOBASE daher häufig für makroökonomische Fußabdruck-Berechnungen und Szenarioanalysen zum Einsatz. Beispiele sind Tukker *et al.* (2014) für eine frühe multinationale Anwendung von EXIOBASE zur Berechnung globaler Ressourcen-Fußabdrücke (Pfaff & Walz, 2020) für eine EXIOBASE-basierte Analyse des deutschen Rohstoffindikators RMC von 2000 bis 2020, Ostertag *et al.* (2021a), Lutter *et al.* (2016) sowie Lutter *et al.* (2018) für EXIOBASE-basierte Abschätzungen sektoraler

<sup>41</sup> OECD (2021): OECD Inter-Country Input-Output Database, <http://oe.cd/icio> (Stand: 19.09.2023).

<sup>42</sup> Anmerkungen und weiterführende Referenzen zu diesen Datenbanken können ebenfalls Tukker *et al.* (2018) entnommen werden. Die methodische Vorgehensweise zur Verwendung entsprechender Intensitätsfaktoren in umweltökonomischen MRIO-Anwendungen wird zudem, gemeinsam mit einem Überblick zu jüngeren Anwendungen und Entwicklungen der wissenschaftlichen Datenbanken WIOD, Eora, Global Trade Analysis Project (GTAP) und EXIOBASE, in Meyer *et al.* (2021) vorgestellt.

<sup>43</sup> Siehe Wood *et al.* (2015) sowie Stadler *et al.* (2018) für weiterführende Darstellungen der entsprechenden Berichtsdetails.

Rohstoffinanspruchnahmen für Deutschland oder Wiebe *et al.* (2019) für EXIOBASE-basierte Szenarioanalysen.

Die konzeptionellen Vorarbeiten dieser Projektphase, die auf die Nutzung von EXIOBASE abzielten, wurden bereits im Kapitel 3.5 „Identifikation und Diskussion von methodischen Betrachtungsgrenzen“ zusammenfassend dokumentiert. Die Grundlagen, die dort in den Unterkapiteln „Input-Output-Modelle“ sowie „Abgrenzung des ‚Systems Digitalisierung‘ aus Input-Output-Perspektive“ ausgearbeitet wurden, waren richtungsweisend für die Entwicklung des makroökonomischen Modells GRAMOD in diesem Vorhaben. Doch im Frühjahr 2022 wurde die MRIO-Datenbank GLORIA („*Global Resource Input-Output Assessment*“) veröffentlicht. In Absprache mit der fachlichen Begleitung am Umweltbundesamt fiel dann der Beschluss, ausschließlich die Datenbank GLORIA als MRIO-Datenquelle zur Parametrisierung des Modells GRAMOD zu verwenden. Diese Entscheidung, in den eigenen „Top-down“-Analysen die Datenbank GLORIA anzuwenden, geht darauf zurück, dass diese als erste wissenschaftlich entwickelte MRIO-Datenbank von einer supranationalen Institution als offizielle statistische Referenz genutzt wird: im Rahmen des Umweltprogramms der Vereinten Nationen (UNEP) als offizielle Referenz zur international harmonisierten Beurteilung von gesamtwirtschaftlichen Nachhaltigkeitsentwicklungen.

### **5.2.2.2 Empirische Datenbasis der eigenen Analysen: GLORIA Release 055**

#### **5.2.2.2.1 Überblick des Berichtsumfangs der Datenbank GLORIA**

Die Datenbank GLORIA basiert auf Datenverarbeitungs- und Berechnungsroutinen, die ursprünglich bei Erstellung der Datenbank Eora entwickelt wurden (Global MRIO Lab; Lenzen *et al.*, 2017). Im Gegensatz zu Eora zeichnet sich GLORIA bei der sektoralen Abbildung von Produktionsaktivitäten durch einen Detailgrad aus, der für sämtliche abgebildeten Länder und Weltregionen gleichbleibend hoch ist. Im Vergleich zur MRIO-Datenbank EXIOBASE, die ursprünglich für die umweltökonomischen Bewertungen dieses Vorhabens vorgesehen war, zeigt GLORIA wesentlich mehr Details bei regionalen Entwicklungen (Berücksichtigung von 160 Ländern in GLORIA gegenüber 44 in EXIOBASE).<sup>44</sup> Der Berichtsumfang der GLORIA Datenbank mit Berichtsstand „055 März 2022“, welche vom Forschungsteam der GWS für sämtliche „Top-down“-Analysen dieses Vorhabens genutzt wurde, ist in folgender Tabelle 19 zusammengefasst.

---

<sup>44</sup> Siehe Stadler *et al.* (2018) für eine detaillierte Beschreibung entsprechender Berichtsdetails der Datenbank EXIOBASE.



**Tabelle 19: Datenabdeckung der im Vorhaben verwendeten MRIO-Datenbank GLORIA**

Berichtsdimension	Berichtsumfang
Räumlich	160 Länder und 4 <i>Rest-of-World</i> -Regionen
Zeitlich	1990–2020
Sektoral	120 Wirtschaftsbereiche, darunter 20 Teilbereiche der Landwirtschaft Forstwirtschaft 2 Teilbereiche der Fischerei und Aquakultur 4 Teilbereiche des Bergbaus für fossile Energieträger 9 Teilbereiche des Erzbergbaus 4 Teilbereiche des Bergbaus für nicht metallische Mineralien 15 Teilbereiche der Herstellung von Lebensmitteln und Getränken 5 Teilbereiche der Herstellung von chemischen Erzeugnissen 4 Teilbereiche der Herstellung von Glaswaren und Keramik sowie der Verarbeitung von Steinen und Erden 8 Teilbereiche der Metallerzeugung und -bearbeitung
Umweltfaktoren	darunter 35 Emissionen (Dimension: Kilotonnen) u. a. CO <sub>2</sub> , CH <sub>4</sub> , N <sub>2</sub> O, SF <sub>6</sub> 62 Materialkategorien (Dimension: Tonnen) 10 Arten von fossilen Energieträgern 15 Arten von Erzen 14 Arten von nichtmetallischen Mineralien 23 Arten von Biomasse 6 Kategorien der Landnutzung (Dimension: 1000 ha) 6 Kategorien des Energieverbrauchs (Dimension: TJ) 6 Kategorien von Biodiversitätsverlusten (Dimension: <i>Potentially disappeared fraction</i> ) 4 Kategorien von Blauwasserverbrauch und Wasserstress (Dimension: Mio. m <sup>3</sup> )

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

EXIOBASE und GLORIA haben einen sehr ähnlichen Detailgrad bei den für die Fußabdruck-Bewertungen maßgeblichen Sektoren in den jeweiligen Weltregionen (Berücksichtigung von 120 Sektoren mit sehr detaillierter Abbildung primärer Sektoren in GLORIA; 163 Sektoren mit vergleichbar detaillierter Abbildung primärer Sektoren in EXIOBASE). Allerdings zeigen eigene Analysen, die im Rahmen dieses Vorhabens ergänzend durchgeführt wurden, dass die in GLORIA berichteten Werte wesentlich umfassender auf relevante Referenzwerte abgestimmt sind als die Werte von EXIOBASE.

### Textbox 1: Prüfung der empirischen Validität der Datenbanken EXIOBASE und GLORIA

- ▶ Während der Konzeption des in diesem Bericht vorgestellten makroökonomischen Bewertungsansatzes verglich das Forschungsteam der GWS die Datenqualitäten der Datenbank GLORIA mit den Datenqualitäten der Datenbank EXIOBASE.
- ▶ Für ausgewählte Schlüsselindikatoren (Produktionswerte der Wirtschaftsbereiche, verwertete inländische Entnahme von Rohstoffen aus der Umwelt nach Rohstoffkategorien, inländische Endnachfrage nach Gütergruppen) wurden die in den jeweiligen Datenbanken berichteten Werte mit entsprechenden Referenzwerten abgeglichen.
- ▶ Für sämtliche monetäre Größen wurden entsprechende Referenzwerte der OECD-ICIO-Statistik entnommen. Als Referenz der Berichterstattung zur verwerteten inländischen Entnahme von Rohstoffen aus der Umwelt wurden die entsprechenden Angaben der *Global Material Flows Database* des UNEP IRP verwendet.
- ▶ Visuelle Ergebnisdarstellungen dieser Vergleiche werden im Anhang C.1 aufgeführt. Anhand der resultierenden Muster der jeweiligen Abbildungen lässt sich qualitativ feststellen, dass sich **die GLORIA Datenbank im Vergleich zu EXIOBASE insbesondere durch eine wesentlich bessere Berücksichtigung der ökonomischen Referenzwerte der OECD auszeichnet.**
- ▶ **Eine angemessene Berücksichtigung ökonomischer Referenzwerte ist für inhaltliche Ergebnisvergleiche internationaler Fußabdruck-Bewertungen zwingend erforderlich,** da entsprechende Fußabdruck-Bewertungen auf einer Betrachtung der inländischen Endnachfrage sowie detaillierten Modellierungen der zugehörigen globalen ökonomischen Lieferketten beruhen.

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

GLORIA zeichnet sich durch eine hohe empirische Validität der monetären Berichterstattung aus. Zudem stellt diese Datenbank konsistent harmonisierte sektorale Informationen zu THG-Emissionen sowie weitere umweltrelevante physische Informationen bereit. Sie wurde zur Berechnung von Rohstoff-Fußabdruck-Indikatoren für die *Global Material Flows Database* (GMFD) (Schandl *et al.* 2017) des *International Resource Panels* (IRP) entwickelt.<sup>45</sup> Ihre Konsistenz in der Berichterstattung zu physischen Umweltinformationen und monetären Entwicklungen ist hoch. Daher ist GLORIA inzwischen die offizielle MRIO-Datenbasis des „*Sustainable Consumption and Production Hotspot Analysis Tool*“ (UNEP, 2022).

#### 5.2.2.2.2 In den Bewertungen des Vorhabens Digitalisierung und natürliche Ressourcen berücksichtigte Detailinformationen

Es wurde grundsätzlich entschieden, sämtliche in diesem Bericht vorgestellten eigenen „*Top-down*“-Berechnungen, Modellierungen und Simulationen mithilfe der Datenbank GLORIA durchzuführen. Dies ergibt die größtmögliche Vergleichbarkeit der eigenen Befunde mit umweltökonomischen Fußabdruck-Bewertungen des IRP. Diesbezüglich ist zu beachten, dass die makroökonomischen Bewertungen des Vorhabens nicht nur auf Beobachtungen von 2000 bis 2020 angewendet wurden.

<sup>45</sup> Für das *International Resource Panel* (IRP) der Vereinten Nationen wurde in den vergangenen Jahren die sogenannte *Global Material Flows Database* als Standard-Informationsquelle zur global harmonisierten Berichterstattung über nationale Rohstoffextraktionen etabliert. Diese Datenbank basiert (soweit möglich) auf öffentlich zugänglichen und verlässlichen internationalen Datenquellen und gilt als elementare Datengrundlage zum Monitoring von Entwicklungen im Kontext der SDG-Unterziele 8.4 (Ressourceneffizienz) und 12.2 (nachhaltige Bewirtschaftung der natürlichen Ressourcen). Siehe <https://www.resourcepanel.org/global-material-flows-database> (Stand: 19.09.2023) für weiterführende Informationen.

**Tabelle 20: Klassifikation der Rohstoffgruppen im Bewertungsmodell GRAMOD**

Nr.	Hauptrohstoffgruppe	Rohstoffgruppe
1	Fossile Energieträger	Braunkohle
2	Fossile Energieträger	Steinkohle
3	Fossile Energieträger	Torf
4	Fossile Energieträger	Erdöl und flüssiges Erdgas
5	Fossile Energieträger	Erdgas
6	Fossile Energieträger	Ölschiefer und Teersande
7	Metallerze	Eisenerze
8	Metallerze	Kupfererze
9	Metallerze	Nickelerze
10	Metallerze	Bleierze
11	Metallerze	Zinkerze
12	Metallerze	Zinnerze
13	Metallerze	Gold, Silber, Platin u. a. Edelmetalle
14	Metallerze	Bauxit u. a. Aluminiumerze
15	Metallerze	Uranerze
16	Metallerze	Sonstige Nichteisenmetalle
17	Nichtmetallische Mineralien	Zier- und Bausteine
18	Nichtmetallische Mineralien	Kreide und Dolomit
19	Nichtmetallische Mineralien	Chemische Mineralien und Dünger
20	Nichtmetallische Mineralien	Salz
21	Nichtmetallische Mineralien	Kalkstein und Gips
22	Nichtmetallische Mineralien	Lehm und Kaolin
23	Nichtmetallische Mineralien	Sand und Kies
24	Nichtmetallische Mineralien	Nichtmetallische Mineralien, anderweitig nicht genannt
25	Biomasse	Getreide

Nr.	Hauptrohstoffgruppe	Rohstoffgruppe
26	Biomasse	Wurzeln, Knollen
27	Biomasse	Zuckerkulturen
28	Biomasse	Hülsenfrüchte
29	Biomasse	Nüsse
30	Biomasse	Ölhaltige Pflanzen
31	Biomasse	Gemüse
32	Biomasse	Früchte
33	Biomasse	Fasern
34	Biomasse	Sonstige pflanzliche Rohstoffe
35	Biomasse	Ernterückstände
36	Biomasse	Futterpflanzen
37	Biomasse	Holz
38	Biomasse	Holzbrennstoffe und sonstige Gewinnung
39	Biomasse	Aquakultur

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Wie im Kapitel 6 „Anwendung des Modells GRAMOD zur Simulation zukünftiger Entwicklungen bis 2050“ ausführlich dokumentiert, wurden die makroökonomischen Datengrundlagen und Berechnungsmethoden entwickelt, um damit auch Modellierungen zukünftiger Digitalisierungsszenarien durchführen zu können. Das Forschungsteam der GWS wollte sicherstellen, dass der makroökonomische Bewertungsansatz auch nach Abschluss des Vorhabens eigenständig für weitere Simulationsanwendungen genutzt werden kann. Während der Bearbeitung des gegenständlichen Arbeitspakets aggregierte es daher in einzelnen Bereichen die in Tabelle 19 vorgestellten Originalstrukturen des Datensatzes von GLORIA. Die Rohstoffgruppen, die nach diesen Aggregationen in den eigenen Bewertungen explizit unterschieden werden, sind in der obenstehenden Tabelle 20 zusammengefasst. Die folgende Tabelle 21 listet die in den eigenen Bewertungen explizit unterschiedenen globalen Wirtschaftsregionen auf.

**Tabelle 21: Aggregation der Wirtschaftsregionen im Bewertungsmodell GRAMOD**

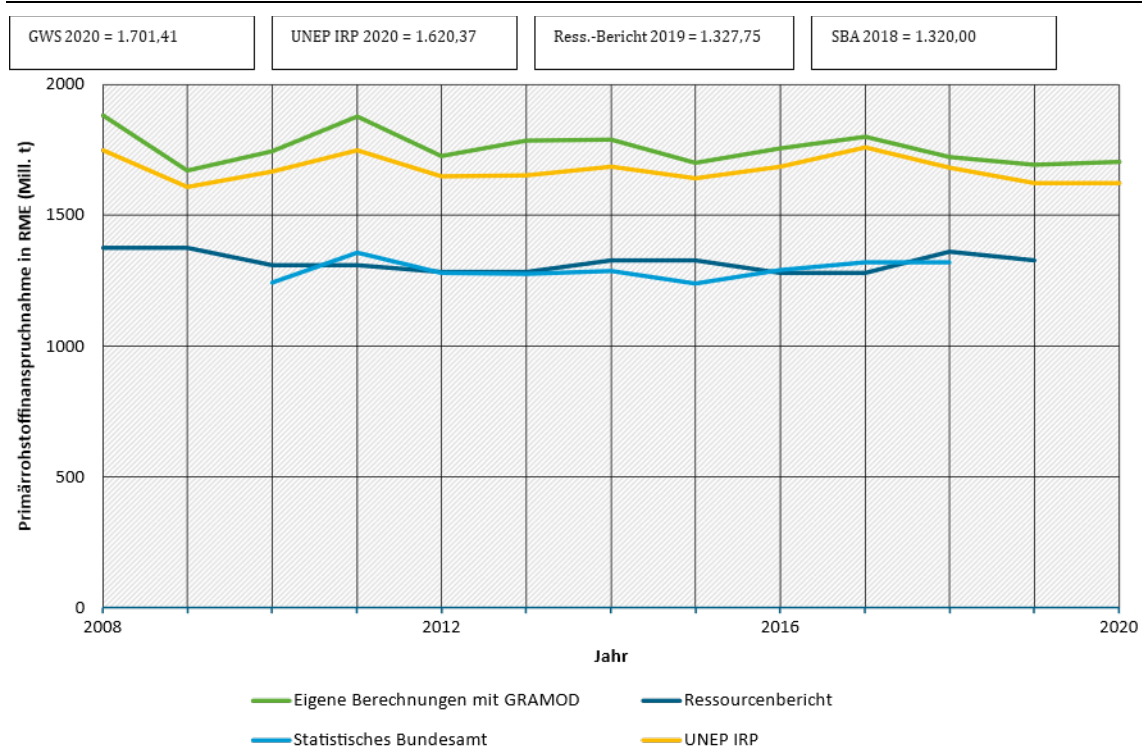
	In den Ergebnisgrafiken zugeordnet zu	GRAMOD-Region	Zugehörige GLORIA-Regionen
1	Deutschland	Deutschland	Deutschland
2	Sonstige Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU)	Belgien, Niederlande, Luxemburg	Belgien, Niederlande, Luxemburg
3	Sonstige Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU)	Frankreich	Frankreich
4	Sonstige Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU)	Iberische Halbinsel	Spanien, Portugal
5	Sonstige Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU)	Süd-Ost-EU	Zypern, Griechenland, Italien, Malta
6	Sonstige Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU)	Mittel-Ost-EU	Bulgarien, Kroatien, Ungarn, Rumänien, Slowenien
7	Sonstige Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU)	Österreich, Tschechien, Slowakei	Österreich, Tschechien, Slowakei
8	Sonstige Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU)	Nord-Ost-EU	Estland, Lettland, Litauen, Polen
9	Sonstige Mitgliedstaaten der Europäischen Union (EU)	Nördliche EU	Dänemark, Finnland, Irland, Schweden
10	Übriges Europa	EFTA-Länder	Island, Norwegen, Schweiz
11	Übriges Europa	Vereinigtes Königreich	Vereinigtes Königreich
12	Übriges Europa	Übriges Europa	Albanien, Bosnien und Herzegowina, Belarus, Moldau, Nordmazedonien, Serbien, Ukraine, sonstiges Europa
13	Übriges Europa	Russland	Russland
14	Übriges Europa	Türkei	Türkei
15	Asien	Zentralasien	Armenien, Aserbaidschan, Georgien, Kasachstan, Kirgisistan, Tadschikistan, Turkmenistan, Usbekistan
16	Asien	Ostasien (ohne China)	Hongkong, Japan, Südkorea, Mongolei, Nordkorea, sonstiges Ostasien
17	Asien	Südasien (ohne Indien)	Afghanistan, Bangladesch, Bhutan, Sri Lanka, Nepal, Pakistan
18	Asien	Südostasien (ohne Indonesien)	Bahrain, Kambodscha, Laos, Myanmar, Malaysia, Philippinen, Singapur, Thailand, Vietnam
19	Asien	Indonesien	Indonesien

	In den Ergebnisgrafiken zugeordnet zu	GRAMOD-Region	Zugehörige GLORIA-Regionen
20	China	China	China
21	Indien	Indien	Indien
22	Ozeanien	Ozeanien	Australien, Neuseeland, Papua-Neuguinea
23	USA	USA	USA
24	Nord- und Mittelamerika	Kanada	Kanada
25	Nord- und Mittelamerika	Mittelamerika, Karibik	Bahamas, Belize, Costa Rica, Kuba, Dominikanische Republik, Guatemala, Honduras, Haiti, Jamaika, Mexiko, Nicaragua, Panama, El Salvador
26	Südamerika	Mercosur-Länder	Argentinien, Brasilien, Paraguay, Uruguay
27	Südamerika	Übriges Südamerika und Karibik	Bolivien, Chile, Kolumbien, Ecuador, Peru, Venezuela, sonstiges Südamerika
28	Afrika	Nordafrika	Algerien, Ägypten, Libyen, Marokko, Sudan, Tunesien
29	Afrika	Westafrika	Benin, Burkina Faso, Elfenbeinküste, Gambia, Ghana, Guinea, Liberia, Mali, Mauretanien, Niger, Nigeria, Senegal, Sierra Leone, Togo
30	Afrika	Zentralafrika	Angola, Äquatorialguinea, Demokratische Republik Kongo, Gabun, Kamerun, Kongo, Tschad, Zentralafrikanische Republik
31	Afrika	Ostafrika	Äthiopien, Burundi, Dschibuti, Eritrea, Kenia, Madagaskar, Mosambik, Malawi, Ruanda, Sambia, Simbabwe, Südsudan, Somalia, Tansania, Uganda
32	Afrika	Südliches Afrika	Botswana, Namibia, Südafrika, sonstiges südliches Afrika
33	Naher Osten	Naher Osten (ohne Israel)	Bahrain, Iran, Irak, Jemen, Jordanien, Kuwait, Libanon, Oman, Palästina, Katar, Saudi-Arabien, Syrien, Vereinigte Arabische Emirate
34	Naher Osten	Israel	Israel

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Aufgrund dieser Anpassungen der GLORIA-Ausgangsdaten weichen die eigenen makroökonomischen Berechnungsergebnisse im Detail geringfügig von entsprechenden Referenzwerten des IRP ab. Abbildung 66 zeigt beispielhaft unterschiedliche Berechnungen zum deutschen Rohstoffkonsum (RMC).

**Abbildung 66: Ergebnisvergleich für unterschiedliche Bewertungsansätze: Deutschlands jährlicher Rohstoffkonsum (RMC) von 2008 bis 2020 in Millionen Tonnen**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“, 2023); Statistisches Bundesamt (Statistisches Bundesamt, 2021); Umweltbundesamt (Lutter *et al.*, 2022); SCP Hotspots Analysis Tool (UNEP, 2022)

Die grüne Linie im oberen Bereich der Abbildung zeigt die eigenen Berechnungsergebnisse auf Basis des hier vorgestellten Datensatzes. Im Vergleich hierzu stellt die gelbe Linie die offiziellen Abschätzungen des IRP zur Entwicklung des deutschen Rohstoffkonsums ab dem Jahr 2008 dar. Die eigenen Abschätzungen liegen also im gesamten abgebildeten Zeitraum leicht oberhalb der jeweiligen IRP-Referenzwerte. Im Mittel bleibt die erkennbare **Abweichung zwischen IRP-Referenz und eigenen Berechnungen unterhalb von 5 %**. Ebenfalls abgebildet sind die Berechnungen zum deutschen Rohstoffkonsum laut Statistischem Bundesamt (Statistisches Bundesamt, 2021), hellblaue Linie, sowie laut Ressourcenbericht 2022 (Lutter *et al.*, 2022), dunkelblaue Linie. Diese weichen deutlich von den IRP-Referenzwerten ab. **Beide abgebildeten Zeitreihen liegen im hier betrachteten Zeitraum im Mittel gut 20 % unter den IRP-Referenzwerten**. Das Statistische Bundesamt berichtet für das Jahr 2018 einen deutschen RMC von 1.320 Millionen Tonnen, der Ressourcenbericht 2022 nennt 1.361 Millionen Tonnen, das IRP 1.681 Millionen Tonnen, und die eigenen Berechnungen ergeben 1.722 Millionen Tonnen.

Die Werte des Statistischen Bundesamtes und des UBA-Ressourcenberichts 2022 sind sehr gut miteinander vergleichbar (Lutter *et al.*, 2022). Die Abweichungen gegenüber den eigenen Berechnungen und den Berechnungen des IRP verdeutlichen allerdings, dass MRIO-basierte Ergebnisse nicht unmittelbar mit entsprechenden Analyseergebnissen der amtlichen nationalen und europäischen Statistik vergleichbar sind: Das Statistische Bundesamt nutzt für entsprechende Analysen keine MRIO-Datenbank. Stattdessen kommt ein relativ komplexer hybrider Ansatz einschließlich *Domestic Technology Assumption* zum Tragen. Er ist in Flachmann *et al.* (2020), Maier (2018) sowie Kaumanns und Lauber (2016) dokumentiert. Die DTA ermöglicht eine umfassende Nutzung amtlicher nationaler Daten. Ihr Einsatz ist aus der Perspektive des Statistischen Bundesamts unter administrativen und institutionellen Abwägungen durchaus nachvollziehbar.

Allerdings ist unstrittig, dass die Ergebnisse gesamtwirtschaftlicher „*Top-down*“-Analysen durch unterschiedliche Aggregationen einzelner Weltregionen oder die Anwendung der DTA beeinflusst werden (siehe beispielsweise Lenzen *et al.* (2004)). Die Autoren\*Autorinnen des Statistischen Bundesamtes räumen korrekterweise ein, dass sich unter Anwendung der DTA nicht abschätzen lässt, „wie viele Rohstoffe im Ausland für Importe nach Deutschland eingesetzt wurden, sondern vielmehr, wie viele einheimische Rohstoffe durch den Import von Halb- und Fertigwaren eingespart wurden“ (Maier, 2018, S. 28).

Die makroökonomischen Berechnungen des gegenständigen Vorhabens zielten allerdings explizit darauf ab, die Rohstoffanspruchnahme für das System „Digitalisierung in Deutschland“ unter Berücksichtigung aller relevanten Vorketten zu bewerten. Doch ein Großteil der im Kontext der Digitalisierung in Deutschland genutzten Güter wird weder im Inland noch im nahen EU-Ausland produziert. Folglich ist davon auszugehen, dass gesamtwirtschaftliche Bewertungen bei ungenügender Berücksichtigung regional variierender Produktionstechnologien und Wirtschaftsstrukturen unter erheblichen Verzerrungen (engl. *Aggregation Biases*) leiden würden. Die Bewertungsalgorithmen des Statistischen Bundesamtes sind nicht öffentlich zugänglich, sodass im Rahmen dieses Vorhabens kein eigenständiger Ergebnisvergleich durchgeführt werden konnte.

Um die Größenordnung der entsprechenden Verzerrungen abzuschätzen, hat das Forschungsteam der GWS jedoch Sensitivitätsanalysen durchgeführt, während es den eigenen Bewertungsansatz entwickelte. Dabei kamen monetäre Informationen der Datenbank OECD-ICIO zum Einsatz. Diese Analysen zeigten unter Anwendung der DTA für einen Großteil der 45 Sektoren, die in der Datenbank OECD-ICIO abgebildet sind, bei der Bewertung globaler Produktions-tätigkeiten für die heimische Endnachfrage in Deutschland (betragsmäßige) Abweichungen von über 15 %. Mit Rückgriff auf die Notation, die in Kapitel 3 eingeführt wurde, lässt sich somit festhalten: Bei Anwendung von Gleichung (4) anstelle von Gleichung (7) sind Ergebnisabweichungen in einer Größenordnung von mehr als 15 % zu erwarten.<sup>46</sup> Werden diese unterschiedlich bewerteten Produktionsniveaus mit unterschiedlichen umweltrelevanten Intensitäten multipliziert, sind für derart berechnete Indikatoren (wie den gesamtwirtschaftlichen Rohstoffkonsum, RMC) auch größere Abweichungen möglich.

Auch die Methode zur Berechnung gesamtwirtschaftlicher Materialflüsse, die im Auftrag des Statistischen Amtes der Europäischen Union (Eurostat) entwickelt wurde (Schoer *et al.*, 2022), basiert auf einem hybriden Ansatz. Der Eurostat-Ansatz unterscheidet sich von der Berechnungsmethode des Statistischen Bundesamtes unter anderem dadurch, dass nicht sämtliche Importe unter Verwendung der DTA bewertet werden.<sup>47</sup> Dennoch basiert der Eurostat-Ansatz nicht auf der Anwendung einer vollständigen MRIO-Datenbank. Für Importe aus Nicht-EU-Ländern (mit hoher Relevanz für das gegenständliche Vorhaben) unterstellen die jeweiligen Berechnungen durchschnittliche europäische Produktionstechnologien.

---

<sup>46</sup> Siehe Anhang C.2 für eine detaillierte Ergebniszusammenfassung dieses Analyseansatzes.

<sup>47</sup> Siehe Lutter *et al.* (2022, S. 10–11) für eine einleitende Gegenüberstellung der Eurostat-Methode und der Methode des Statistischen Bundesamtes.



### Textbox 2: Aggregation Bias bei Verwendung der Domestic Technology Assumption

- ▶ In der wissenschaftlichen Literatur wurde bereits mehrfach thematisiert, dass es deutlichen Einfluss auf die Ergebnisse MRIO-basierter Analysen haben kann, wenn für ausländische Volkswirtschaften generell nationale Strukturen unterstellt oder einzelne Weltregionen zu stark aggregiert werden (*Aggregation Bias*).
- ▶ Eine optimale Aggregationsstufe lässt sich weder für geografische noch für sektorale MRIO-Strukturen allgemein herleiten (siehe beispielsweise Zhou *et al.* (2016) für vergleichbare empirische Schlussfolgerungen). Daher gibt es keine universell empfehlenswerte Datenstruktur für die Analyse und Modellierung von globalen Umweltwirkungen anhand inländischer ökonomischer Aktivitäten unter Anwendung von MRIO-Methoden.
- ▶ Hinlänglich belegt ist, dass eine zu wenig differenzierte Darstellung der extrahierenden und erstverarbeitenden Wirtschaftsbereiche in den Datengrundlagen zu einer erheblichen Ungenauigkeit der Analyseergebnisse führt (Schoer *et al.*, 2021). Wenig beleuchtet wurde hingegen bislang der Aggregationsfehler, der durch Anwendung der *Domestic Technology Assumption* (DTA) für ein hoch industrialisiertes Land wie Deutschland entsteht.
- ▶ Um die Größenordnung entsprechender *Aggregation Biases* bei Verwendung der *Domestic Technology Assumption* einzuordnen, führte das Forschungsteam der GWS auf Basis der monetären Daten aus OECD-ICIO entsprechende Vergleichsanalysen durch. Dabei berechnete es die globale Produktion für Konsum und Investitionen in Deutschland einerseits differenziert nach 45 Sektoren auf Basis des MRIO-Ansatzes (Gleichung 7). Vergleichend untersuchte das Forschungsteam auf Basis desselben Datensatzes die Produktion, die sich bei Anwendung der *Domestic Technology Assumption*, also bei Anwendung von Gleichung 4, ergibt. Basis dieser Berechnungen waren jeweils die OECD-Datensätze für das Berichtsjahr 2018.
- ▶ Mit diesen Berechnungen konnte belegt werden, dass **die globale Produktion für die Endnachfrage in Deutschland bei Anwendung der DTA erheblich unterschätzt** wird. Als **besonders deutlich** erweisen sich entsprechende Abweichungen **für Güter und Dienstleistungen der IKT-Nachfrage**. (Eine tabellarische Ergebnisauszusammenfassung dieses empirischen Vergleichs findet sich im Anhang C.2).

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die Entwickler\*innen der Eurostat-Methode erkennen die konzeptionellen Vorteile eines MRIO-basierten Ansatzes gegenüber ihrer Methode durchaus an. Sie verweisen aber auf den hohen Datenbedarf MRIO-basierter Analysen. Sie rechtfertigen ihre Vorgehensweise in erster Linie durch die relativ direkte Anwendbarkeit ihres erstmals in Schoer *et al.* (2012) wissenschaftlich dokumentierten Ansatzes, der seitdem im Auftrag von Eurostat regelmäßig aktualisiert und angewandt wird.<sup>48</sup> Zudem verweisen sie auf den in Schoer *et al.* (2013) veröffentlichten Vergleich eigener Bewertungen mit EXIOBASE-basierten Berechnungen.

<sup>48</sup> Siehe hierzu folgendes Zitat aus der Dokumentation der Eurostat-Methode: „From a pure conceptual perspective, using a multiregional input-output model (MRIO) instead of a model relying on the DTA would be the perfect solution as a multiregional model estimates import coefficients that fully represent the production conditions of the countries of origin of imports. However, from a practical point of view it has to be regarded that implementing MRIO models is extremely resource and data demanding“ (Schoer *et al.*, 2022, S. 15).

### Textbox 3: Konzeptionelle Grundlagen der Stoffstromindikatoren RMI und RMC

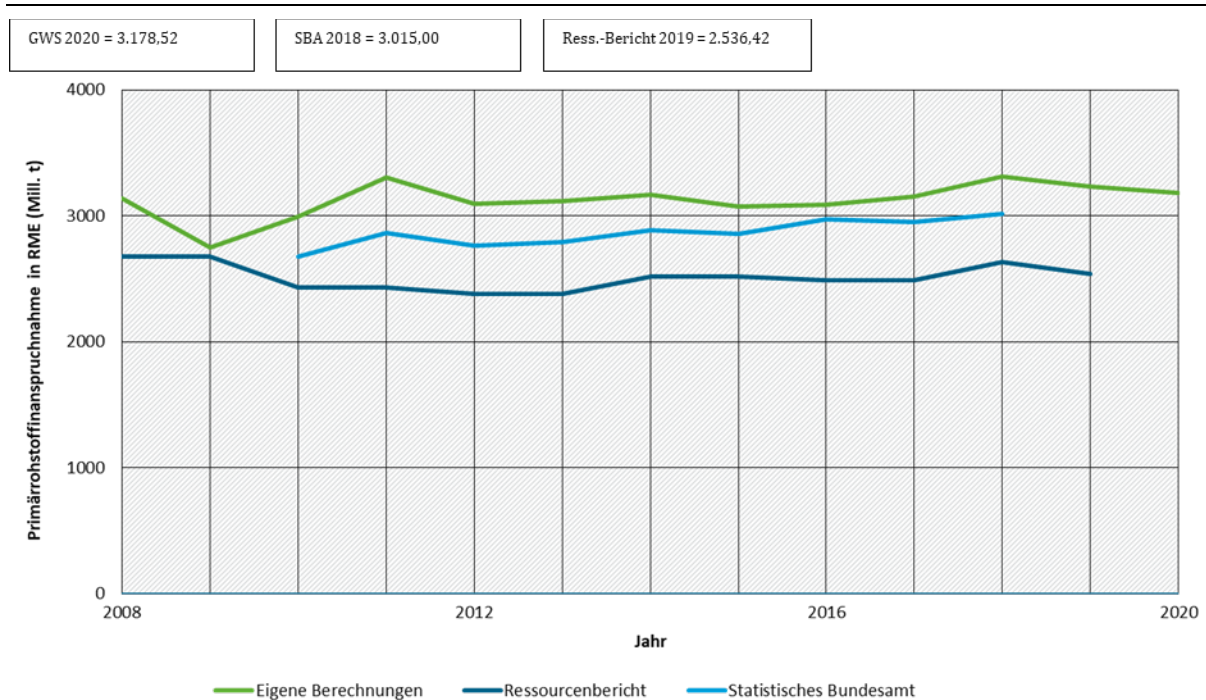
- ▶ **Stoffstromindikatoren** dienen der numerischen Erfassung von Stoffströmen. **Zur Bewertung gesamtwirtschaftlicher Rohstoffströme werden im gegenständigen Vorhaben die (Primärrohstoff-)Indikatoren RMI und RMC berechnet.** In Abgrenzung zu anderen etablierten Stoffstromindikatoren (siehe hierzu beispielsweise Kosmol *et al.* (2012)) zeichnen sich beide Indikatoren (u. a.) dadurch aus, dass sie „die Masse aller Rohstoffe, die entlang der gesamten Wertschöpfungsketten von gehandelten Waren zum Einsatz kommen“ (Lutter *et al.*, 2022, S. 92), erfassen. Die Indikatoren RMI und RMC bewerten die Masse der (im In- und Ausland) direkt aus der Natur entnommenen Rohstoffe. Zum anderen messen sie die Rohstoffmassen, die entlang sämtlicher Wertschöpfungsketten international gehandelter Güter und Dienstleistungen genutzt werden. Entsprechende Bewertungen **indirekter Rohstoffflüsse** werden als „**Rohstoffäquivalente**“ (RME) des Außenhandels bezeichnet. Die Rohstoffäquivalente des Außenhandels werden in der amtlichen Statistik sowie in der wissenschaftlichen Literatur mit mehreren unterschiedlichen Methoden gemessen. Internationale Lieferkettenstrukturen und die geografische Herkunft der Rohstoffe, die auf den jeweiligen Verarbeitungsstufen der Lieferketten genutzt werden, lassen sich nur mithilfe **multiregionaler Input-Output (MRIO)-Datenbanken** analysieren.<sup>49</sup> **Sämtliche in diesem Bericht vorgestellten Fußabdruck-Berechnungen basieren auf der Anwendung einer globalen MRIO-Datenbank.** Die konzeptionellen Unterschiede zwischen den Indikatoren RMI und RMC sind nachfolgend kurz zusammengefasst.
- ▶ Der Indikator **RMI (engl. *Raw Material Input*, dt. Rohstoffeinsatz)** betrachtet **die Input-Seite einer Volkswirtschaft.** Für eine gegebene Berichtsperiode wird die **Masse sämtlicher Rohstoffinputs** einer betrachteten Wirtschaftsregion erfasst. Berechnet wird die Summe sämtlicher Rohstoffextraktionen, die im Inland direkt verwertet werden (inländische Extraktionen plus direkt aus dem Ausland importierte Rohstoffe), zuzüglich der Rohstoffäquivalente sämtlicher importierter Güter und Dienstleistungen.
- ▶ Der Indikator **RMC (engl. *Raw Material Consumption*, dt. Rohstoffkonsum)** betrachtet **die inländischen Rohstoffinanspruchnahme einer Volkswirtschaft.** Für eine gegebene Berichtsperiode und Wirtschaftsregion wird die **Rohstoffmasse der gesamten inländischen letzten Verwendung** (Konsum und Investitionen) berechnet. In der wissenschaftlichen Literatur (siehe beispielsweise Wiedmann *et al.* (2013)) wird der RMC oftmals auch als „**Rohstoff-Fußabdruck**“ bezeichnet. Für eine gegebene Wirtschaftsregion entspricht der RMC mathematisch dem RMI abzüglich sämtlicher direkter und indirekter Rohstoffinputs der exportierten Güter und Dienstleistungen. **In empirischen Bewertungen ergeben sich daher für den RMC im Vergleich zum RMI (deutlich) geringere Werte.**

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, unter Rückgriff auf in der Textbox benannten Quellen

Ob (und ggf. in welchem Umfang) die in Schoer *et al.* (2013) kritisierten empirischen Schwächen der damaligen Datenbank EXIOBASE auch bei Anwendungen der MRIO-Datenbank GLORIA auftreten, ließ sich im Rahmen dieses Vorhabens nicht umfassend evaluieren. Erste Voruntersuchungen im Rahmen dieses Vorhabens deuten aber daraufhin hin, dass GLORIA im Vergleich zu EXIOBASE eine deutlich bessere empirische Datenqualität bietet.

<sup>49</sup> Siehe hierzu beispielsweise auch folgendes Zitat: „Lieferkettenstrukturen der deutschen Wirtschaft und die geografische Herkunft der Rohstoffe können im Detail nur mit MRIO-Berechnungen analysiert werden“ (Lutter *et al.*, 2023, S. 16).

**Abbildung 67: Ergebnisvergleich für unterschiedliche Bewertungsansätze: Deutschlands Rohstoffeinsatz (RMI) von 2008 bis 2020 in Millionen Tonnen**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“, 2023); Statistisches Bundesamt (Statistisches Bundesamt, 2021); Umweltbundesamt (Lutter *et al.*, 2022)

Die Eurostat-Methode für gesamtwirtschaftliche Bewertungen indirekter Rohstoffflüsse wurde zuletzt auch im UBA-Ressourcenbericht für Deutschland (Lutter *et al.*, 2022; Lutter *et al.*, 2023) angewandt. Daher lassen sich die in Abbildung 66 erkennbaren Unterschiede zwischen MRIO-basierten und nicht MRIO-basierten Ansätzen zur Berechnung des deutschen RMC methodisch plausibel nachvollziehen. Weniger deutlich lässt sich der in Abbildung 67 dargestellte Ergebnisvergleich für unterschiedliche makroökonomische Berechnungen des deutschen RMI einordnen. Für diesen Indikator der Ressourcenschonungspolitik liegen keine IRP-Referenzwerte vor. Daher stellt diese Abbildung den eigenen Berechnungen (grüne Linie) lediglich entsprechende Ergebnisse des UBA-Ressourcenberichts 2022 (dunkelblaue Linie) sowie des Statistischen Bundesamtes (hellblaue Linie) gegenüber. Die RMI-Berechnungen des UBA-Ressourcenberichts weisen im Vergleich zu den eigenen Bewertungen wesentlich geringere Ergebnisse auf: Im Durchschnitt gibt der UBA-Ressourcenbericht für die Berichtsjahre 2008 bis 2019 fast 20 % geringere RMI-Werte an. Demgegenüber weichen die entsprechenden Berichtswerte des Statistischen Bundesamtes weniger deutlich von den eigenen Ergebnissen ab – für den Zeitraum 2010 bis 2018 um durchschnittlich rund -8,9 %. Der Indikator RMI unterscheidet sich konzeptionell nur durch die zusätzlichen Rohstoffinanspruchnahmen für Exporte vom Indikator RMC. Daher verdeutlichen die beim Indikator RMI geringeren Abweichungen zwischen den Berechnungen des Statistischen Bundesamtes und den eigenen Berechnungen sowie die höheren Abweichungen zwischen den Berechnungen des Statistischen Bundesamtes und den Berechnungen des UBA-Ressourcenberichts, dass das Statistische Bundesamt bei den Rohstoffinanspruchnahmen für Exporte spezifische Sonderrechnungen anwendet.

### Zwischenfazit für die empirischen Grundlagen

- ▶ Bei der gesamtwirtschaftlichen Bewertung von Umweltintensitäten der Digitalisierung in Deutschland dienten im gegenständigen Vorhaben der **CO<sub>2</sub>-Fußabdruck** sowie die Fußabdruck-Indikatoren **RMC** und **RMI** als zentrale Berichtsgrößen.
- ▶ Die verschiedenen Institutionen berechnen diese **gesamtwirtschaftlichen Fußabdruck-Indikatoren mithilfe unterschiedlicher Datensätze und Bewertungsmethoden** (Meyer *et al.*, 2021). Je nach Methode treten zweistellige prozentuale Abweichungen zwischen den Bewertungsergebnissen auf (Lutter *et al.*, 2023).
- ▶ Die makroökonomischen Berechnungen des gegenständigen Vorhabens zielten explizit darauf ab, für die **Umweltintensitäten des Systems „Digitalisierung in Deutschland“ alle relevanten wirtschaftlichen Vorketten im In- und Ausland** zu berücksichtigen. **Für detaillierte globale Bewertungen multinationaler Lieferketten empfiehlt die methodische Fachliteratur eindeutig eine Verwendung von multiregionalen Input-Output (MRIO)-Datenbanken.**
- ▶ Eigene vorbereitende Evaluationen von Datenbankstrukturen im Rahmen dieses Vorhabens deuten darauf hin, dass die Datenbank **GLORIA im Vergleich zur** – häufig für entsprechende Bewertungen genutzten – **MRIO-Datenbank EXIOBASE eine deutlich bessere Validität aufweist.**
- ▶ Sämtliche in diesem Bericht vorgestellten Fußabdruck-Berechnungen erfolgten daher mithilfe **der globalen MRIO-Datenbank GLORIA.** Das im Rahmen des gegenständigen Vorhabens entwickelte **Bewertungs- und Projektionsmodell GRAMOD** unterscheidet **34 Weltregionen und 120 Wirtschaftsbereiche** (siehe hierzu das folgende Kapitel).
- ▶ Dieser Bewertungsansatz erzielt **die größtmögliche Vergleichbarkeit der eigenen Befunde mit umweltökonomischen Fußabdruck-Bewertungen des International Resource Panel (IRP).** Die eigenen Bewertungsergebnisse weichen lediglich um wenige Prozentpunkte von entsprechenden Referenzwerten des IRP ab.

## 5.2.3 Vorstellung des im Vorhaben für makroökonomische Berechnungen und Simulationen entwickelten Bewertungsmodells GRAMOD

### 5.2.3.1 Makroökonomische Erfassung gesamtwirtschaftlicher Entwicklungen: Klassifikationsdetails

Die makroökonomischen Grundlagen, die das System „Digitalisierung“ in den „Top-down“-Bewertungen abgrenzen, wurden im Kapitel „System- und Betrachtungsgrenzen“ (siehe Kapitel 3) bereits einleitend vorgestellt. Dem dort eingeführten systemischen Verständnis folgend, werden in den „Top-down“-Bewertungen alle Verwendungen von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland als direkte Effekte der Digitalisierung erfasst. In der Terminologie der makroökonomischen Buchungssystematiken der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen bedeutet dies: Als direkte Nachfrageeffekte gelten a) die Nachfrage sämtlicher volkswirtschaftlicher Wirtschaftszweige nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen als Vorleistungen in den jeweiligen Produktionsprozessen, b) die gesamte Endnachfrage in Deutschland nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen sowie c) die gesamte Exportnachfrage des Auslands nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen aus Deutschland. Das Buchungssystem der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen erfasst in standardisierter Weise aggregierte Zahlungsströme (in der VGR üblicherweise als Transaktionen bezeichnet) zwischen den Einheiten, die diese Transaktionen tätigen. Die betrachteten Einheiten werden allgemein als

„Transaktoren“ bezeichnet. Zur Berücksichtigung unterschiedlicher konzeptioneller Abgrenzungen werden dabei unterschiedliche Transaktorengruppen gebildet. Institutionelle Transaktoren wie beispielsweise private Haushalte oder der Staat werden dabei von funktionellen Transaktoren wie beispielsweise der Produktion oder der Einkommensverwendung institutioneller Transaktoren unterschieden. Weiterführende Erläuterungen zu Grundlagen der statistischen Erfassung makroökonomischer Transaktionen in den amtlichen Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen sowie der dabei verwendeten Terminologie bieten beispielsweise die Lehrbücher von Brümmerhoff und Grömling (2015) und Frenkel *et al.* (2022).

Gemäß dieser Konzeption lässt sich die Vorleistungsnachfrage der Wirtschaft mit der Datenbank GLORIA für 120 Wirtschaftszweige differenziert analysieren. Eine vollständige Übersicht der dabei angewandten Klassifikation der Wirtschaftszweige befindet sich im Anhang dieses Berichts (Tabelle 130 in Anhang D). Bezüglich der Endnachfrage im Inland unterscheidet das Forschungsvorhaben zwischen sämtlichen Bruttoinvestitionen der Wirtschaft, den Konsumausgaben des Staates sowie den Konsumausgaben privater Haushalte und gemeinnütziger Institutionen. Die Exportnachfrage wird in den Ergebnisauswertungen nicht weiter differenziert.

Zum Abschluss des Kapitels „System- und Betrachtungsgrenzen“ (Kapitel 2.4) wird die absolute und sektorenübergreifende Systematisierung gesellschaftlicher Entwicklungen als notwendig für die Bewertung der Ressourcenintensität der Digitalisierung herausgestellt. Die gewählten Datenstrukturen berücksichtigen diese Systematisierung in den makroökonomischen Berechnungen umfassend: Die Analyse basiert auf einer vollständigen volkswirtschaftlichen Betrachtung sämtlicher Wirtschaftsbereiche und sämtlicher Nachfragen nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen. Sie unterscheidet den absoluten Ressourcenbedarf der Digitalisierung ganzheitlich und detailliert für 39 Materialgruppen (siehe Tabelle 20). Diese Bewertungen verwenden einen MRIO-Ansatz (Abbildung 65). Somit bilden sie die multinationalen Vorleistungsketten der in Deutschland verwendeten IKT-Güter und -Dienstleistungen sehr detailliert ab (

Tabelle 21). Auch indirekte Effekte können so vollständig und mit einem hohen Detailgrad berücksichtigt werden.

### 5.2.3.2 Makroökonomische Erfassung digitalisierungsrelevanter Entwicklungen

#### 5.2.3.2.1 NACE-basierte Identifikation IKT-relevanter Güter- und Dienstleistungsgruppen: Konzeptionelle Grundlagen

Die ganzheitlichen Datengrundlagen der makroökonomischen Berechnungen ermöglichen eine breite konzeptionelle Bewertungsperspektive, verglichen mit der „*Bottom-up*“-Perspektive in den „Fallstudien Lebenszyklusdaten“ (Kapitel 4). Die „Fallstudien Lebenszyklusdaten“ basieren auf den Umweltinanspruchnahmen durch Herstellung und Verwendung von IKT-Gütern und sonstiger Hardware. Hierzu zählen beispielsweise Router, sonstige Geräte für den Internetzugang, Festplatten, Prozessoren etc., deren spezifische Relevanz für die ausgewählten Fallbeispiele ausgewertet wurde. Diese Analysen stellen also die jeweiligen Umweltinanspruchnahmen individueller Hardwareprodukte ausgesprochen detailliert dar. Demgegenüber ist es eine besondere Herausforderung, auf der Hardware aufbauende Technologien und Dienstleistungsangebote in Bezug auf ihre Umweltinanspruchnahmen ganzheitlich zu bewerten. Es handelt sich dabei beispielsweise um Internetdienstleistungen, *Data-Analytics* oder Cloud-Computing. Notwendig ist eine sektorübergreifende Betrachtung, mit der sich die Auswirkungen verwendeter IKT-Hardware und von IKT-Dienstleistungen für unterschiedliche Transformationsfelder bewerten lassen. Die hier vorgestellten Datengrundlagen der makroökonomischen Bewertungen sind dafür hervorragend geeignet.

Allerdings mussten die empirischen Datengrundlagen zunächst umfassend aufbereitet werden. Genau wie die amtlichen Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen (VGR) berichtet nämlich auch der Datensatz von GLORIA nicht explizit über einen abgegrenzten Digitalisierungssektor. Es musste daher zunächst konzeptionell entschieden werden, **welche der explizit abgebildeten 120 Wirtschaftszweige in GLORIA den IKT-Hardwareprodukten und -Dienstleistungen des Vorhabens zuzuordnen sind**. Die in den eigenen Analysen berücksichtigten statistischen Definitionen und Klassifizierungen, die die makroökonomische Dimension der Digitalisierung in Deutschland abgrenzen, basieren auf entsprechenden statistischen Konzepten des „**Leitfadens zur Messung der Informationsgesellschaft**“ (OECD, 2011). Dieser Leitfaden wurde zur gesamtwirtschaftlichen Identifizierung von IKT-Wirtschaftsaktivitäten in unterschiedlichen Sektoren und Teilsektoren entwickelt (OECD, 2007; 2009). Der so abgegrenzte makroökonomische IKT-Bereich erstreckt sich über die IKT-Dienstleistungsindustrie, den IKT-Handel, die IKT-Reparaturindustrie und die IKT-Fertigungsindustrie. Die Teilsektoren, die in der Klassifikation der Wirtschaftszweige (WZ) (Statistisches Bundesamt, 2008) in Anlehnung an diesen Leitfaden gesamtwirtschaftlich der IKT-Branche zugeordnet sind (Gruppen der Klassifikation der Wirtschaftszweige), sind in Tabelle 22 aufgeführt.

**Tabelle 22: Abgrenzung des Digitalisierungssektors in den gesamtwirtschaftlichen Bewertungen**

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

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben "DigitalRessourcen"), 2023, in Anlehnung an OECD (2007)

Die allgemeine Frage, mit der sich abwägen lässt, ob eine bestimmte Branche zu den IKT-Wirtschaftsaktivitäten gehört, lautet: Erbringt oder ermöglicht diese Branche substanzielle Funktionen der Informationsverarbeitung und -kommunikation auf elektronischem Wege? Dieses Kriterium berücksichtigt in der Regel nur individuell ausgewählte untergeordnete Gruppen (in der rechten Hälfte der Tabelle aufgeführte „Dreisteller“). Damit werden die direkten Effekte der Digitalisierung für IKT-relevante Abteilungen der Wirtschaftszweige (in der linken Hälfte der Tabelle aufgeführte „Zweisteller“) abgebildet. Die Gruppen 26.1 bis 26.4 sowie 26.8 fassen dabei die Herstellung von Hardware zusammen. So berichtet beispielsweise Gruppe 26.1 (u. a.) über die Herstellung von Mikroprozessoren, von integrierten elektronischen Schaltungen und von Rohhalbleitern oder Wafers. In Gruppe 26.2 finden sich (u. a.) Transaktionen für die Herstellung und/oder den Zusammenbau von Desktop-Computern, Laptops, Servern etc. und Gruppe 26.3 berichtet über ökonomische Transaktionen (u. a.) für die Herstellung von Telefon- und Faxgeräten, Routern oder auch Anrufbeantwortern. Gruppe 26.4 berichtet aggregiert (u. a.) über die Herstellung von Fernsehbildschirmen, Mikrofonen und Kopfhörern. Die Herstellung von Festplatten bzw. Datenträgern fällt unter Gruppe 26.8.

Der Handel mit Hardware-Erzeugnissen fällt statistisch unter Gruppe 46.5. Zur Erfassung IKT-relevanter Dienstleistungsaktivitäten sind auf disaggregierter Dreistellerebene folgende statistische Gruppen zu analysieren: 58.2 – u. a. Verlegen von Computerspielen; Verlegen von (nichtkundenspezifischer) Standardsoftware oder Anpassung solcher Software an einen

bestimmten Markt; Betriebssysteme; 63.1 – Datenbanken; Cloud-Dienste; Webportale etc.; sowie 95.1 – Reparatur von Datenverarbeitungs- und Telekommunikationsgeräten.

Allerdings bildet die Datenbank GLORIA produktionsseitige Entwicklungen nicht explizit auf der disaggregierten Ebene der hier aufgeführten Dreisteller ab. Die GLORIA Datenbank unterscheidet in ihrer ökonomischen Berichterstattung insgesamt 120 Wirtschaftsbereiche. Die laut „Leitfaden zur Messung der Informationsgesellschaft“ zu berücksichtigenden NACE-Gruppen sind dabei folgenden Aggregaten zugeordnet:

90 „Computers; electronic products; optical and precision instruments“;

100 „Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles“;

109 „Publishing“;

110 „Telecommunications“;

111 „Information services“;

120 „Other services“.

Unter diesen Wirtschaftsbereichen zeichnet sich lediglich die Telekommunikation dadurch aus, dass sämtliche für diesen Sektor erfassten Transaktionen vollständig dem IKT-Sektor zuzurechnen sind. Für die übrigen hier aufgeführten Wirtschaftsbereiche der GLORIA mussten die jeweiligen IKT-Anteile an den aggregiert berichteten Transaktionen individuell abgeschätzt werden. Die entsprechenden Berechnungsergebnisse werden im folgenden Unterkapitel zusammengefasst.

#### **5.2.3.2.2 NACE-basierte Identifikation IKT-relevanter Güter- und Dienstleistungsgruppen: Empirische Ergebnisse**

Das Ziel war Aussagen zur ökonomischen und darauf aufbauend auch zur physischen Dimension der Digitalisierung in Deutschland. Zu diesem Zweck wurde zunächst für sämtliche in den Modellierungen berücksichtigten Weltregionen der IKT-Anteil und der Nicht-IKT-Anteil der folgenden aggregierten Wirtschaftszweige berechnet: „Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen“; „Großhandel (ohne Handel mit Kraftfahrzeugen)“; „Verlagswesen“; „Informationsdienstleistungen“ und „Reparatur von Datenverarbeitungsgeräten und Gebrauchsgütern“. Die GWS nahm diese Aufteilung für die in Deutschland produzierten IKT-Güter und -Dienstleistungen auf Grundlage der Strukturellen Unternehmensstatistik (SBS) von Eurostat vor. Für die nach Herkunftsländern differenzierten Importe von IKT-Gütern erfolgte die Aufteilung auf Grundlage der deutschen Außenhandelsstatistik. Die im EU-Ausland produzierten IKT-Dienstleistungen wurden ebenfalls unter Rückgriff auf Eurostat-Daten (SBS) aufgeteilt. Für die IKT-Anteile in den vier Dienstleistungsbereichen im außereuropäischen Ausland galt die Annahme, dass sich diese wie im EU-Durchschnitt entwickelt haben.

Die Datenquellen, die für die Unterscheidung von IKT- und Nicht-IKT-Anteil herangezogen wurden, berichten für die Jahre 2008ff. Um auch über längerfristige Entwicklungen der (ökonomischen Dimension der) Digitalisierung in Deutschland berichten zu können, wurden frühere IKT-Anteile analog zu ihrer Trendentwicklung der Jahre 2008 bis 2019/2020 rückgerechnet.

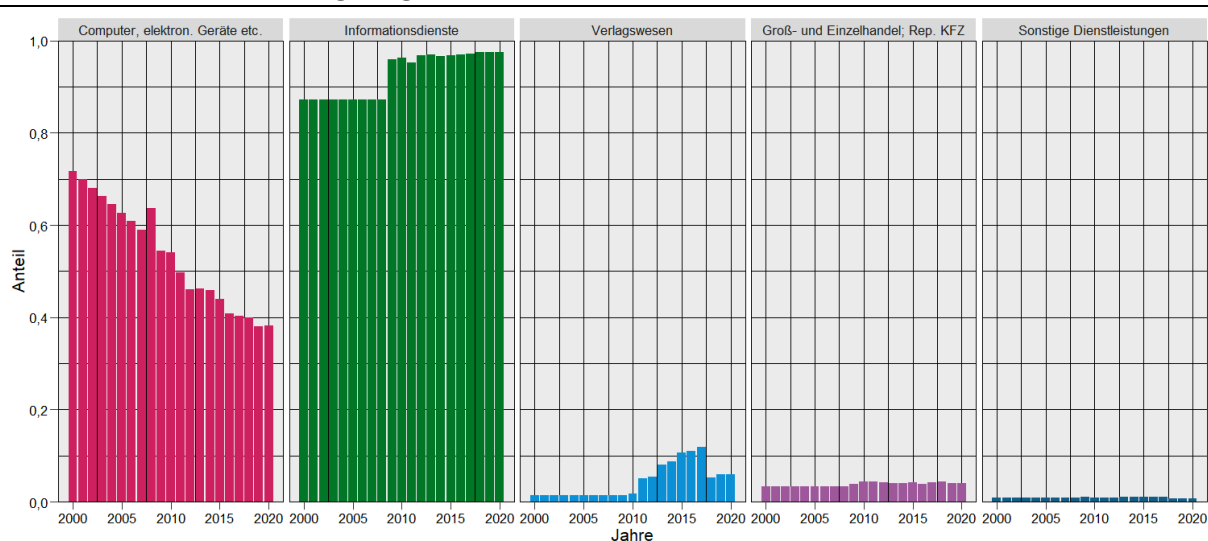
Diese Berechnungen identifizieren für den Wirtschaftszweig „Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen“ langfristig deutlich rückläufige IKT-Anteile: Im Jahr 2000 summierte sich der Anteil von IKT-Hardwareprodukten



am gesamten Produktionswert dieses Wirtschaftszweiges in Deutschland auf über 70 %. Bis zum Jahr 2020 ist dieser Anteil stetig auf weniger als 40 % abgesunken (Abbildung 68, Diagramm „Computer, elektronische Geräte etc.“).

Im Gegensatz hierzu ist die wirtschaftliche Entwicklung von Informationsdienstleistungen in Deutschland durch langfristig stabile (und erwartungsgemäß sehr hohe) IKT-Produktionsanteile gekennzeichnet: Der gesamte Produktionswert dieses Wirtschaftszweigs beruhte im Jahr 2009 zu annähernd 96%, im Jahr 2020 zu annähernd 98 % auf direkten IKT-Dienstleistungen (Abbildung 68, zweites Diagramm). Da aus diesen Beobachtungen keine langfristig signifikante Trendentwicklung abgeleitet werden kann, wird in den gesamtwirtschaftlichen Bewertungen für die Anteilswerte der Jahre 2000 bis 2007 eine Beibehaltung des Anteilswertes des Jahres 2008 unterstellt.

**Abbildung 68: Strukturelle Entwicklung der IKT-Produktionsanteile in Deutschland von 2000 bis 2020 anteilig am gesamten Produktionswert in Prozent**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, auf Basis von Eurostat-Daten und Trend-Rückrechnungen

Neben der Herstellung von Hardwareprodukten sowie der Erbringung von Informationsdienstleistungen sind in den übrigen analysierten Wirtschaftszweigen nur sehr geringe Produktionsanteile auf direkte IKT-Wirtschaftsaktivitäten zurückzuführen. Das Verlegen von Software erreichte in Deutschland im Jahr 2020 einen Anteil von ca. 6 % des gesamten Produktionswertes der statistischen Abteilung „Verlagswesen“.

Die direkten IKT-Aktivitäten des in der GLORIA-Datenbank abgebildeten Aggregats „Groß- und Einzelhandel, Reparatur von Kraftfahrzeugen“ trugen im Jahr 2020 lediglich 4 % zum bundesweiten Produktionswert dieses Wirtschaftszweiges bei. Reparaturen von Datenverarbeitungs- und Telekommunikationsgeräten haben im gesamten Analysezeitraum maximal 1 % zum Produktionswert des in der GLORIA-Datenbank abgebildeten Aggregats „Sonstige Dienstleistungen“ beigetragen.

Die letztgenannten Befunde lassen sich auch international verallgemeinern (Abbildung 69): Die direkten IKT-Aktivitäten an den jeweiligen gesamten nationalen Produktionswerten der Wirtschaftszweige „Groß- und Einzelhandel, Reparatur von Kraftfahrzeugen“ sowie „Sonstige Dienstleistungen“ summierten sich im Jahr 2020 maximal auf 7% (für Handelsdienstleistungen in nördlichen EU-Regionen), beziehungsweise 6,4 % (Reparaturdienstleistungen in Frankreich).

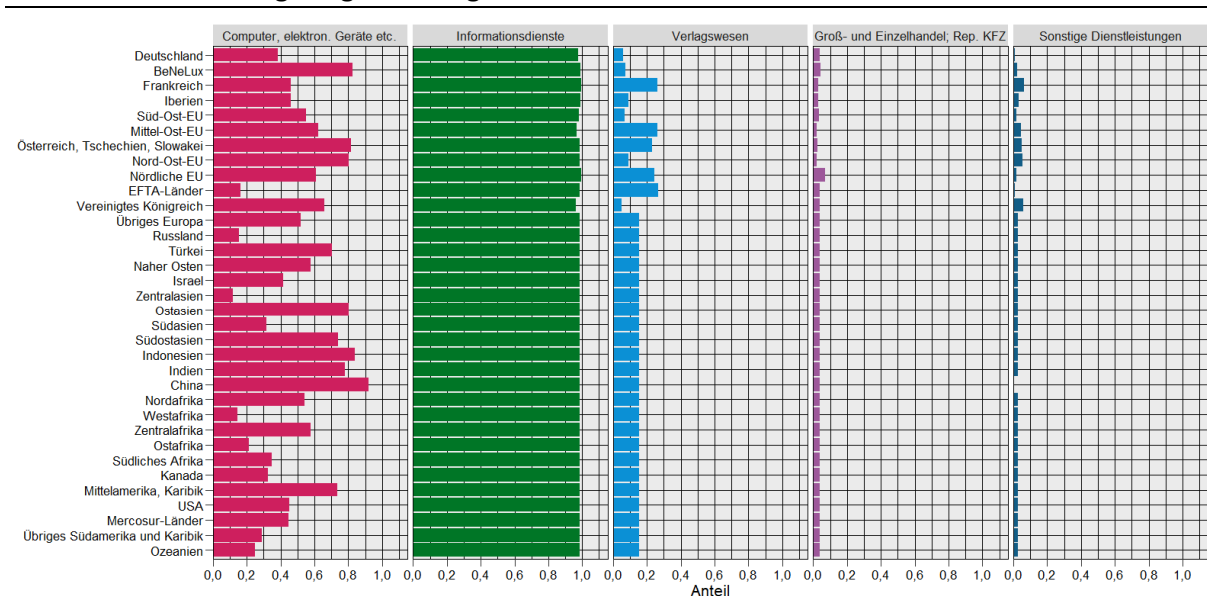
Insgesamt variieren die jeweiligen nationalen IKT-Anteile aber lediglich um Durchschnittswerte von 2,8 % (Reparaturdienstleistungen) bis 3,7 % (Handelsdienstleistungen).

Auch für Informationsdienstleistungen können allgemein sehr hohe direkte IKT-Anteile an den jeweiligen nationalen Produktionswerten beobachtet werden. Die diesbezüglich in Abbildung 69 ausgewiesenen Werte des Jahres 2020 schwanken lediglich in einem engen Intervall zwischen 96,1 % und 99,4 %.

Deutlichere internationale Variationen sind für das Verlagswesen zu beobachten: Im globalen Durchschnitt beruht der Produktionswert dieses Wirtschaftszweiges zu über 15 % auf direkten IKT-Dienstleistungen. In Frankreich, mittel-osteuropäischen EU-Staaten, nördliche EU-Staaten sowie der EFTA-Region werden allerdings bereits heute Anteile von (mehr als) 25 % erreicht. Der für Deutschland identifizierte direkte IKT-Anteil von ca. 6 % des Produktionswertes der statistischen Abteilung „Verlagswesen“ ist somit im internationalen Vergleich als sehr gering einzuordnen. Lediglich für das Vereinigte Königreich werden mit 4,9 % geringere IKT-Anteile für den Wirtschaftszweig „Verlagswesen“ identifiziert.

Spannend ist bei der Betrachtung von Abbildung 69 die Beobachtung, dass die globale Produktion von IKT-Gütern insbesondere in diesbezüglich spezialisierten Wirtschaftsregionen erfolgt: Während in China nahezu die gesamte Produktion (91,9 %) des in der GLORIA-Datenbank ausgewiesenen Aggregats „Computers; electronic products; optical and precision instruments“ der Herstellung von IKT-Hardware dient, erreichen entsprechende IKT-Anteile im globalen Durchschnitt lediglich einen Wert knapp oberhalb von 50 %. Der bereits zuvor angesprochene langfristige Rückgang der Produktionsanteile von IKT-Hardwareprodukten in Deutschland (von über 70 % im Jahr 2000 auf weniger als 40 % im Jahr 2020), wurde insbesondere durch im ost-asiatischen Raum ansteigende IKT-Anteile substituiert.

**Abbildung 69: Globale Verteilung der IKT-Produktionsanteile nach Ländergruppen im Jahr 2020 anteilig am gesamten globalen Produktionswert in Prozent**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, Basis von Eurostat-Daten und Trend-Rückrechnungen

### 5.2.3.3 Bewertungsalgorithmen zur Abschätzung von Rohstoff- und Emissionsintensität des digitalen Wandels in Deutschland

Die makroökonomischen Berechnungen und Simulationen bewerten die weltweit durch die Digitalisierung in Deutschland ausgelösten Umweltinanspruchnahmen. Sie berücksichtigen sämtliche für die letzte inländische Endnachfrage eingesetzten IKT-Güter und -Dienstleistungen; sämtliche für die inländische Produktion von Nicht-IKT-Gütern und -Dienstleistungen in der Wirtschaft eingesetzten IKT-Güter und -Dienstleistungen.

Für den zweiten oben angesprochenen Punkt (die Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen als Vorleistungsinputs anderer Wirtschaftsbereiche) werden dabei gemäß Tabelle 23 die Wirtschaftsbereiche differenziert, die IKT-Güter und -Dienstleistungen einsetzen.

**Tabelle 23: Klassifikation der IKT-Güter und -Dienstleistungen einsetzenden Wirtschaftsbereiche**

Nr.	Wirtschaftsbereich	NACE-Klassifikationen
1	Landwirtschaft	A
2	Verarbeitung von Mineralöl und Steinen und Erden; Chemie	CD–CG
3	Datenverarbeitungsgeräte	CI (Nicht-IKT-Anteil); CJ–CK
4	Fahrzeugbau	CL
5	Herstellung von Waren, anderweitig nicht genannt	CA–CC; CH; CM
6	Bergbau, Energie und Baugewerbe	B; D–F
7	IKT-Sektor	IKT-relevante Anteile von JB; CI, G, JA, JC, S
8	Handel	G (Nicht-IKT-Anteil)
9	Verkehr und Logistik	H
10	Unternehmensnahe Dienstleistungen	I; J (Nicht-IKT-Anteile); K–N
11	Öffentliche Dienstleistungen	O–R; S (Nicht-IKT-Anteile); T

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die rechte Spalte der Tabelle spezifiziert die zugehörigen NACE-Klassifikationen. Diese Differenzierung der Analyse nach verwendenden Wirtschaftsbranchen lehnt sich an entsprechende Vorgehensweisen im BMWI-Digitalisierungsindex 2020 an (Büchel *et al.*, 2021; Büchel & Engels, 2022).

### Zwischenfazit Bewertungsmodell GRAMOD

- ▶ Das im Rahmen des gegenständigen Vorhabens entwickelte **Bewertungs- und Projektionsmodell GRAMOD** bietet eine **global geschlossene**, für die jeweils abgebildeten Wirtschaftsregionen **vollständige Erfassung volkswirtschaftlicher Zahlungsströme**.
- ▶ GRAMOD unterscheidet **34 Weltregionen und 120 Wirtschaftsbereiche**. Die **inländische Endnachfrage** ist unterteilt in **Bruttoinvestitionen, privaten und Staatskonsum**. Nationale **Exportentwicklungen werden konsistent aus den globalen Handelsstrukturen** hergeleitet, die in der Datenbank GLORIA hinterlegt sind.
- ▶ In **Fußabdruckanalysen** verknüpft das Modell GRAMOD die detaillierten Zahlungsstrom-Informationen mit **umweltökonomischen Zusatzinformationen aus GLORIA**. Für Materialfußabdrücke lassen sich dabei maximal **39 Materialgruppen** unterscheiden.
- ▶ Als **direkte Effekte der Digitalisierung** wurden im gegenständigen **Vorhaben sämtliche Verwendungen von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland** erfasst. Dies beinhaltet **sämtliche IKT-Güter und -Dienstleistungen, die global für die deutsche Endnachfrage sowie für Produktionstätigkeiten der deutschen Volkswirtschaft eingesetzt werden**.
- ▶ Bei der Erfassung von IKT-Gütern werden vielfältige **Hardware-Produkte** berücksichtigt. Dazu gehören **u. a. Mikroprozessoren, integrierte elektronische Schaltungen, Desktop-Computer, Laptops, Server, Telefongeräte, Router, Bildschirme, Mikrofone, Kopfhörer und elektronische Datenträger**.
- ▶ Zur Bewertung der gesamtwirtschaftlichen Bedeutung von **IKT-Dienstleistungen** werden **u. a. der Handel mit Hardware-Erzeugnissen, das Verlegen von Softwareprodukten, Datenbank- und Cloud-Dienste, Webportale wie auch Reparaturdienstleistungen** erfasst.
- ▶ **IKT-Güter und -Dienstleistungen** werden in den amtlichen Statistiken der **Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen nicht explizit** als individueller Wirtschaftsbereich ausgewiesen. Zur numerischen Erfassung der direkten Effekte der Digitalisierung mussten daher **umfassende eigene Abschätzungen** ergänzt werden. Diese **Datenarbeiten** erfolgten **unter Berücksichtigung** der statistischen Definitionen und Klassifizierungen **des „Leitfadens zur Messung der Informationsgesellschaft“** (OECD, 2011).
- ▶ Die Datenstrukturen von GLORIA bilden produktionsseitige Entwicklungen nicht auf der disaggregierten Ebene der **Dreisteller ab, die im „Leitfaden zur Messung der Informationsgesellschaft“** aufgeführt sind. Daher wurden **individuelle Abschätzungen der jeweiligen IKT-Anteile an den aggregierten Zweistellern aus GLORIA** vorgenommen.

## 5.3 Digitaler Wandel in Deutschland: Makroökonomische Berechnungen

### 5.3.1 Methodische Anmerkungen

Die in diesem Kapitel vorgestellten makroökonomischen Berechnungsergebnisse basieren auf einer detaillierten Auswertung der Datenbank GLORIA. Hierzu wurden die Datenstrukturen des MRIO-Datensatzes, die zuvor in Abbildung 65 schematisch vorgestellt wurden, elektronisch ausgewertet. Im Interesse einer übersichtlich nachvollziehbaren Berichterstattung wurden dabei Detailstrukturen der Datenbank GLORIA zusammengeführt und elektronisch weiterbearbeitet.

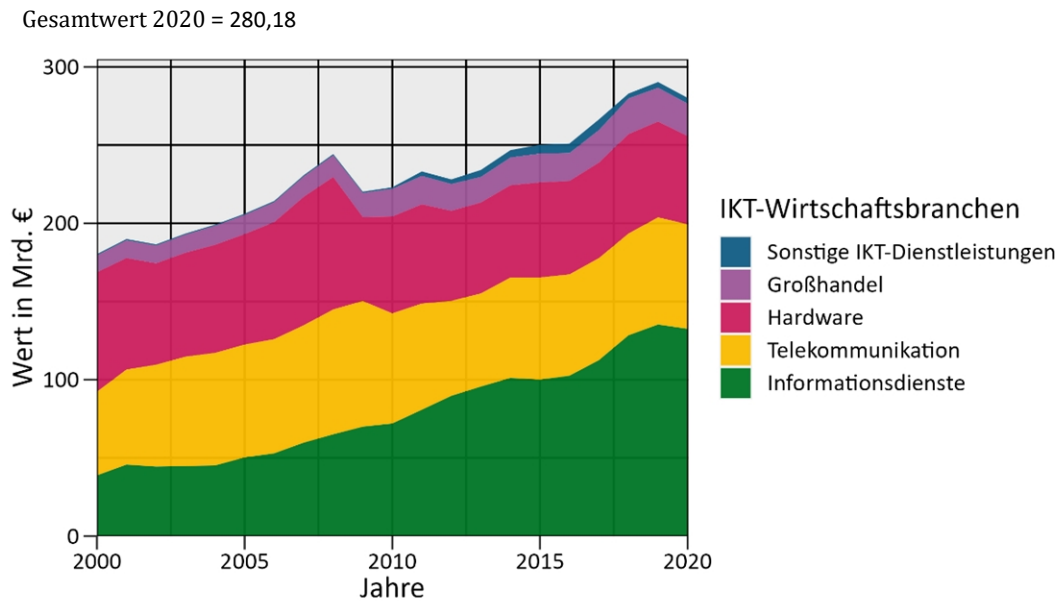
Der geografische Fokus des gegenständigen Vorhabens liegt auf der deutschen Volkswirtschaft. Daher wurden zur Berichterstattung über Angebots- und Nachfrageentwicklungen in Deutschland die Einträge der „Deutschland-Spalten“ aus GLORIA (gemäß Darstellung in Abbildung 65) zusammengefasst. Für die letzte inländische Verwendung (y-Spalten in Abbildung 65) wird die Nachfrage in Konsumausgaben privater Haushalte und gemeinnütziger Institutionen, Konsumausgaben des Staates sowie Bruttoinvestitionen der Wirtschaft unterteilt. Die Vorleistungsnachfrage der inländischen Wirtschaftsunternehmen wird gemäß den in Kapitel 5.2.3.3 vorgestellten Kategorien weiter disaggregiert. Die deutschen Exportentwicklungen wurden anhand der Vorleistungen und Endnachfragegüter berechnet, die in GLORIA in den Spalten der übrigen Wirtschaftsregionen ausgewiesen und von diesen Regionen nach Deutschland importiert werden. Alle berichteten Werte für IKT-Güter und -Dienstleistungen berücksichtigen die in Tabelle 22 zusammengefasste Abgrenzung des Digitalisierungssektors. Dabei kommen die in Kapitel 5.2 vorgestellten Detailabschätzungen individueller Anteilswerte zum Einsatz.

### 5.3.2 Ergebnisse

In Deutschland ist die Produktion von IKT-Gütern und -Dienstleistungen im Zeitraum 2000 bis 2020 von ursprünglich gut 180 Milliarden Euro auf über 280 Milliarden Euro angestiegen (Abbildung 70). In Abbildung 70 und sämtlichen folgenden Abbildungen zu den Wirtschaftsbereichen, bzw. Produktgruppen werden die IKT-relevanten Transaktionen der GLORIA-Gruppen „Computers; electronic products; optical and precision instruments“ (90), „Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles“ (100), „Telecommunications“ (110), „Information services“ (111), „Publishing“ (109) sowie „Other services“ (120) betrachtet. Als deutsche Bezeichnungen werden dabei die Begriffe „Hardware“, „Großhandel“, „Telekommunikation“, „Informationsdienste“ sowie „sonstige IKT-Dienstleistungen“ verwendet. Die Kategorien 109 und 120 werden dabei für die jeweiligen Darstellung unter „sonstige IKT-Dienstleistungen“ zusammengefasst.

Der Anstieg des monetären Werts der inländischen Produktion digitalisierungsrelevanter Güter und Dienstleistungen um über 55 % ist im Wesentlichen auf einen Anstieg der Informationsdienste zurückzuführen. Dieser Dienstleistungsbereich hat seinen Produktionswert im betrachteten Zeitraum mehr als verdreifacht (von knapp 39 auf 132 Milliarden Euro). Wie die Ausdehnung der grünen Fläche in Abbildung 70 in Relation zur Gesamtfläche verdeutlicht, beruhte im Jahr 2020 nahezu die Hälfte des Gesamtwertes sämtlicher in Deutschland produzierter IKT-Güter und -Dienstleistungen (47 %) auf Informationsdienstleistungen.

**Abbildung 70: Produktion von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Wirtschaftsbranchen in Milliarden Euro**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

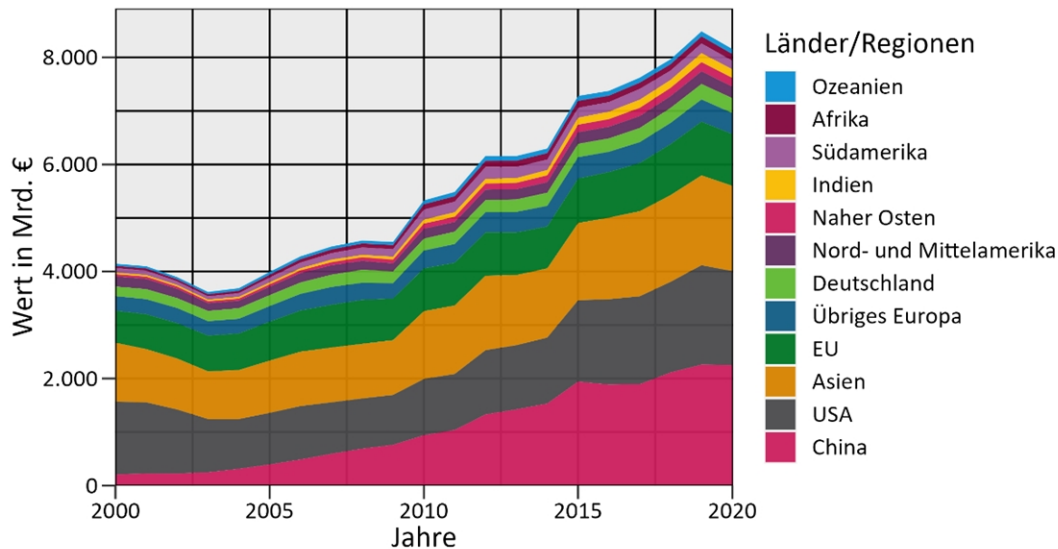
Dieser Anteil übersteigt die gesamtwirtschaftlichen Produktionsanteile der Telekommunikationsdienstleistungen sowie der Hardware-Herstellung in Deutschland deutlich. Telekommunikationsdienstleistungen und die Herstellung von Hardware-Komponenten trugen im Jahr 2020 mit ca. 67 Milliarden Euro bzw. 56 Milliarden Euro jeweils über 20 % zur gesamten inländischen Produktion von IKT-Gütern und -Dienstleistungen bei. **Bemerkenswert ist, dass die Hardware-Herstellung in Deutschland im gesamten Zeitraum deutlich an Relevanz verlor:** Im Jahr 2000 repräsentierte sie mehr als 40 % sämtlicher in Deutschland erfasster digitalisierungsrelevanter Produktionstätigkeiten (etwa 76 Milliarden Euro). Bis zum Jahr 2020 reduzierte sich dieser Anteil auf ca. 56 Milliarden Euro.

Mit einem Anteil von unter 7,5 % trugen IKT-relevante Aktivitäten des Großhandels im Jahr 2020 zu einem wesentlich geringeren Maße zur wirtschaftlichen Entwicklung der IKT-Branche in Deutschland bei. Als nahezu vernachlässigbar erweisen sich die „sonstigen IKT-Dienstleistungen“. Die IKT-Aktivitäten des Verlagswesens (ca. 3,5 Milliarden Euro.) dominieren dabei die Entwicklung dieses Aggregats.

Abbildung 71 ordnet die in Abbildung 70 betrachteten Produktionstätigkeiten in Deutschland industriepolitisch ein. Dazu beleuchtet sie die **globale Produktion** von IKT-Gütern und -Dienstleistungen im Zeitraum 2000 bis 2020. Abbildung 71 zeigt deutlich, dass in diesem Zeitraum die Produktion von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in China expandierte. Im Jahr 2000 wurden in China ca. 5 % aller global produzierten IKT-Güter und -Dienstleistungen hergestellt. Bis zum Jahr 2020 ist der chinesische Weltmarktanteil auf über 27,6 % angestiegen.

**Abbildung 71: Entwicklung der globalen Produktion von IKT-Gütern und -Dienstleistungen von 2000 bis 2020 nach Ländern in Milliarden Euro**

Gesamtwert 2020 = 8.156,90



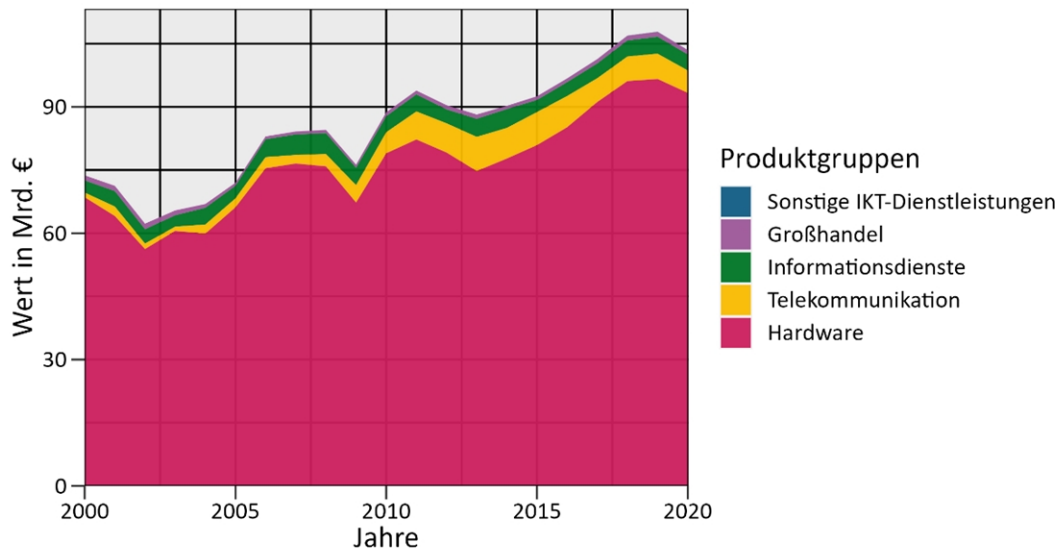
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Insgesamt hat sich der monetäre Wert der global produzierten IKT-Güter und -Dienstleistungen zwischen 2000 und 2020 nahezu verdoppelt. Wie zuvor gezeigt, stieg im gleichen Zeitraum das monetäre IKT-Produktionswachstum in Deutschland lediglich um etwas mehr als 55 %. Daher resultiert insgesamt **ein Rückgang der Weltmarktanteile der deutschen IKT-Branche**: Im Jahr 2000 stammten ca. 4,3 % aller global hergestellten IKT-Güter und -Dienstleistungen aus Deutschland, im Jahr 2020 summiert sich dieser Weltmarktanteil der deutschen Wirtschaft auf (immer noch beachtliche) 3,4 %.

Bemerkenswert ist dabei, dass der Rückgang der deutschen IKT-Weltmarktanteile auf die **Substitution heimischer Hardware-Produktion** durch entsprechende Importe zurückzuführen ist. Wie Abbildung 72 zeigt, stieg der Gesamtwert der Importe von IKT-Gütern und -Dienstleistungen nach Deutschland zwischen den Jahren 2000 und 2020 insgesamt um etwas mehr als 40 % an. Dies liegt unter dem Gesamtwert der inländischen Produktion. Treiber dafür sind insbesondere gesteigerte Importe von Hardware und Telekommunikationsdienstleistungen.

**Abbildung 72: Entwicklung der Importe von IKT-Gütern und -Dienstleistungen nach Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen in Milliarden Euro**

Gesamtwert 2020 = 103,50



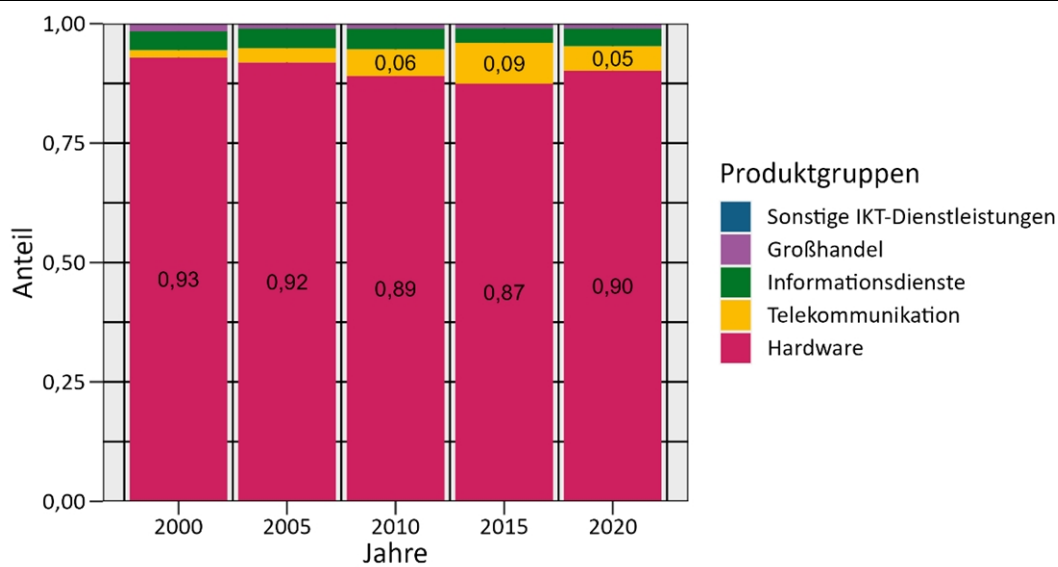
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Im Jahr 2020 importierte Deutschland Hardware in einem Gesamtwert von ca. 93 Milliarden Euro. Dies ist mit Abstand der höchste Wert unter sämtlichen hier betrachteten IKT-relevanten Produktgruppen. Hardware dominierte von 2000 bis 2020 den Anteil an sämtlichen IKT-relevanten Importen. Damit hatte sie maßgeblichen Einfluss auf die Gesamtimporte von IKT-Gütern und -Dienstleistungen.

Stärker noch als die Importe von Hardware stiegen im hier betrachteten Zeitraum die Importe von Telekommunikationsdienstleistungen. Im Jahr 2020 summieren sich die Importe von Telekommunikationsdienstleistungen und Informationsdiensten auf ca. 5 bzw. 4 Milliarden Euro. Wie Abbildung 73 verdeutlicht, bildeten Telekommunikationsdienstleistungen damit spätestens ab dem Jahr 2010 eine volkswirtschaftlich signifikante Triebfeder der digitalisierungsrelevanten Importe. Im langjährigen Vergleich zeigt sich aber auch, dass die Importe von IKT-Gütern und -Dienstleistungen ganz überwiegend (im langjährigen Mittel zu ca. 90 %) auf IKT-Güter entfallen.



**Abbildung 73: Strukturelle Entwicklung der Importe von IKT-Gütern und -Dienstleistungen nach Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen anteilig in Prozent**



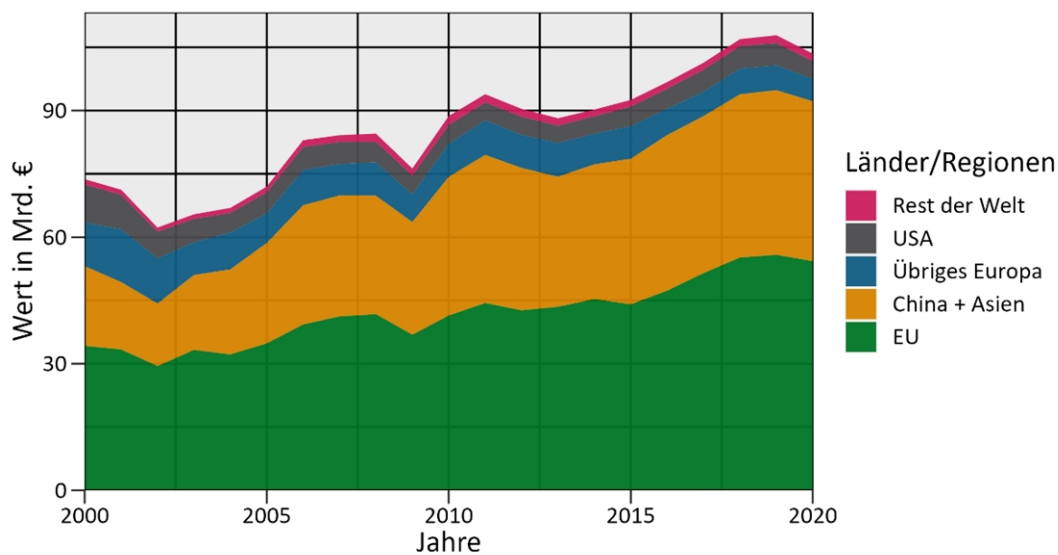
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023.

Der Großhandel nimmt mit ca. 1 Milliarden Euro einen geringen Wert an. Die sonstigen IKT-Dienstleistungen sind in der Abbildung kaum wahrnehmbar und weisen mit ca. 0,03 Milliarden Euro am aktuellen Rand einen sehr geringen Wert auf.

Abbildung 74 gliedert die insgesamt nach Deutschland importierten IKT-Güter und -Dienstleistungen gemäß ihrer geografischen Herkunft. Bei dieser Abbildung ist zunächst bemerkenswert, dass über den gesamten Betrachtungszeitraum der wertmäßig größte digitalisierungsrelevante Anteil an nach Deutschland importierten IKT-Gütern und -Dienstleistungen aus übrigen EU-Mitgliedstaaten stammt.

**Abbildung 74: Geografische Herkunft der von 2000 bis 2020 nach Deutschland importierten IKT-Güter und -Dienstleistungen nach Ländern in Milliarden Euro**

Gesamtwert 2020 = 103,50

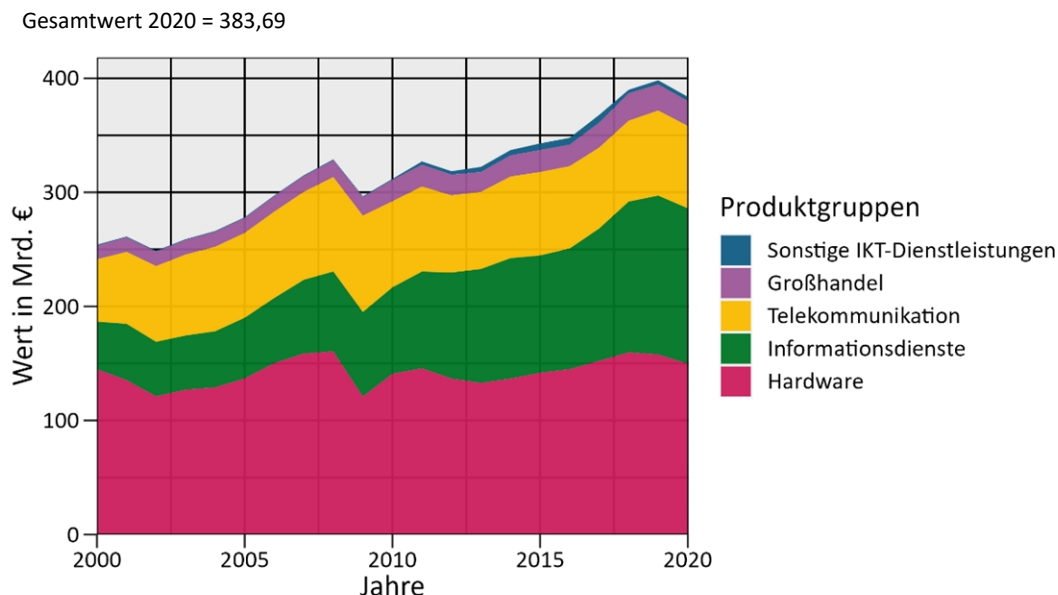


Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Das wertmäßige Wachstum der Importe aus China und dem übrigen Asien übertrifft zwar zwischen den Jahren 2000 und 2020 dasjenige der Importe aus EU-Ländern deutlich. Dennoch wurden auch im Jahr 2020 wertmäßig **die meisten IKT-Güter und -Dienstleistungen aus den EU-Mitgliedstaaten** nach Deutschland importiert. Der Gesamtwert dieser Importe summiert sich im Jahr 2020 auf ca. 54 Milliarden Euro. Der Gesamtwert der aus China und dem übrigen Asien nach Deutschland importierten IKT-Güter und -Dienstleistungen summiert sich im selben Jahr auf ca. 38 Milliarden Euro. Importe aus anderen Weltregionen erscheinen im Vergleich hierzu eher unbedeutend (übriges Europa 2020: ca. 5 Milliarden Euro, USA 2020: ca. 4 Milliarden Euro). In der Buchungssystematik der Volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen entspricht das gesamte Aufkommen an Gütern und Dienstleistungen (inländische Produktion abzüglich Importe) in einer Berichtsperiode für eine betrachtete Wirtschaftsregion gleichzeitig der gesamten Verwendung von Gütern und Dienstleistungen in dieser Wirtschaftsregion. Im Jahr 2020 wurden insgesamt IKT-Güter und -Dienstleistungen in einem Gesamtwert von gut 103 Milliarden Euro importiert. Die inländische Produktion dieser Güter und Dienstleistungen summierte sich in diesem Jahr auf gut 280 Milliarden Euro (siehe Abbildung 70 zuvor). Die gesamte Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen summierte sich folglich im Jahr 2020 auf über 383 Milliarden Euro.

Die gesamte Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland ist in Abbildung 75 dargestellt. Die Bereiche Hardware und Informationsdienste weisen 2020 mit etwa 150 bzw. 136 Milliarden Euro die höchsten Werte auf. Von 2000 bis 2020 steigt das Gesamtvolumen der Verwendung von IKT in Deutschland deutlich an. Beide Produktgruppen entwickeln sich jedoch sehr unterschiedlich: Während die wertmäßige Verwendung von Hardware im Zeitverlauf relativ konstant bleibt, wachsen Informationsdienste deutlich an. Am aktuellen Rand zeigen sie ein Vielfaches ihres Ausgangswertes aus dem Jahr 2000.

**Abbildung 75: Entwicklung der Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen in Milliarden Euro**

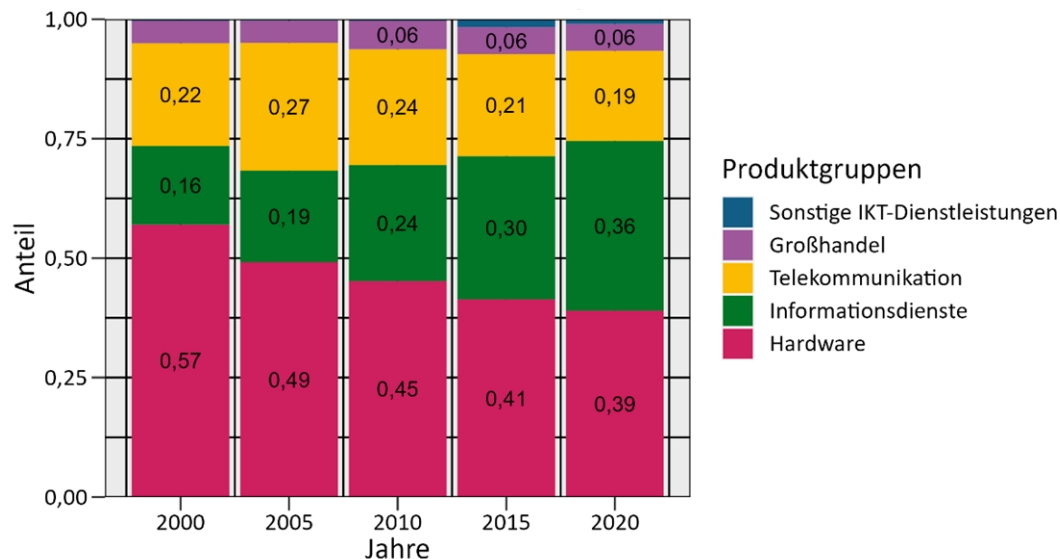


Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 76 stellt dar, welchen relativen Anteil die einzelnen Gruppen an der bundesweiten Verwendung von digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen haben. Das bereits erwähnte hervorstechende Wachstum der Produktgruppe Informationsdienste geht offenbar mit einem deutlich wachsenden Anteil dieser Dienstleistungsgruppe an der gesamten

Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland einher. Im Gegenzug verkleinert sich der Anteil, den die übrigen Produktgruppen (mit Ausnahme von Informationsdiensten und sonstigen IKT-Dienstleistungen) an der gesamten Verwendung digitalisierungsrelevanter Güter und Dienstleistungen in Deutschland haben, im Zeitverlauf gleichmäßig.

**Abbildung 76: Entwicklung der Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen anteilig in Prozent**

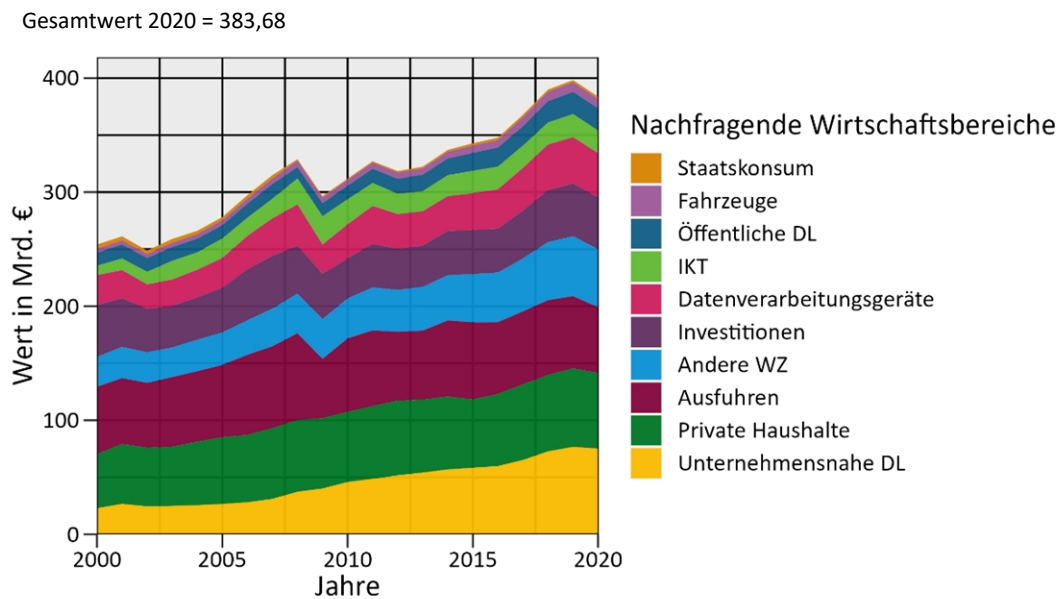


Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Der wertmäßig größte Anteil entfällt langfristig auf Hardware. Da er aber kontinuierlich zurückgeht, liegen die Anteile von Hardware und Informationsdiensten im Jahr 2020 nahezu gleichauf (Hardware: 39 %, Informationsdienste: 36 %). Die Telekommunikation weist – mit Ausnahme eines größeren Anteils im Jahr 2005 – Werte nahe 20 % auf. Der Anteil des Großhandels schwankt langfristig um 5 %. Auf sonstige IKT-Dienstleistungen entfallen während des gesamten Analysezeitraums vernachlässigbar geringe Anteile.

Die gesamte deutsche Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen lässt sich weiter untergliedern in die Vorleistungsnachfrage einzelner Wirtschaftsbranchen, die aus dem Ausland resultierende Exportnachfrage sowie die inländische Endnachfrage für Konsum- und Investitionsbedürfnisse. Eine entsprechende Unterteilung zeigt Abbildung 77. Diese Differenzierung verdeutlicht, dass im Zeitraum 2000 bis 2020 unternehmensnahe Dienstleistungen ein wesentlicher Treiber der Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland waren. Im Jahr 2020 summierte sich der Wert der Nachfrage nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen durch unternehmensnahe Dienstleistungen auf ungefähr 75 Milliarden Euro.

**Abbildung 77: Nachfrage nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Wirtschaftsbereichen in Milliarden Euro**

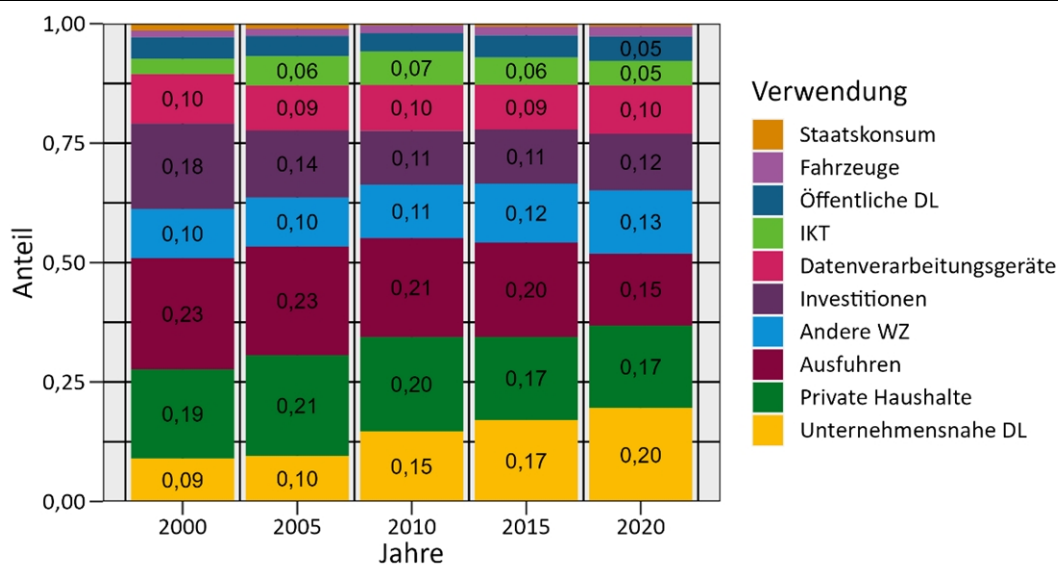


Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Wie Abbildung 78 zeigt, hat dieses Wirtschaftsaggregat damit seinen Anteil an der gesamten inländischen volkswirtschaftlichen Verwendung von digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen zwischen 2000 und 2020 mehr als verdoppelt. Unter diesem Wirtschaftsaggregat sind hier Entwicklungen u. a. in den Bereichen Gastgewerbe, Erbringung von Finanz- und Versicherungsdienstleistungen sowie Grundstücks- und Wohnungswesen zusammengefasst. Unter „andere Wirtschaftszweige“ fasst die Abbildung Folgendes zusammen: Landwirtschaft; die Verarbeitung von Mineralöl und Steinen und Erden sowie Chemie; Bergbau, Energie- und Baugewerbe; Handel; Verkehr und Logistik; Waren und anderweitig nicht Genanntes.

Zwischen 11 und 18 % der gesamten deutschen Verwendung entfallen auf Bruttoanlageinvestitionen. Die Statistik gibt jedoch keine Auskunft darüber, welche Wirtschaftszweige diese Investitionen getätigt haben.

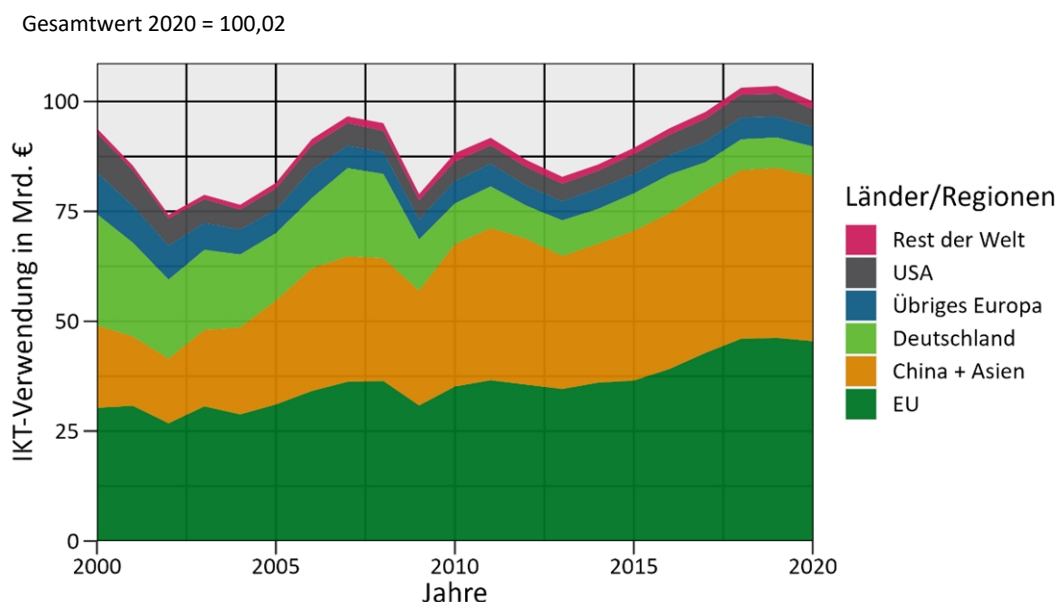
**Abbildung 78: Nachfrage nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Verwendungsbereichen der Wirtschaft anteilig in Prozent**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 79 und Abbildung 80 analysieren die Herkunft der in Deutschland verwendeten IKT-Güter und -Dienstleistungen. Das erste Diagramm, das die wertmäßige Entwicklung der in Deutschland verwendeten IKT-Güter abbildet, zeigt: Der Anteil der IKT-Güter aus inländischer Produktion ist seit dem Jahr 2000 deutlich zurückgegangen. Gleichzeitig hat der Anteil der IKT-Güter aus ostasiatischen Produktionsstätten deutlich zugenommen. Die inländische Produktion hat sich im hier betrachteten Zeitraum um mehr als die Hälfte verringert.

**Abbildung 79: Entwicklung der verwendeten IKT-Güter in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Herkunftsländern in Milliarden Euro**

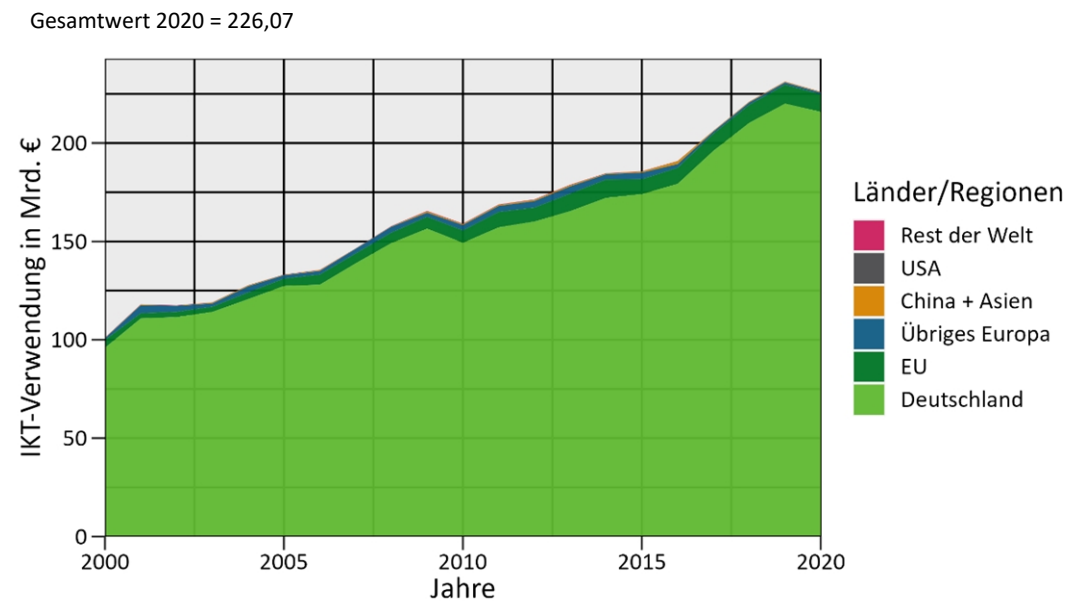


Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Bei der Verwendung von IKT-Dienstleistungen hingegen zeigt sich ein deutlich anderes Bild: Hier stammen im gesamten Zeitraum deutlich überwiegende Teile der Verwendung in

Deutschland aus heimischer Produktion oder aus dem EU-Ausland. Dienstleistungen aus Deutschland haben dabei mit weitem Abstand den größten Anteil an sämtlichen in Deutschland verwendeten IKT-Dienstleistungen. Für diese Dienstleistungsgruppe ist zudem im Zeitverlauf ein deutlicher Anstieg zu erkennen. Im Jahr 2000 beträgt der Wert etwas mehr als 100 Milliarden Euro, im Jahr 2020 über 220 Milliarden Euro. Auf die EU entfallen 2020 ca. 9 Milliarden Euro, auf das übrige Europa 0,9 Milliarden Euro.

**Abbildung 80: Entwicklung der verwendeten IKT-Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Herkunftsländern in Milliarden Euro**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### Zwischenfazit makroökonomische Berechnungen

- ▶ Die inländische **Produktion von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland** ist im analysierten Zeitraum von 2000 bis 2020 von gut 180 Milliarden Euro auf über **280 Milliarden Euro** angestiegen.
- ▶ Die **Importe von IKT-Gütern und -Dienstleistungen** werden nahezu ausschließlich **durch den Import von Hardware dominiert**. Im langjährigen Mittel entspricht der Wert dieser Güter ca. 90 % sämtlicher importierter IKT-Güter und -Dienstleistungen.
- ▶ Infolgedessen verliert die **Herstellung von Hardware (IKT-Gütern) in Deutschland zunehmend an Relevanz**. Der Anteil der in Deutschland verwendeten importierten IKT-Güter steigt derweil deutlich an. **Insbesondere ostasiatische Herstellungsländer profitieren von diesem Substitutionseffekt**.
- ▶ Das heimische **Wachstum des Digitalisierungssektors** wird **durch eine dynamische Entwicklung digitalisierungsrelevanter Dienstleistungen** getrieben. Dabei handelt es sich insbesondere um Informationsdienste wie die Erstellung von Datenbanken, den Betrieb von Web-Portalen, Cloud-basierte Dienstleistungen etc.
- ▶ Der Wert der insgesamt in Deutschland verwendeten Hardware bleibt im Zeitverlauf nahezu konstant. Daher haben **Hardware (39 %) und Informationsdienste (36 %) inzwischen nahezu identische Anteile an der gesamten Verwendung von Digitalisierungsgütern und -dienstleistungen in Deutschland. Auf Telekommunikationsdienstleistungen entfallen ca. 19 % der gesamten Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland**. Die weiteren analysierten digitalisierungsrelevanten Güter- und Dienstleistungsgruppen sind im Vergleich zu diesen Anteilen von geringer volkswirtschaftlicher Relevanz.
- ▶ Gemäß der hier vorgenommenen Klassifizierung wurde die Nachfrage nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen im Analysezeitraum insbesondere durch das **Wachstum der Vorleistungsnachfrage unternehmensnaher Dienstleister getrieben**. Zu diesen zählen u. a. Unternehmen des Verlagswesens, audiovisuelle Medienbetriebe und Rundfunkbetreiber, Finanz- sowie Versicherungsdienstleister, die nicht dem Digitalisierungssektor direkt zurechenbar sind. Diese Dienstleistungsbranche verursachte im Jahr 2020 insgesamt eine **Vorleistungsnachfrage nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen im Wert von ungefähr 75 Milliarden Euro**. Damit hat sie ihren Anteil an der gesamten inländischen volkswirtschaftlichen Verwendung von digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen zwischen 2000 und 2020 mehr als verdoppelt. Im Jahr 2020 repräsentierte die **Vorleistungsnachfrage unternehmensnaher Dienstleister ca. 20 % der gesamten Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen** in Deutschland.
- ▶ Neben der Vorleistungsnachfrage unternehmensnaher Dienstleister sind sowohl private Haushalte als auch die Exportnachfrage aus dem Ausland hervorstechende Triebfedern der Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland. **Ca. 17 % der gesamten Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland entfallen auf den Konsum privater Haushalte** (und gemeinnütziger Institutionen). **15 % der gesamten Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland entfallen auf die Exportnachfrage** des Auslands nach in Deutschland produzierten Gütern und Dienstleistungen.

## 5.4 Digitaler Wandel in Deutschland: Umweltökonomische Bewertung

Während im vorherigen Unterkapitel die gesamtwirtschaftlichen Entwicklungen der Digitalisierung in Deutschland zusammengefasst wurden, erfolgt in diesem Unterkapitel eine umweltökonomische Bewertung dieser Entwicklungen anhand der Fußabdruckindikatoren RMC, RMI sowie des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks. Traditionell erfassen diese Fußabdruck-Indikatoren sämtliche Umweltbelastungen, welche durch die globale Herstellung von im Inland genutzten Endprodukten ausgelöst werden. Durch den Indikator RMI werden darüberhinausgehend auch die globalen Umweltbelastungen durch die inländische Herstellung von Gütern- und Dienstleistungen für Exporttätigkeiten mit abgebildet.

Gemäß dieser klassischen Konzeption würde bspw. der RMC<sub>Dig.</sub> in Deutschland ausschließlich über den Primärrohstoffbedarf zur Bereitstellung der in Deutschland für die letzte inländische Endnachfrage nachgefragten Hardwareprodukte, Großhandelsdienstleistungen, Telekommunikationsdienstleistungen, Informationsdienstleistungen und sonstigen IKT-Dienstleistungen berichten. Unberücksichtigt bliebe dabei allerdings der gesamte Einsatz von IKT-Gütern und Dienstleistungen als Vorleistungsinputs in anderen Wirtschaftsbereichen. Die makroökonomischen Berechnungen des Kapitels 5.3 zeigen, dass daraus eine deutliche Untererfassung der gesamtwirtschaftlichen Nachfrage nach IKT-Gütern und Dienstleistungen folgen würde: Die Vorleistungsnachfrage übriger Wirtschaftsbereiche summierte sich im Jahr 2020 auf über 190 Milliarden Euro. Dies entspricht ungefähr der Hälfte der gesamten Nachfrage nach IKT-Gütern und Dienstleistungen in Deutschland.

Um sämtliche volkswirtschaftlichen Verwendungen von IKT-Gütern und Dienstleistungen zu erfassen, wurde daher das klassische Fußabdruck-Konzept in diesem Vorhaben um die zusätzliche Berücksichtigung der Vorleistungsnachfragen der Nicht-IKT Wirtschaftszweige nach IKT-Gütern und Dienstleistungen erweitert. Inhaltlich bedeutet dies, dass die auf den folgenden Seiten gezeigten Ergebnisse die generelle Fragestellung analysieren, welche gesamtwirtschaftlichen Veränderungen durch einen Wegfall der Nachfrage in Deutschland nach sämtlichen Produkten und Dienstleistungen des Systems „Digitalisierung“ (national wie international hergestellte Hardwareprodukte, Großhandelsdienstleistungen, Telekommunikationsdienstleistungen, Informationsdienstleistungen und sonstigen IKT-Dienstleistungen) ausgelöst würden.

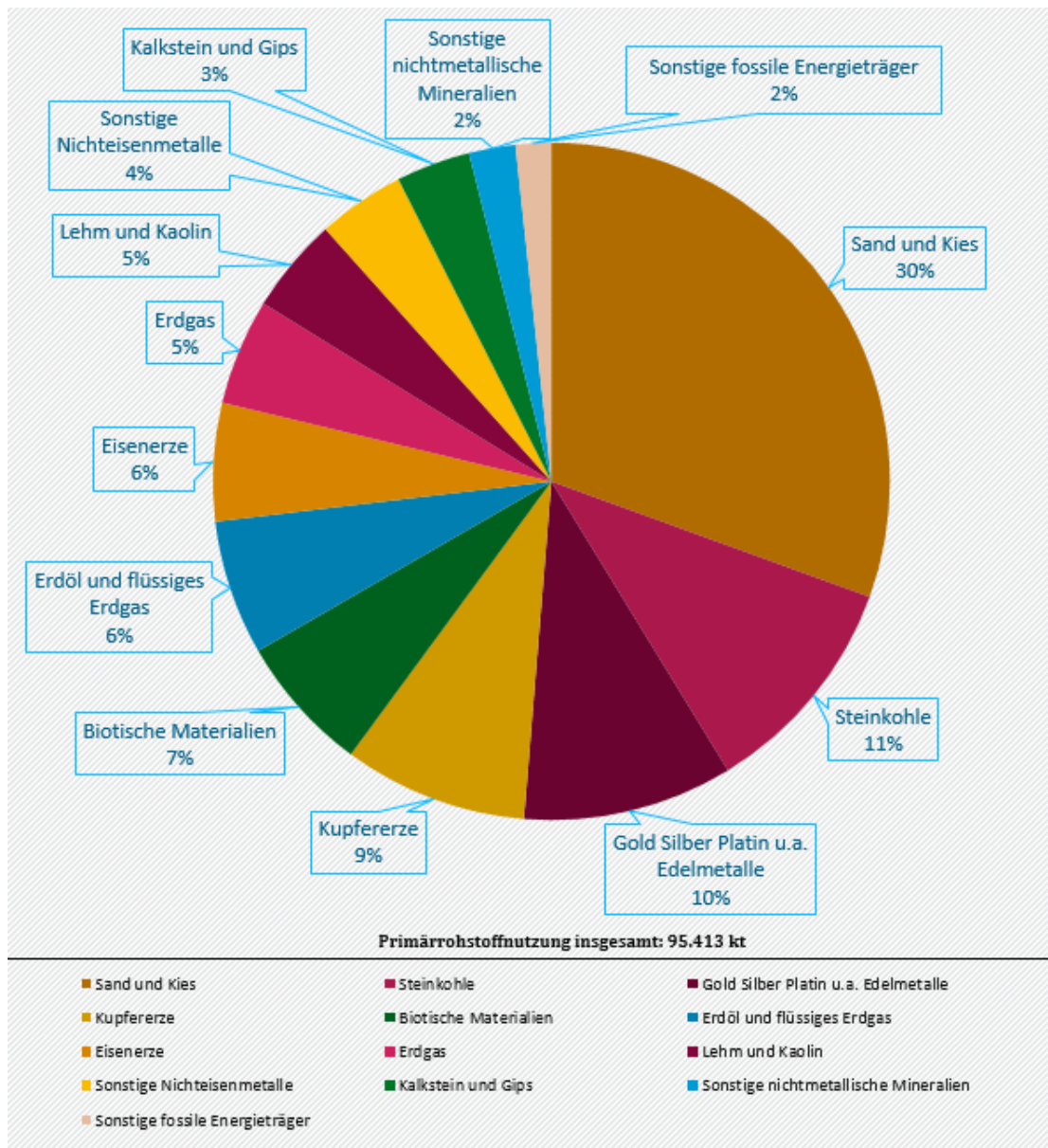
### 5.4.1 Umweltökonomische Entwicklungen des digitalen Wandels: Materialfußabdrücke für Deutschland

#### 5.4.1.1 Betrachtung des Indikators RMC

Der Indikator **RMC (engl. *Raw Material Consumption*, dt. *Rohstoffkonsum*)** berichtet über den **Rohstoffbedarf** einer Volkswirtschaft für Konsum- und Investitionstätigkeiten im Inland. Für eine gegebene Berichtsperiode wird dazu die **Rohstoffmasse der gesamten inländischen letzten Verwendung** (Konsum und Investitionen) einer betrachteten Wirtschaftsregion berechnet. In der wissenschaftlichen Literatur (siehe beispielsweise Wiedmann *et al.* (2013)) wird der RMC oftmals auch als „**Rohstoff-Fußabdruck**“ bezeichnet. Abbildung 81 fasst die Ergebnisse dieses Vorhabens zur Abschätzung des Rohstoffkonsums der Digitalisierung in Deutschland im Jahr 2020 zusammen.



**Abbildung 81: Zusammensetzung des Rohstoff-Fußabdrucks der Digitalisierung (RMC<sub>Dig.</sub>) in Deutschland im Jahr 2020 nach Rohstoffgruppen anteilig an der Primärrohstoffnutzung in Prozent (vgl. Anhang<sup>50</sup> F, Tab. 130)**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Der **RMC<sub>Dig.</sub> in Deutschland** summiert sich gegenwärtig auf annähernd 100 Millionen Tonnen pro Jahr (**95,4 Millionen Tonnen im Jahr 2020**). Fast die Hälfte des gesamtwirtschaftlichen Rohstoffkonsums der Digitalisierung (49 %) entfällt dabei auf die **drei Rohstoffgruppen „Sand und Kies“ (30 %), „Edelmetalle“ (10 %) und „Kupfererze“ (9 %)**. Die Gruppe der nichtmetallischen Mineralien (zu der u. a. auch „Sand und Kies“ gerechnet wird) stellt mit insgesamt fast 41 % die bedeutendste Hauptrohstoffgruppe des gesamtwirtschaftlichen Rohstoffkonsums der Digitalisierung dar.

Während dies zu erwarten war, kann es überraschen, dass die Hauptrohstoffgruppen „Metallerze“ und „fossile Energieträger“ ähnliche Anteile aufweisen. Im Jahr 2020 gingen annähernd

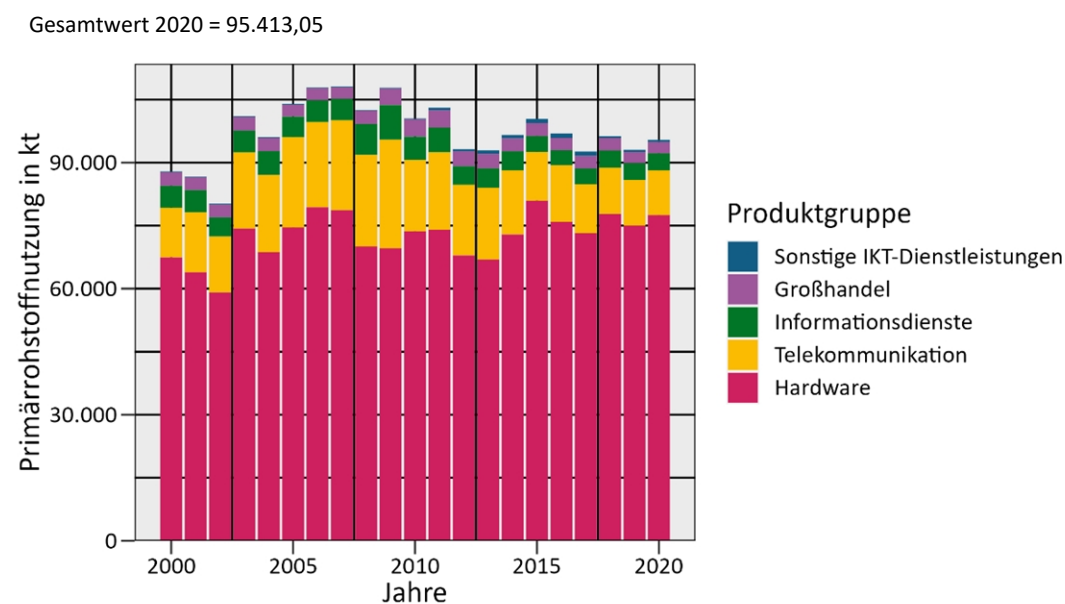
<sup>50</sup> Abraham *et al.* (2023b)

29 % des Rohstoffkonsums der Digitalisierung auf die wirtschaftliche Verwertung von „Metall-erzen“ zurück. Mit knapp 24 % hat der Anteil der Hauptrohstoffgruppe „fossile Energieträger“ am gesamtwirtschaftlichen RMC in Deutschland eine vergleichbare Dimension. Der Anteil biotischer Rohstoffe am  $RMC_{Dig}$  in Deutschland liegt unterhalb von 7 % und erscheint damit im Vergleich zu den übrigen Hauptrohstoffkategorien nachrangig.

Abbildung 82 visualisiert analog die **Berechnungen zum digitalen Rohstoffkonsum (RMC) für die Jahre 2000 bis 2020**. Dargestellt sind die fünf IKT-Güter und -Dienstleistungsgruppen Hardware, Telekommunikation, Informationsdienste, Großhandel und sonstige IKT Dienstleistungen. **Während des gesamten Zeitraums wird die Entwicklung des digitalen Rohstoffkonsums wesentlich durch die Nachfrage nach Hardwareprodukten geprägt**. Der Anteil des Rohstoffkonsums für Hardwareprodukte am gesamten  $RMC_{Dig}$  in Deutschland betrug im langjährigen Mittel ca. 75 %. Im globalen Rezessionsjahr 2009 (welches durch einen drastischen gesamtwirtschaftlichen Rückgang der deutschen Exporte und Investitionen geprägt war), erreicht dieser Anteil mit (nahezu) 65 % einen historischen Tiefstand. **Im Jahr 2020 wurden mehr als 80 % des digitalen Rohstoffkonsums durch die Nachfrage nach Hardwareprodukten verursacht. Im Vergleich hierzu sind den IKT-Dienstleistungen deutlich geringere Werte zuzurechnen**. Auf Telekommunikationsdienstleistungen entfallen dabei die größten verbleibenden Anteile (ca. 11 % im Jahr 2020). Informationsdienstleister sowie der Groß- und Einzelhandel tragen ebenfalls gesamtwirtschaftlich sichtbar zur Entwicklung des  $RMC_{Dig}$  mit bei. Allerdings in einem deutlich geringeren Maße. (Anteil Informationsdienstleistungen am  $RMC_{Dig}$ , 2020: 4,2 %, Großhandels-Anteil: 2,8 %).

Insgesamt ist **von 2000 bis 2020 eine Zunahme des digitalen Rohstoffkonsums** zu erkennen. Von einem Niveau unterhalb von 88 Megatonnen im Jahr 2000 ausgehend, erreicht der digitale Rohstoffkonsum im Jahr 2020 ein Niveau von über 95 Megatonnen. Dies entspricht einem langfristigen **Anstieg um ca. 8,5 % innerhalb des hier betrachteten Zeitraums**.

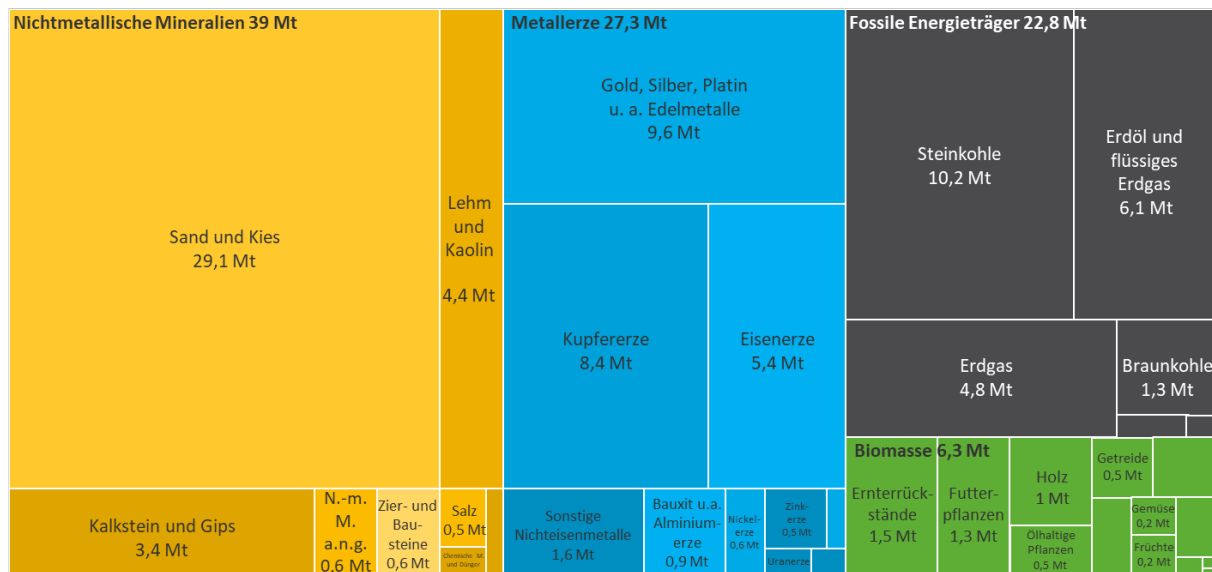
**Abbildung 82: Entwicklung des  $RMC_{Dig}$  für IKT-Güter und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 131)**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 83 weist den RMC<sub>Dig.</sub> in Deutschland im Jahr 2020 in absoluten Werten aus. Von der Darstellung in Abbildung 81 und Abbildung 82 abweichend, erfolgt hier ein strukturierter Ausweis, gegliedert nach Hauptrohstoffgruppen. Die Hauptrohstoffgruppe der nichtmetallischen Mineralien erweist sich dabei mit insgesamt 39 Megatonnen am bedeutendsten. Mit 29,1 Megatonnen dominieren Extraktionen von Sand und Kies die Bedeutung dieses Rohstoffaggregats. Auf die Materialgruppe Metallerze entfallen 27,3 Megatonnen, auf fossile Energieträger 22,8 Megatonnen und auf Biomasse 6,3 Megatonnen.

**Abbildung 83: Aufteilung der Beiträge des digitalen Wandels zum deutschen RMC<sub>Dig.</sub> des Jahres 2020 nach Rohstoffen in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 132)**



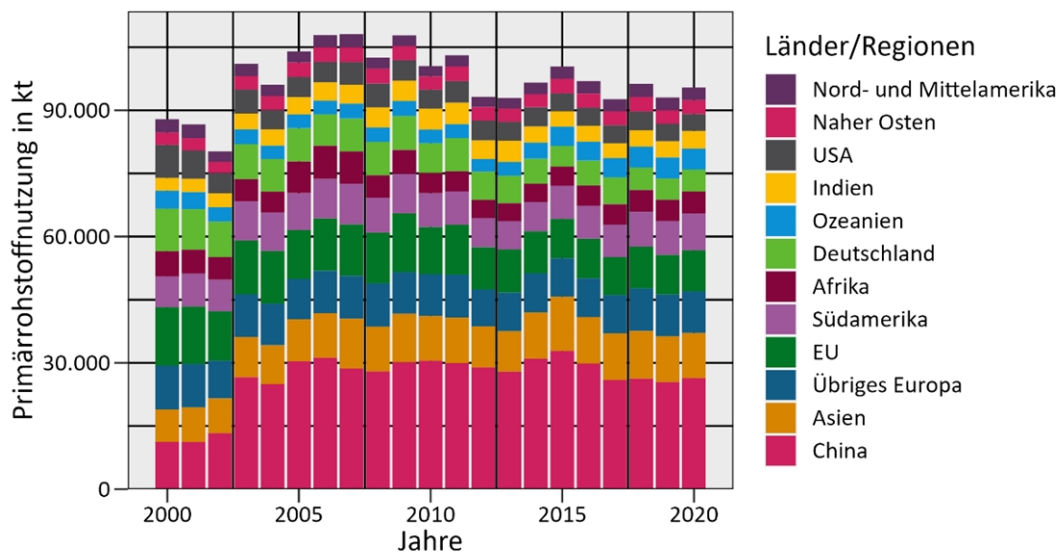
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Annähernd die Hälfte sämtlicher für die Digitalisierung in Deutschland benötigten Rohstoffe wurde im Jahr 2020 in China und dem übrigen Asien extrahiert. Abbildung 84 bietet eine Übersicht der Entwicklung dieser geografischen Verteilung im Zeitablauf. Die Darstellung unterscheidet dabei 12 Weltregionen.

Wie dieser Abbildung entnommen werden kann, haben sich die chinesischen Extraktionen für die Digitalisierung in Deutschland ab Beginn des Beobachtungszeitraums (etwas mehr als 11 Megatonnen im Jahr 2000) mehr als verdoppelt (über 26 Megatonnen im Jahr 2020). **Der Anteil der heimischen Extraktionen in Deutschland hat sich von 2000 bis 2020 hingegen annähernd halbiert**, wobei er anfangs nahezu dem Anteil Chinas entsprach. Daneben werden insbesondere auch in Südamerika, dem übrigen Asien, der EU und dem übrigen Europa deutlich sichtbare Extraktionstätigkeiten für die Digitalisierung in Deutschland beobachtet.

**Abbildung 84: Geografischer Ursprung der Beiträge des digitalen Wandels zum deutschen RMC<sub>Dig.</sub> von 2000 bis 2020 nach Ländern in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 133)**

Gesamtwert 2020 = 95.413,02



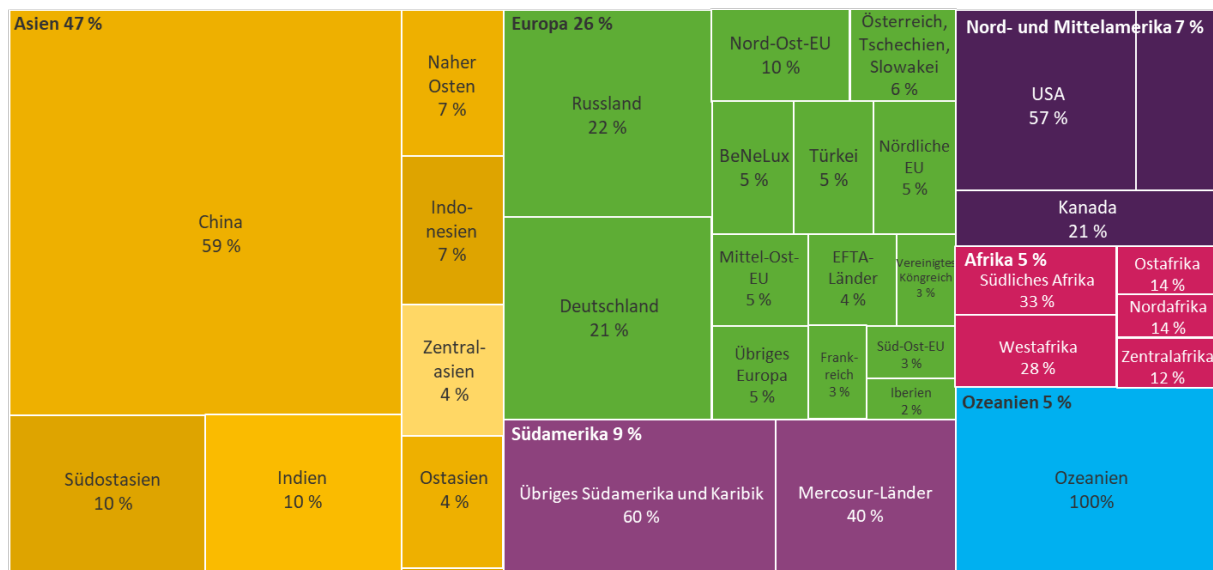
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Bezüglich der Nutzung chinesischer Primärrohstoffe ist bemerkenswert, dass diese nicht stetig angestiegen ist. Stattdessen wird für das Jahr 2003 ein abrupter Anstieg der chinesischen Extraktionen für die Digitalisierung in Deutschland ausgewiesen. Im gegenständigen Vorhaben wurde keine weitergehende Analyse entsprechender Detailergebnisse vorgenommen.

Die geografische Aufteilung der Beiträge des digitalen Wandels zum RMC<sub>Dig.</sub> des Jahres 2020 ist in Abbildung 85 dargestellt. Die Aufteilung ist unterteilt in die sechs Weltregionen Asien, Europa, Nord- und Mittelamerika, Afrika, Südamerika und Ozeanien. Asien verzeichnet 47 %, wobei China mit 59 % den größten Anteil hat. Der anteilige Wert Europas liegt bei 26 %. Deutschland und Russland haben hier mit jeweils über 20 % den bedeutsamsten Anteil am Aggregat. Die Regionen Südamerika, Nord- und Mittelamerika, Afrika sowie Ozeanien erreichen Anteile unter 10 %.

Insgesamt zeigen diese Abbildungen, dass die **Entwicklung der Digitalisierung in Deutschland zunehmend auf einer Nutzung außereuropäischer, insbesondere asiatischer Rohstoffe angewiesen**. Diese Entwicklung wird **wesentlich durch den bereits in Abbildung 84 gezeigten deutlichen Anstieg der Verwendung von IKT-Gütern aus asiatischer Herstellung getrieben**.

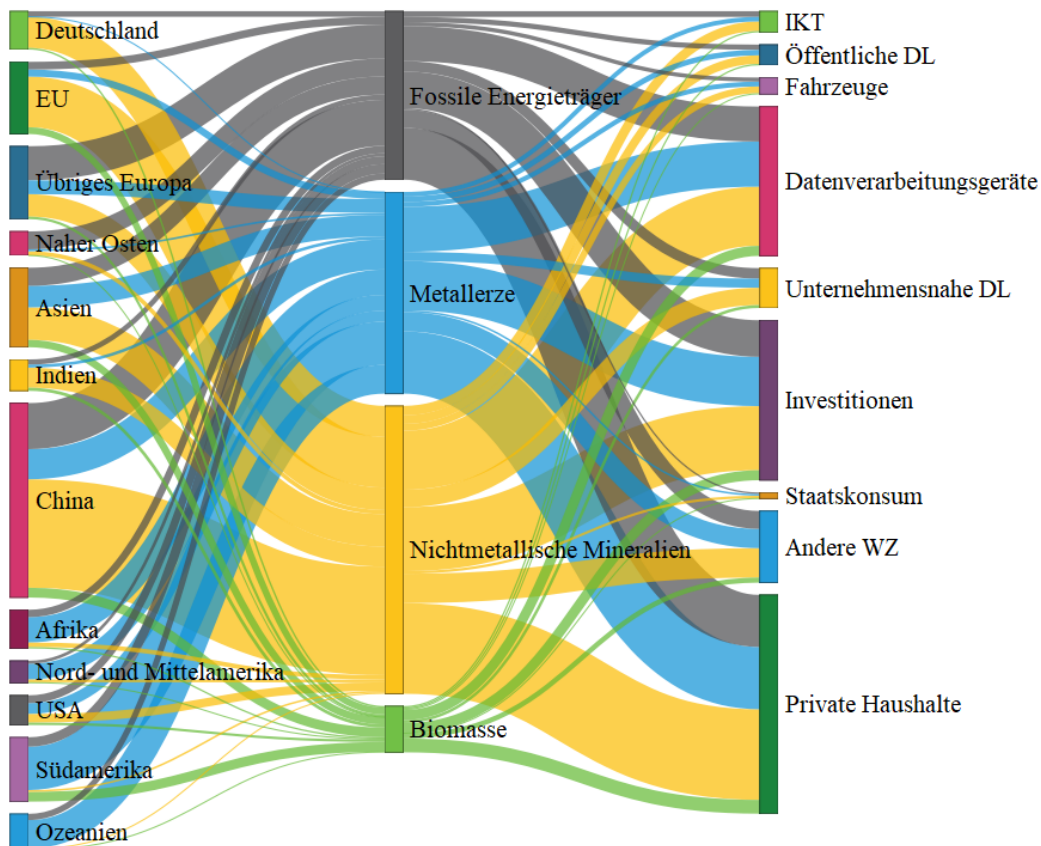
**Abbildung 85: Geografische Aufteilung der Beiträge des digitalen Wandels zum RMC<sub>Dig.</sub> des Jahres 2020 nach Ländern anteilig am Gesamtbetrag in Prozent (vgl. Anhang F, Tab. 134)**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 86 differenziert den RMC<sub>Dig.</sub> im Jahr 2020 nach geografischem Ursprung (links), nach Rohstoffgruppen (Mitte) sowie nach inländischen Verwendungszwecken (rechts). In der Darstellung werden zwölf Weltregionen, neun Verwendungszwecke und vier Rohstoffgruppen unterschieden. Unter den im rechten Abbildungsbereich ausgewiesenen Verwendungszwecken können wiederum der private Konsum („private Haushalte“) und die Bruttoinvestitionen („Investitionen“) als wichtigste Nachfragegruppen der letzten inländischen Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen im Inland identifiziert werden. Unter den in dieser Abbildung ebenfalls ausgewiesenen Vorleistungsnachfragen sticht wiederum die Vorleistungsnachfrage des Wirtschaftsbereichs „Datenverarbeitungsgeräte“ hervor. Die Anteile der vier Hauptrohstoffgruppen Fossile Energieträger, Metallerze, nichtmetallische Mineralien und Biomasse am jeweiligen Rohstoffkonsum der ausgewiesenen Nachfragegruppen entsprechen den zuvor vorgestellten gesamtwirtschaftlichen Strukturen.

**Abbildung 86: Geografischer Ursprung, Rohstoffgruppen und Verwendungen des RMC<sub>Dig.</sub> des digitalen Wandels im Jahr 2020, gemessen in Tonnen (vgl. Anhang F, Tab. 135)**



Quelle: Eigene Berechnungen und Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

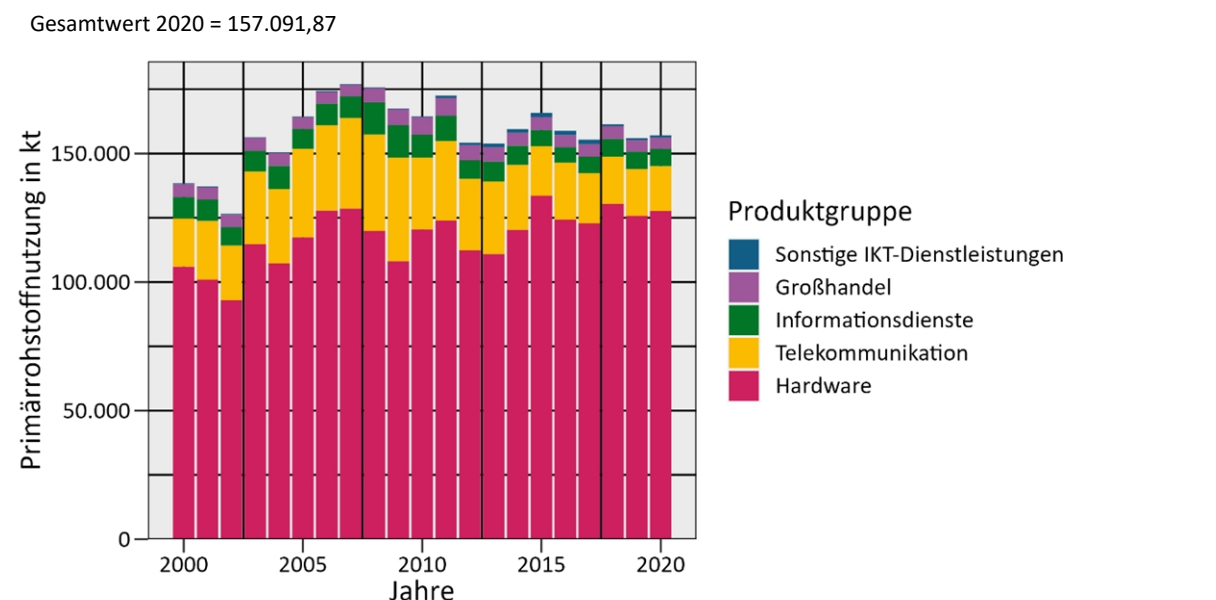
Besonders aufschlussreich ist die anhand dieser Darstellung nachvollziehbare geografische Herkunft der jeweils verwendeten Rohstoffgruppen: Fossile Energieträger werden vorrangig in China genutzt (ca. 6.235 Kilotonnen). Weiterhin können hier europäische Regionen außerhalb der EU, der Nahe Osten und Asien aufgelistet werden. Diese Rohstoffnutzungen sind in erster Linie auf die zur Herstellung von IKT-Gütern in den benannten Weltregionen genutzten Energiesysteme zurückzuführen. Die für die Digitalisierung in Deutschland genutzten Metallerze stammen in erster Linie aus Südamerika (etwa 5.883 Kilotonnen). Weitere zu nennende Länder/Regionen sind Afrika, China, Ozeanien sowie Nord- und Mittelamerika. Nichtmetallische Mineralien werden zu deutlichen Anteilen auch in Deutschland sowie sonstigen europäischen Regionen extrahiert. Insgesamt dominieren allerdings Rohstoffextraktionen in China (ca. 14.704 Kilotonnen) das gesamte Aufkommen an nichtmetallischen Mineralien für die Digitalisierung in Deutschland. Die Nutzung von Biomasse für die Digitalisierung in Deutschland ist im Vergleich zur Nutzung der übrigen Hauptrohstoffgruppen relativ unbedeutend. Die diesbezüglich genutzten Biomasseextraktionen stammen in erster Linie aus Südamerika (etwa 1.318 Kilotonnen) und außerdem aus China und dem restlichen Asien sowie der EU.

### 5.4.1.2 Betrachtung des Indikators RMI

Der Indikator **RMI** (engl. *Raw Material Input*, dt. **Rohstoffeinsatz**) betrachtet die **Input-Seite einer Volkswirtschaft**, indem er über die **Masse sämtlicher Rohstoffinputs** einer betrachteten Wirtschaftsregion berichtet. Hierfür berechnet er die Summe sämtlicher im Inland direkt verwerteter Rohstoffextraktionen (inländische Extraktionen plus direkt aus dem Ausland importierte Rohstoffe) zuzüglich der Rohstoffäquivalente sämtlicher importierter Güter und Dienstleistungen. In Kapitel 4.2.3 wurde bereits erläutert, wie sich der Indikator RMI von dem zuvor betrachteten Indikator RMC unterscheidet: Der Indikator RMI berücksichtigt auch sämtliche für die Herstellung exportierter Güter und Dienstleistungen genutzten Rohstoffextraktionen. In empirischen Anwendungen hat der Indikator RMI daher üblicherweise einen höheren Wert als der Indikator RMC.

**Der RMI<sub>Dig.</sub> ist zwischen den Jahren 2000 bis 2020 um annähernd 13,5 % angestiegen** (Abbildung 87). Mit einem Gesamtwert von (etwas weniger als) 160 Megatonnen **übersteigt er den RMC<sub>Dig.</sub> in Deutschland um mehr als 60 Megatonnen.**

**Abbildung 87: Entwicklung des RMI<sub>Dig.</sub> für IKT-Güter und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen in Kilotonnen**



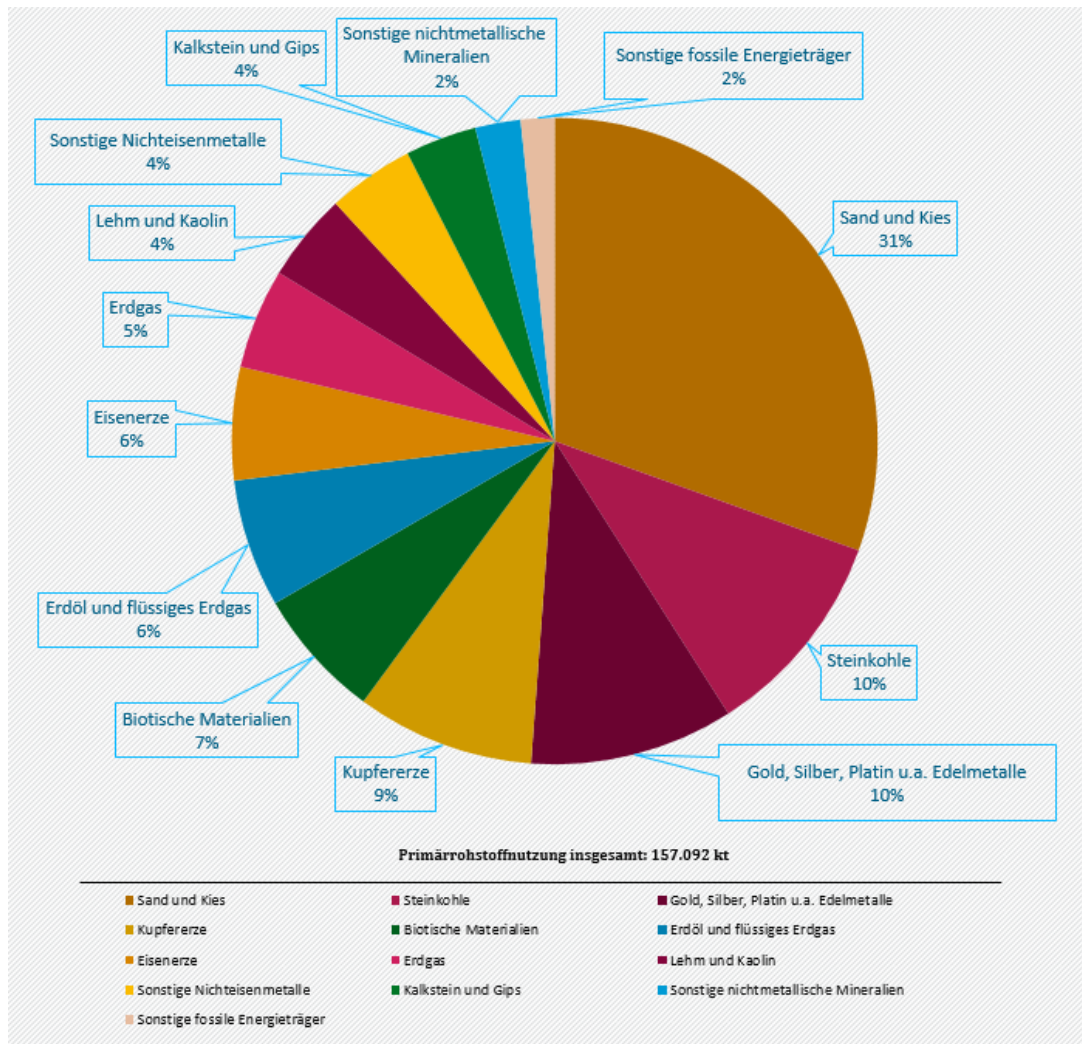
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Wie zuvor bei der Darstellung der Entwicklung des RMC<sub>Dig.</sub>, werden in Abbildung 87 die Beiträge der Verwendung von IKT-Produktgruppen zur Entwicklung des RMI des digitalen Wandels dargestellt. **Während sich die Beiträge der IKT-Dienstleistungen langfristig leicht rückläufig entwickelten, stieg der deutsche RMI<sub>Dig.</sub> aufgrund der Verwendung von Hardwareprodukten zwischen den Jahren 2000 bis 2020 um über 21 Megatonnen an. Während der RMI<sub>Dig.</sub> im Jahr 2000 bereits zu über 76 % durch die Verwendung von Hardwareprodukten verursacht wurde, stieg dieser Anteil bis zum Jahr 2020 auf über 81 %.** Die relative Bedeutung der Nutzung von IKT-Dienstleistungen für den deutschen RMI<sub>Dig.</sub> hat sich folglich im Zeitablauf reduziert. Wie zuvor bei der Betrachtung des RMC<sub>Dig.</sub>, **entfallen dabei die größten Dienstleistungsanteile auf Telekommunikationsdienstleistungen.**

Die Zusammensetzung des Rohstoffeinsatzes der Digitalisierung in Deutschland im Jahr 2020 wird in Abbildung 88 dargestellt. Die Nutzung von Sand und Kies dominiert den RMI<sub>Dig.</sub> in Deutschland deutlich. Der Anteil dieser Rohstoffgruppe betrug im Jahr 2020 31 %. Die Nutzung

von Steinkohle sowie von Gold, Silber, Platin und anderen Edelmetallen trug im Jahr 2020 zu jeweils 10 % zum  $RMI_{Dig}$  in Deutschland bei. Dicht gefolgt von den Kupfererzen mit 9 %. Die individuellen Anteile der restlichen Rohstoffgruppen betragen jeweils weniger als 8 %, wobei die Anteile der sonstigen fossilen Energieträger und sonstigen nichtmetallischen Mineralien lediglich 2 % ausmachen. Im Vergleich mit Abbildung 81 fällt auf, dass sich die Anteile der verschiedenen Rohstoffgruppen stark ähneln. Die Anteilswerte vieler Rohstoffgruppen sind identisch und wenn Unterschiede vorliegen, betragen diese lediglich 1 %.

**Abbildung 88: Zusammensetzung des  $RMI_{Dig}$  in Deutschland im Jahr 2020 nach Rohstoffgruppen**



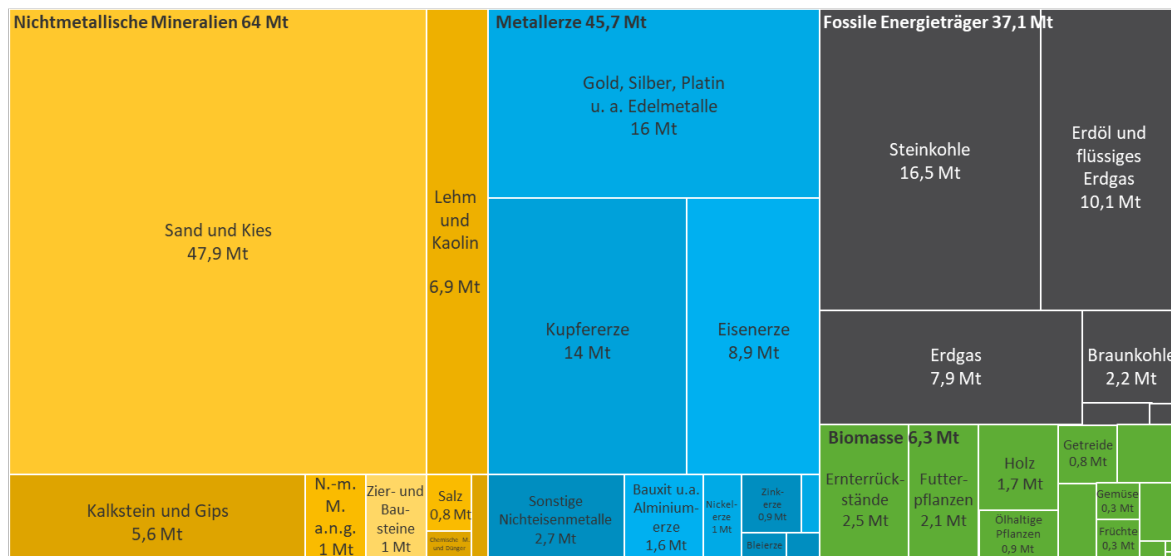
**anteil an der Primärrohstoffnutzung in Prozent (vgl. Anhang F, Tab. 136)**

Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Im Jahr 2020 summieren sich die  $RMI_{Dig}$ -Anteile der Rohstoffgruppe Sand und Kies auf annähernd 48 Megatonnen (Abbildung 89). Mit dieser Masse trägt die Rohstoffgruppe Sand und Kies mehr Gewicht zum  $RMI_{Dig}$  bei als sämtliche insgesamt genutzte Metallerze (45,7 Megatonnen). Gold-, Silber-, Platin- und andere Edelmetalle (16 Megatonnen) erweisen sich dabei in der Gruppe der Metallerze als ähnlich bedeutend wie Kupfererze (14 Megatonnen). Steinkohle bildet mit 16,5 Megatonnen den größten Teil der fossilen Energieträger, die mit insgesamt 37,1 Megatonnen zu Buche schlagen. Der Gesamtanteil biotischer Rohstoffe summiert sich auf lediglich 10,3 Megatonnen.



**Abbildung 89: Aufteilung der Beiträge des digitalen Wandels zum deutschen RMI<sub>Dig.</sub> des Jahres 2020 nach Rohstoffen in Millionen Tonnen (vgl. Anhang F, Tab. 137)**

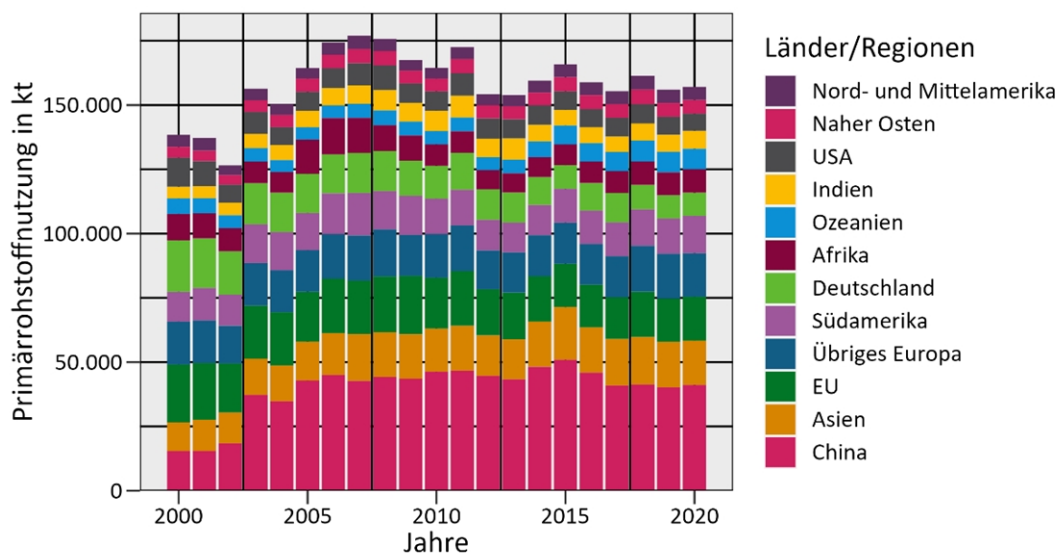


Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Bezüglich der genutzten Rohstoffe unterscheiden sich die Strukturen des RMI<sub>Dig.</sub> damit nicht wesentlich von den Strukturen des RMC<sub>Dig.</sub>. Ähnliches gilt bei der Betrachtung der geografischen Ursprünge der genutzten Primärrohstoffe. Ein überwiegender Anteil, der im RMI<sub>Dig.</sub> erfassten Rohstoffinanspruchnahmen, wird in China extrahiert. Die Bedeutung der Extraktionstätigkeiten in China für die Digitalisierung in Deutschland hat dabei in den vergangenen 20 Jahren deutlich zugenommen: Im Jahr 2020 basierten ca. 41 Megatonnen des RMI<sub>Dig.</sub> auf einer Nutzung chinesischer Extraktionen (Abbildung 90). Im Vergleich zum Ausgangswert des Jahres 2000 (etwas mehr als 15 Megatonnen) entspricht dies einer Steigerung um über 166 %.

**Abbildung 90: Geografischer Ursprung der Beiträge des digitalen Wandels zum deutschen RMI<sub>Dig.</sub> von 2000 bis 2020 nach Ländern in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 138)**

Gesamtwert 2020 = 157.091,86

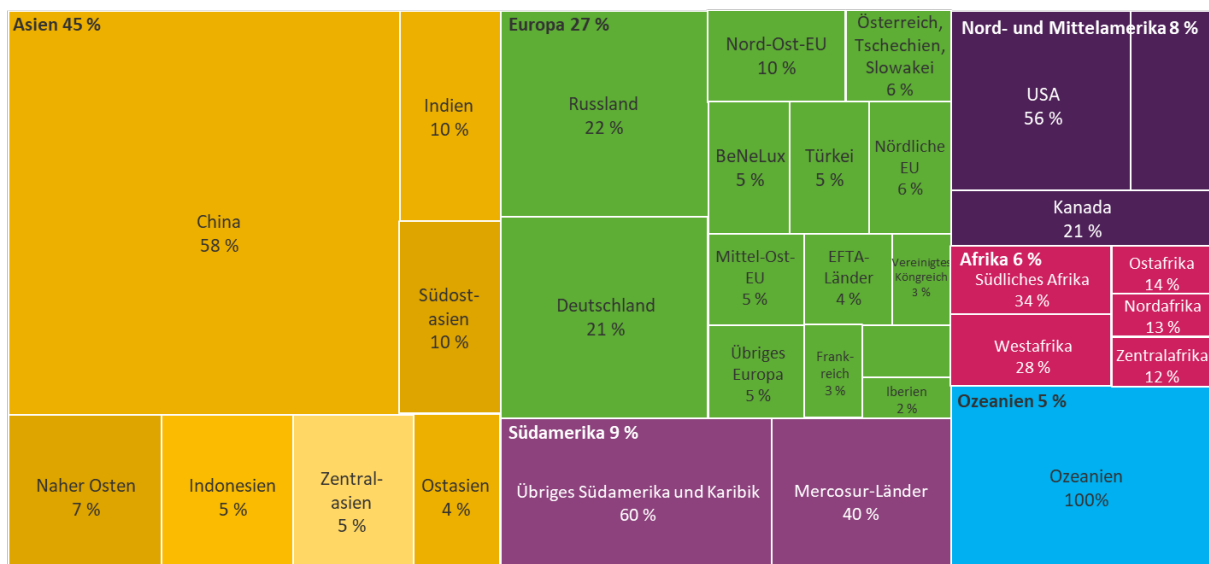


Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die Masse der in Deutschland für die Digitalisierung extrahierten Rohstoffe ist im gleichen Zeitraum deutlich zurückgegangen. Mit annähernd 20 Megatonnen überstieg Deutschlands Beitrag zum  $RMI_{Dig}$  im Jahr 2000 noch den chinesischen Beitrag. Bis zum Jahr 2020 wurden diese Extraktionen allerdings um etwa die Hälfte reduziert. Außerdem haben Südamerika, übrige asiatische Staaten, die EU und das übrige Europa nennenswert hohe Anteile.

Insgesamt werden die meisten im  $RMI_{Dig}$  erfassten Rohstoffe in Asien extrahiert. Die geografische Aufteilung der Beiträge des digitalen Wandels zum  $RMI_{Dig}$  des Jahres 2020 sind in Abbildung 91 dargestellt. Dabei werden Asien, Europa, Nord- und Mittelamerika, Südamerika, Afrika und Ozeanien unterschieden. In Asien hat China mit 58 % mit Abstand den größten Anteil. Asien trägt insgesamt 45 % bei. Der Beitrag Europas beträgt 27 %, wobei hier Russland und Deutschland mit jeweils über 20 % am wichtigsten sind. Der Beitrag der anderen Kontinente liegt jeweils unter 10 % (Südamerika 9 %, Nord- und Mittelamerika 8 %, Afrika 6 % und Ozeanien 5 %).

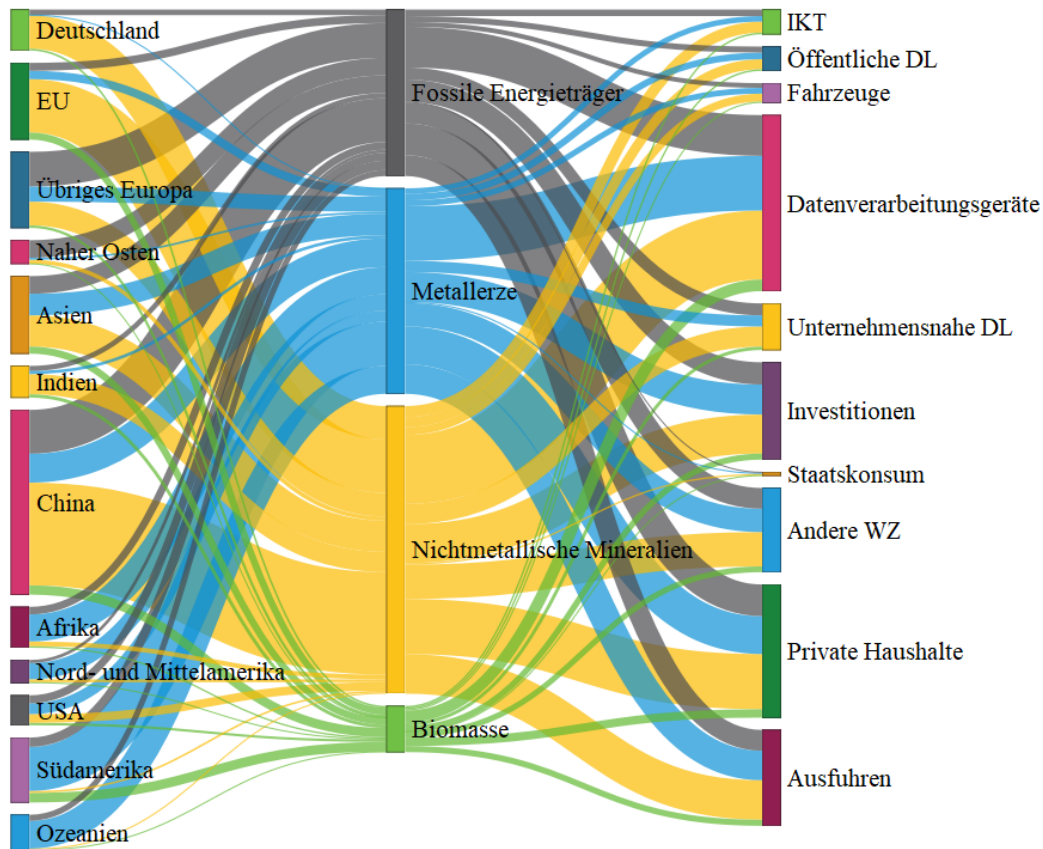
**Abbildung 91: Geografische Aufteilung der Beiträge des digitalen Wandels zum  $RMI_{Dig}$  des Jahres 2020 nach Ländern anteilig am Gesamtbetrag in Prozent (vgl. Anhang F, Tab. 139)**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 92 nimmt für den  $RMI_{Dig}$  eine Zuordnung nach Hauptrohstoffgruppen, geografischem Ursprung (zwölf Länder) und zehn Verwendungen vor. Die Abbildung identifiziert die Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, den Konsum privater Haushalte, Investitionen, Exporte sowie andere Wirtschaftszweige als wesentliche Entwicklungsgrößen des  $RMI_{Dig}$ : Im Jahr 2020 entfielen ca. 24,9 % des  $RMI_{Dig}$  auf die Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten. 18,9 % des  $RMI_{Dig}$  waren auf die Konsumausgaben privater Haushalte für IKT-Produkte zurückzuführen. Der Anteil der Bruttoinvestitionen (13,8 %) entsprach nahezu dem Anteil der Exportnachfrage (13,6 %). Im Kontext der Digitalisierung werden fossile Energieträger insbesondere in China eingesetzt (etwa 9.777 Kilotonnen), und außerdem im übrigen Europa, dem Nahen Osten sowie Asien. Die eingesetzten Metallerze werden überwiegend in Südamerika extrahiert (ca. 9.841 Kilotonnen). Weitere zu nennende Länder sind China, Ozeanien, Afrika und Asien. Die Extraktionen nichtmetallischer Mineralien finden überwiegend in China statt (etwa 22.861 Kilotonnen), aber auch in der EU, Asien, Deutschland, dem übrigen Europa und Indien. Die (nur in deutlich geringerem Maße im Kontext der Digitalisierung ebenfalls eingesetzten) biotischen Rohstoffe werden überwiegend in Südamerika (ca. 2.134 kt) und weiterhin in China, Asien und der EU extrahiert.

**Abbildung 92: Geografischer Ursprung, Rohstoffgruppen und Verwendungen des RMI<sub>Dig.</sub> des digitalen Wandels im Jahr 2020, gemessen in Tonnen (vgl. Anhang F, Tab. 140)**



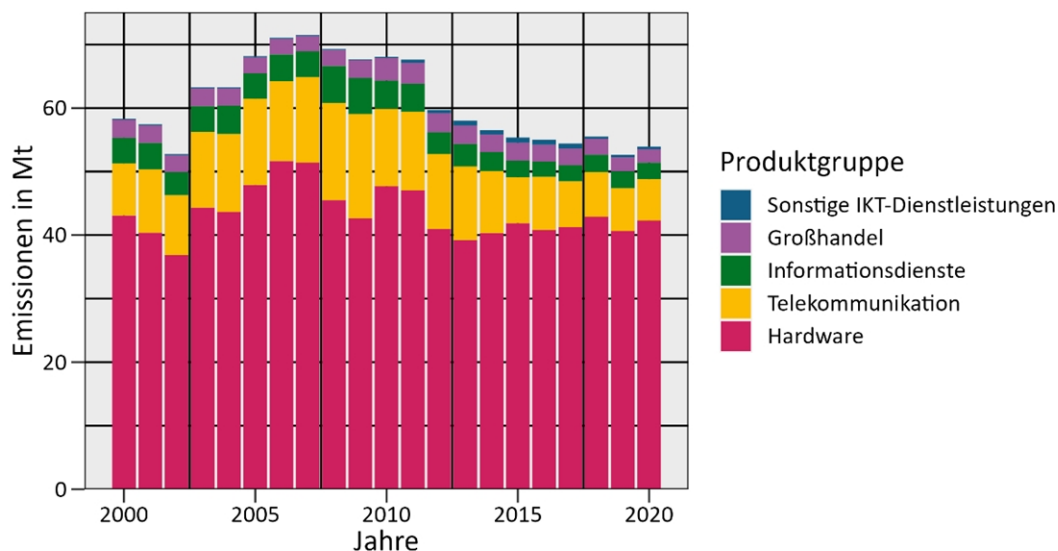
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

#### 5.4.2 Umweltökonomische Entwicklungen des digitalen Wandels: CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke für Deutschland

Die Berechnung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks ähnelt konzeptionell weitestgehend der Berechnung des RMC. Während der Indikator RMC für eine gegebene Berichtsperiode und Wirtschaftsregion die Rohstoffmasse der gesamten inländischen letzten Verwendung unter Berücksichtigung sämtlicher Lieferketten der im Inland für Konsum- und Investitionszwecke verwendeten Produkte berichtet, berichtet der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck unter Berücksichtigung sämtlicher Lieferketten über die im Zuge der Bereitstellung der im Inland für Konsum- und Investitionszwecke verwendeten Produkte anfallenden CO<sub>2</sub>-Emissionen. Abbildung 93 illustriert den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Digitalisierung (CO<sub>2,Dig.</sub>) in Deutschland anhand fünf verschiedener Produktgruppen.

**Abbildung 93: Emissionen des CO<sub>2,Dig.</sub> in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Produktgruppen in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 141)**

Gesamtwert 2020 = 53,92



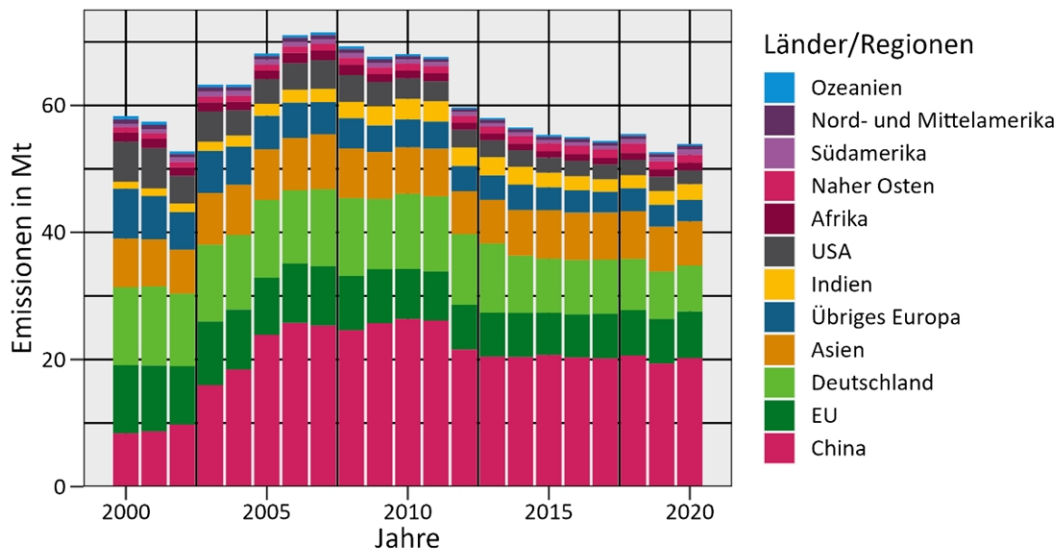
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Wie bereits zuvor bei der Betrachtung der Rohstoffindikatoren  $RMC_{Dig.}$  und  $RMI_{Dig.}$  zeigt sich, dass der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland überwiegend durch die Nachfrage nach Hardwareprodukten getrieben wird. Die diesbezüglichen CO<sub>2</sub>-Emissionen haben sich langfristig zwischen den Jahren 2000 (43,1 Megatonnen) und 2020 (42,3 Megatonnen) leicht rückläufig entwickelt. Im Vergleich hierzu werden durch sämtliche nachgefragte IKT-Dienstleistungen deutlich weniger CO<sub>2</sub>-Emissionen verursacht. Der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der IKT-Dienstleistungen wurde zudem im analysierten Zeitraum deutlicher reduziert (2000: 15,2 Megatonnen, 2020: 11,6 Megatonnen). Unter den IKT-Dienstleistungen erweist sich die Nachfrage nach Telekommunikationsdienstleistungen als größter Verursacher von CO<sub>2</sub>-Emissionen: Im Jahr 2020 summierte sich der CO<sub>2,Dig.</sub> der Telekommunikationsdienstleistungen in Deutschland insgesamt auf 6,5 Megatonnen. Im Vergleich hierzu erweisen sich die CO<sub>2,Dig.</sub> der übrigen IKT-Dienstleistungen als deutlich geringer. Im Vergleich zu den zuvor betrachteten Rohstoffindikatoren (vgl. hierzu bspw. Abbildung 87) kann für den CO<sub>2,Dig.</sub> bis zum Jahr 2010 eine ähnliche Entwicklung festgestellt werden. Danach entwickelt sich der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck aber, im Gegensatz zu den Rohstoffindikatoren, langfristig rückläufig.

Im Vergleich zu den zuvor betrachteten Rohstoffindikatoren ist ein **deutlich höherer Anteil heimischer Emissionen** kennzeichnend für die regionale Verteilung der CO<sub>2</sub>-Fußabdrücke: Die in Deutschland durch die Digitalisierung im Jahr 2020 freigesetzten CO<sub>2</sub>-Emissionen repräsentieren einen Anteil von 13,4 % am gesamten CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Digitalisierung. Weitere 13,6 % des gesamten CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Digitalisierung beruhen auf Emissionen in sonstigen EU-Mitgliedsländern (Abbildung 94).

**Abbildung 94: Geografischer Ursprung der CO<sub>2</sub>-Emissionen der Digitalisierung in Deutschland von 2000 bis 2020 nach Ländern in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 142)**

Gesamtwert 2020 = 53,92



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die EU-weiten CO<sub>2</sub>-Emissionen der Digitalisierung werden regional lediglich von den in China verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen übertroffen. Im Jahr 2020 summierten sich die chinesischen CO<sub>2</sub>-Emissionen absolut auf 20,2 Megatonnen. Dies entspricht einem Anteil von 37,5 % am gesamten CO<sub>2,Dig.</sub> Interessant ist dabei die Beobachtung, dass die chinesischen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2010 mit 26,4 Megatonnen einen absoluten Höchststand erreichten. Im Vergleich hierzu wurden die chinesischen Beiträge zum CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland bis 2020 um 23,3 % reduziert.

## 5.5 Zusammenfassung und Fazit

### 5.5.1 Zusammenfassende Anmerkungen zu den umweltökonomischen Befunden

Die für die makroökonomischen Berechnungen gewählte institutionelle Abgrenzung des Systems „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“ (Kapitel 3) erweitert das klassische Konzept umweltökonomischer Fußabdruck-Bewertungen um eine zusätzliche Berücksichtigung der globalen Umweltintensitäten direkter und indirekter Vorleistungsnachfragen sämtlicher heimischer Wirtschaftszweige nach IKT-Gütern und Dienstleistungen. Zur Einordnung der quantitativen Einflüsse dieser konzeptionellen Erweiterung auf die zuvor vorgestellten Fußabdruck-Bewertungen, werden an dieser Stelle abschließend die jeweiligen Beiträge der erfassten Nachfragekomponenten zur Entwicklung der analysierten Schlüsselindikatoren näher betrachtet.

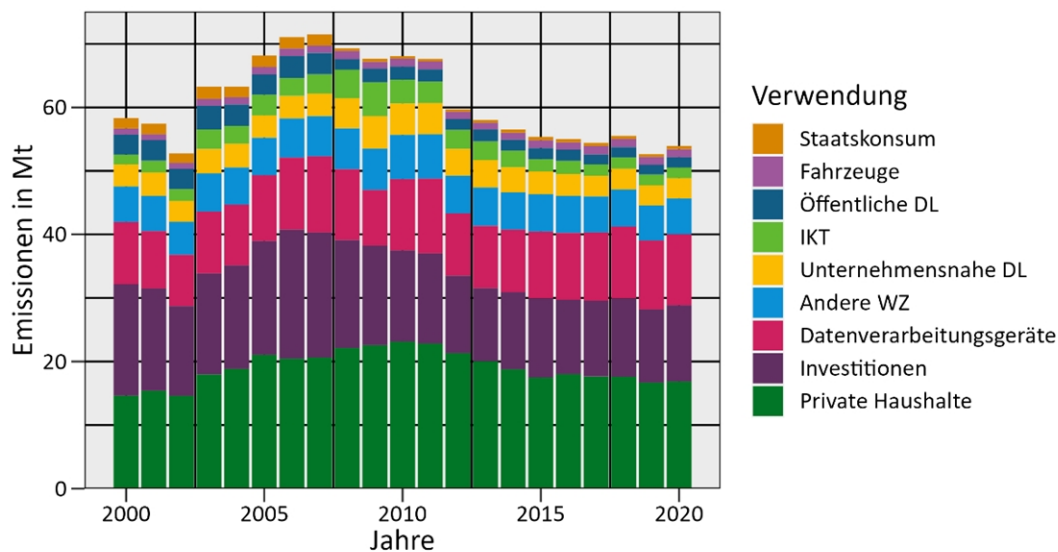
In der folgenden Abbildung 95 werden hierzu zunächst die Einflüsse sämtlicher gesamtwirtschaftlicher Nachfragekomponenten auf die Entwicklung des  $\text{CO}_{2,\text{Dig}}$  in Deutschland dargestellt. Zu erkennen ist, dass die Entwicklung dieses Indikators im gesamten Analysezeitraum überwiegend durch die heimische Endnachfrage (Staatskonsum, Investitionen und Konsum privater Haushalte in Deutschland) geprägt wird. Die Endnachfrage für Investitionszwecke sowie den Konsum privater Haushalte verursachen gemeinsam über 50 % des gesamten  $\text{CO}_{2,\text{Dig}}$  in Deutschland (2000: 55,2 %, 2020: 53,5 %). Die absoluten Beiträge dieser Nachfragegruppen zum  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck sind tendenziell bis zur Mitte des Analysezeitraums angestiegen, entwickeln sich seitdem allerdings rückläufig: Zwischen 2010 und 2020 wurde der  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck des privaten Konsums um -27,2 % reduziert. Die Beiträge der Investitionsnachfrage zum  $\text{CO}_{2,\text{Dig}}$  wurden – ausgehend von einem Höchststand in Jahr 2006 – bis zum Jahr 2020 um -40,8 % reduziert.

Gemäß der in diesem Vorhaben durchgeführten Berechnungen wurde der gesamtwirtschaftliche  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck Deutschlands zwischen den Jahren 2010 und 2020 um ca. -16,5 % und zwischen den Jahren 2006 und 2020 um ca. -18,8 % reduziert. Die in jüngerer Vergangenheit beobachtete Reduktion der Beiträge der privaten Konsumnachfrage sowie der Bruttoinvestitionen zum  $\text{CO}_{2,\text{Dig}}$  sind somit als überdurchschnittlich zu beurteilen. Gleichwohl muss allerdings darauf hingewiesen werden, dass das absolute Niveau der  $\text{CO}_2$ -Emissionen des privaten Konsums digitalisierungsrelevanter Güter und Dienstleistungen im Jahr 2020 (16,9 Millionen Tonnen) den Ausgangswert des Jahres 2000 (14,6 Millionen Tonnen) noch deutlich übertraf.

Daneben ist allerdings bemerkenswert, dass der gesamte  $\text{CO}_{2,\text{Dig}}$  in Deutschland zwischen den Jahren 2000 und 2020 lediglich um -7,6 % reduziert werden konnte. Hieraus resultiert ein langfristig steigender Anteil des  $\text{CO}_{2,\text{Dig}}$  am gesamte  $\text{CO}_2$ -Fußabdruck Deutschlands: Gemäß unserer Berechnungsweise summierten sich die der globalen Verwendung von IKT-Gütern und Dienstleistungen für die heimische Endnachfrage sowie der Vorleistungsnachfragen heimischer Wirtschaftszweige zurechenbaren globalen  $\text{CO}_2$ -Emissionen im Jahr 2000 zu einem Wert, welcher (mehr als) 5,1 % des gesamten deutschen  $\text{CO}_2$ -Fußabdrucks entsprach. Bis zum Jahr 2020 ist dieser Anteil auf (nahezu) 5,7 % angestiegen. Der Anteil IKT-relevanter Vorleistungsnachfragen ist dabei im Zeitverlauf von 2,2 % auf (annähernd) 2,6 % angestiegen. In einem wesentlichen Umfang ist diese Entwicklung auf die  $\text{CO}_2$ -Emissionen der globalen Vorleistungsnachfrage zur Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten zurückzuführen. Von einem Niveau von ca. 9,8 Millionen Tonnen im Jahr 2000 ausgehend, ist dieser Beitrag zum  $\text{CO}_{2,\text{Dig}}$  in Deutschland bis zum Jahr 2020 auf nahezu 11,2 Millionen Tonnen angestiegen.

**Abbildung 95: Emissionen des CO<sub>2,Dig.</sub> in Deutschland von 2000 bis 2020 nach nachfragenden Wirtschaftsbereichen in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 143)**

Gesamtwert 2020 = 53,92



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die für die Endnachfrage in Deutschland durch die globale Produktion digitalisierungsrelevanter Güter und Dienstleistungen freigesetzten CO<sub>2</sub>-Emissionen erreichen im gesamten Zeitraum Anteilswerte in einer Größenordnung von ca. 3 % des gesamten deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks. Dieses Ergebnis ist bemerkenswert: Bisherige Studien zur Abschätzung von Emissionsintensitäten der Digitalisierung basieren in der Regel auf „Bottom-up“-Ansätzen. In einer jüngeren Meta-Studie zeigen Freitag *et al.* (2021), dass entsprechende Bewertungen den Anteil der globalen Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen am sämtlichen Treibhausgasemissionen des Jahres 2020 auf 1,8 % bis 2,8 % schätzen. Freitag *et al.* (2021) kritisieren dabei zu Recht, dass die von ihnen begutachteten Studien keine vollständige Bewertung volkswirtschaftlicher Lieferketten vornehmen. Die in der Herstellungsphase der analysierten IKT-Güter und Dienstleistungen insgesamt verursachten Emissionen werden folglich in den von Freitag *et al.* (2021) begutachteten „Bottom-up“-Analysen systematisch unterschätzt. Unter ergänzenden Anwendungen von Input-Output-Tabellen für das Vereinigte Königreich schätzen Freitag *et al.* (2021) daher, dass sich die vollständigen Anteile der globalen Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen auf 2,1 % bis 3,9 % sämtlicher Treibhausgasemissionen summieren. Gemäß ihren Berechnungen werden davon ca. 30 % während der Herstellungsphase verursacht. Die eigenen Abschätzungen der Beiträge globaler IKT-Herstellungsprozesse zum gesamten deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (ca. 3 %) weichen somit deutlich von den in den Berechnungen von Freitag *et al.* (2021) implizierten globalen Durchschnittswerten (ca. 0,6 % bis 1,2 %) ab.

Die hier angesprochenen Abweichungen der eigenen Bewertungsergebnisse von früheren Studienergebnissen können methodisch sehr gut nachvollzogen werden. Freitag *et al.* (2021) weisen sorgfältig darauf hin, dass ihre Berechnungen lediglich als grobe Abschätzungen verstanden werden sollten, welche mit deutlichen Unsicherheiten behaftet sind. Dies betrifft nicht zuletzt die ausschließliche Verwendung von Input-Output-Tabellen für das Vereinigte Königreich in den ergänzenden Zurechnungen der entlang gesamtwirtschaftlicher Lieferketten auftretenden Emissionen. Wie bereits in Kapitel 5.2.1.2 erläutert wurde, werden bei einer solchen Anwendung der *domestic technology assumption* regional variierende Produktions-

strukturen nicht berücksichtigt: Freitag *et al.* (2021) unterstellen, dass IKT-Güter und Dienstleistungen in sämtlichen Volkswirtschaften der Welt mit einheitlichen Emissionsintensitäten hergestellt werden. Die eigenen MRIO-basierten Berechnungen berücksichtigen hingegen explizit, dass bspw. die chinesische Volkswirtschaft im Vergleich zu europäischen Volkswirtschaften durch wesentlich höhere CO<sub>2</sub>-Intensitäten charakterisiert ist (siehe hierzu bspw. Liu *et al.* 2022). Daher eignet sich auch nur dieser Berechnungsansatz zur Bewertung regionaler Emissionsanteile. Unseren Befund, dass allein durch Herstellungsprozesse in China bereits ca. 37,5 % des deutschen CO<sub>2,Dig.</sub> verursacht werden, interpretieren wir daher als einen wichtigen Beitrag zur Einordnung früherer, die globalen Emissionsintensitäten der Herstellung von IKT-Gütern und Dienstleistungen systematisch unterschätzende „*Bottom-up*“-Ansätze.

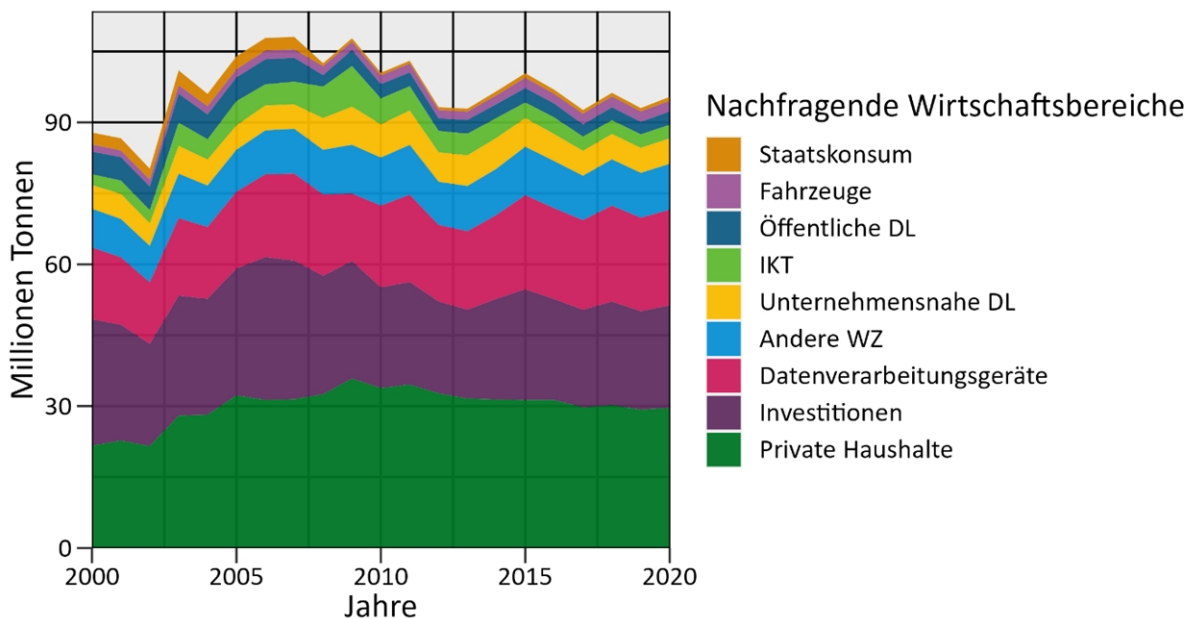
In ähnlicher Weise zeigen Nachfrageanalysen des RMC<sub>Dig.</sub> in Deutschland, dass der Gesamtwert dieses Indikators überwiegend durch die heimische Endnachfrage beeinflusst wird. Insgesamt summierte sich die der gesamten heimischen Endnachfrage (Staatskonsum, Investitionen und Konsum privater Haushalte in Deutschland) zuzurechnende Rohstoffinanspruchnahme der Digitalisierung im Jahr 2020 auf annähernd 52,2 Millionen Tonnen. Von einem Niveau in Höhe von 50,9 Millionen Tonnen im Jahr 2020 ausgehend, ist dieser „klassische Anteil“ des RMC<sub>Dig.</sub>-Indikators durch ein schwaches langfristiges Wachstum geprägt (Abbildung 96). Der IKT-Anteil der heimischen Endnachfrage am gesamten deutschen RMC ist von annähernd 2,5 % im Jahr 2000 auf etwas mehr als 3 % im Jahr 2020 angestiegen.

Der Anteilswert für das Jahr 2020 kann inhaltlich mit den Schätzungen des Materialbedarfs der heimischen Endnachfrage nach IKT-relevanten Gütergruppen und Dienstleistungen im UBA-Ressourcenbericht für Deutschland (Lutter *et al.*, 2022; Lutter *et al.*, 2023) verglichen werden. Da im UBA-Ressourcenbericht eine andere Methode für die gesamtwirtschaftliche Bewertungen indirekter Rohstoffflüsse verwendet wurde (Eurostat-Methode), weichen die dort ausgewiesenen absoluten Werte deutlich von den eigenen Berechnungsergebnissen ab. Dies betrifft (wie zuvor bereits in Kapitel 5.2 erläutert) sowohl die Berechnung des absoluten Betrages des gesamten deutschen RMC, wie auch entsprechende Detailergebnisse bei der Abschätzung der absoluten Materialinanspruchnahme für IKT-relevante Gütergruppen und Dienstleistungen. Der relative Anteil der heimischen IKT-Endnachfrage am gesamten RMC Deutschlands wird von Lutter *et al.* (2022) für das Jahr 2019 allerdings auf 3 % geschätzt. Diese ersten Schätzungen des IKT-Anteils der heimischen Endnachfrage am gesamten deutschen RMC entsprechen somit nahezu der eigenen Beurteilung.



**Abbildung 96: Rohstoff-Fußabdruck (RMC<sub>Dig.</sub>) der Digitalisierung in Deutschland von 2000 bis 2020 nach nachfragenden Wirtschaftsbereichen in Millionen Tonnen**

Gesamtwert 2020 = 95.413,02



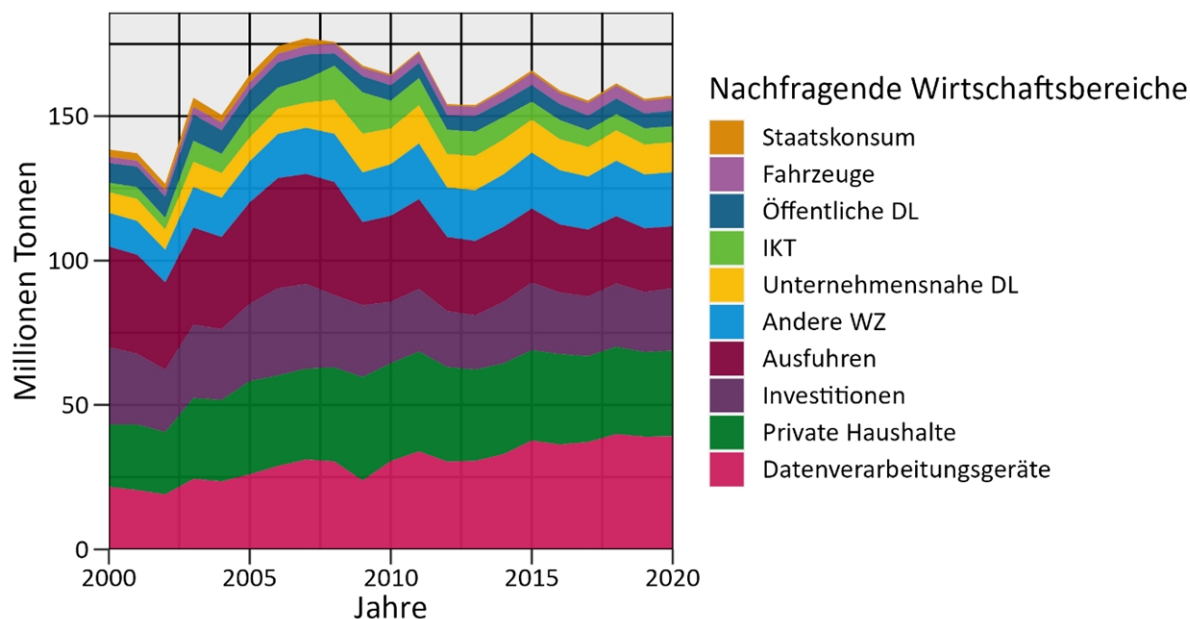
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die in den eigenen Bewertungen zusätzlich berücksichtigten globalen Materialinanspruchnahmen durch den Einsatz digitalisierungsrelevanter Güter und Dienstleistungen entlang der Lieferketten heimischer Wirtschaftszweige summierten sich nach dem RMC-Konzept auf ca. 43,3 Millionen Tonnen im Jahr 2020. Im Vergleich zu den zuvor angesprochenen heimischen Endnachfrage-Effekten entwickelte sich dieser Anteil im Zeitverlauf allerdings dynamischer (Wert des Jahres 2000: ca. 37 Millionen Tonnen). Gemäß der eigenen Berechnungsergebnisse ist der IKT-Anteil der Vorleistungsnachfrage heimischer Wirtschaftszweige am gesamten deutschen RMC zwischen den Jahren 2000 und 2020 von ca. 1,8% auf etwas mehr als 2,5 % angestiegen. Dieser Anstieg ist wesentlich auf einen gesteigerten Einsatz von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in der Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten zurückzuführen.

Wenn neben der gesamten heimischen Endnachfrage auch noch die Exportnachfrage aus dem Ausland berücksichtigt wird (also anstelle des Indikators RMC<sub>Dig.</sub> der Indikator RMI<sub>Dig.</sub> betrachtet wird), erweist sich der Einsatz von IKT-Gütern und -Dienstleistungen zur Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten als absolut dominierende Nachfragekomponente: Zur Befriedigung der digitalisierungsrelevanten Vorleistungsnachfrage dieses Wirtschaftszweiges wurden im Jahr 2000 Materialien in einem Gesamtvolumen von etwas mehr als 21,6 Millionen Tonnen genutzt. Bis zum Jahr 2020 hat sich dieser Wert mit annähernd 39,2 Millionen Tonnen nahezu verdoppelt (Abbildung 97). Für sämtliche übrige in der Abbildung ausgewiesene Wirtschaftszweige (Fahrzeugbau, öffentliche Dienstleister, Unternehmen des IKT-Sektors, unternehmensnahe Dienstleister, sonstige Wirtschaftszweige) ist ebenfalls jeweils ein deutlicher Anstieg der digitalisierungsrelevanten Vorleistungsnachfragen im Zeitverlauf erkennbar. Insgesamt sind die globalen Materialinanspruchnahmen durch den Einsatz digitalisierungsrelevanter Güter und Dienstleistungen entlang der Lieferketten heimischer Wirtschaftszweige zwischen den Jahren 2000 und 2020 nach dem RMI-Konzept um mehr als 58 % angestiegen.

**Abbildung 97: Rohstoff-Einsatz (RMI<sub>Dig.</sub>) der Digitalisierung in Deutschland von 2000 bis 2020 nach nachfragenden Wirtschaftsbereichen in Millionen Tonnen**

Gesamtwert 2020 = 157.091,86



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Aufgrund dieser Wachstumsdynamik wird die Entwicklung des RMI<sub>Dig.</sub> in Deutschland heute überwiegend durch die Vorleistungsnachfrage der Wirtschaftszweige beeinflusst: Die den Vorleistungsnachfragen nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen nach dem RMI-Konzept zuzurechnenden globalen Materialansprunahmen summierten sich im Jahr 2020 für die deutsche Wirtschaft auf ca. 83,6 Millionen Tonnen. Die Endnachfrage (Staatskonsum, Investitionen und Konsum privater Haushalte in Deutschland sowie Exporte digitalisierungsrelevanter Güter und Dienstleistungen aus Deutschland) hat hingegen im Zeitverlauf für die Entwicklung des RMI<sub>Dig.</sub> an Bedeutung verloren (Wert des Jahres 2000: 85,7 Millionen Tonnen, 2020: 73,5 Millionen Tonnen). Dieser Effekt ist insbesondere auf einen markanten Rückgang der Materialansprunahmen für exportierte IKT-Güter und Dienstleistungen um ca. -38,7 % zurückzuführen.

### 5.5.2 Zwischenfazit zu Kapitel 5

Unter Verwendung des auf GLORIA-Daten basierenden MRIO-Modells GRAMOD können die Umweltintensitäten des Systems „Digitalisierung in Deutschland“ unter Berücksichtigung aller relevanten wirtschaftlichen Vorketten im In- und Ausland bewertet werden. Auf ökonomischen Kenngrößen aufbauend, berechnet GRAMOD die zentralen umweltökonomischen Berichtsgrößen RMC<sub>Dig.</sub>, RMI<sub>Dig.</sub> sowie den CO<sub>2,Dig.</sub> für individuell abgrenzbare gesamtwirtschaftliche Teilsysteme. Die Entwicklung dieser Indikatoren kann in der Berichterstattung umfassend differenziert (zeitlich, nach Rohstoffen, Produktgruppen, geografischen (Herkunfts-)Regionen sowie Verwendungszwecken) dargestellt werden.

Der Digitalisierungssektor in Deutschland ist in den vergangenen Jahren gewachsen, vornehmlich getrieben durch eine dynamische Entwicklung digitalisierungsrelevanter Dienstleistungen. Im Bereich Hardware ist demgegenüber ein Rückgang der heimischen Produktion zu beobachten. Die Nachfrage nach Produkten dieser Kategorie wird im Zeitverlauf zunehmend durch Importe bedient, insbesondere aus ostasiatischen Herstellungsländern. In Deutschland lag

die Produktion von IKT-Gütern und Dienstleistungen im Jahr 2020 bei über 280 Milliarden Euro. Zudem wurden IKT-Güter und Dienstleistungen im Wert von 103 Milliarden Euro importiert. Die Vorleistungsnachfrage unternehmensnaher Dienstleister, Bruttoinvestitionen und die Endnachfrage private Haushalte, aber auch die Exportnachfrage aus dem Ausland sind wesentliche Treiber der steigenden Nachfrage nach IKT-Gütern und Dienstleistungen in Deutschland.

Die Entwicklung der Rohstoffintensität wie auch der Treibhausgasemissionen der Digitalisierung in Deutschland wird maßgeblich durch die Nachfrage nach Hardwaregütern getrieben. Im Jahr 2020 entfallen mehr als 80 % des Rohstoffkonsums der Digitalisierung in Deutschland von insgesamt 95,4 Millionen Tonnen auf diese Produktgruppe. Die Umweltauswirkungen des digitalen Wandels in Deutschland treten daher überwiegend in China und dem übrigen Asien auf. Dieses Outsourcing von Umweltbelastungen impliziert, dass die Entwicklung der Digitalisierung in Deutschland zunehmend auf eine Nutzung außereuropäischer, insbesondere asiatischer Rohstoffe angewiesen ist.

#### Zwischenfazit umweltökonomische Bewertung

- ▶ Sowohl die Materialindikatoren  $RMC_{Dig.}$  und  $RMI_{Dig.}$  als auch der  $CO_2, Dig.$ -Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland werden überwiegend von der Nachfrage nach Hardware getrieben.
- ▶ Da Hardware zu weiten Teilen aus fernöstlichen Weltregionen importiert wird, entfallen die größten Beiträge der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland auf China und das übrige Asien.
- ▶ Sowohl für den  $RMI_{Dig.}$  als auch für den  $RMC_{Dig.}$  in Deutschland erweisen sich nichtmetallische Mineralien als dominierende Hauptrohstoffgruppe. Metallerze und fossile Energieträger sind weitere relevante Hauptrohstoffgruppen des Rohstoffeinsatzes sowie des Rohstoffkonsums der Digitalisierung in Deutschland.
- ▶ Über 40 % der globalen Rohstoffinanspruchnahmen der Digitalisierung, die durch die Indikatoren  $RMI_{Dig.}$  und  $RMC_{Dig.}$  ausgewiesen sind, entfallen auf nichtmetallische Mineralien. Auf Metallerze und fossile Energieträger entfallen jeweils über 20 % der globalen Rohstoffinanspruchnahmen der Digitalisierung in Deutschland. Dagegen liegt der Anteil der Biomasse-Rohstoffe lediglich im einstelligen Prozentbereich.
- ▶ Der digitale Wandel in Deutschland hinterlässt in China sowie dem übrigen Asien einen deutlich sichtbaren  $CO_2$ -Fußabdruck. Anders als bei den Materialindikatoren entfallen sichtbare Anteile des  $CO_2, Dig.$  in Deutschland auch auf Deutschland sowie übrige EU-Mitgliedstaaten.
- ▶ Der private Konsum sowie Brutto-Investitionen sind wesentliche Einflussgrößen des  $CO_2$ -Fußabdrucks der Digitalisierung in Deutschland. Die durch diese Endnachfragekomponenten freigesetzten  $CO_2$ -Emissionen wurden in der jüngeren Vergangenheit allerdings deutlich reduziert.
- ▶ Die Vorleistungsnachfrage zur Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten trägt zudem ebenfalls wesentlich zum  $CO_2$ -Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland bei. Die durch diese Vorleistungsnachfrage freigesetzten  $CO_2$ -Emissionen sind in der jüngeren Vergangenheit sichtbar angestiegen.

## 6 Simulationen: Anwendung des Modells GRAMOD zur Simulation zukünftiger Entwicklungen bis 2050

### 6.1 Hintergrund

Das vorherige Kapitel stellte die methodischen und statistischen Grundlagen dar, welche von dem Modell GRAMOD zur gesamtwirtschaftlichen Abschätzung der globalen Ressourceninanspruchnahmen und Treibhausgasemissionen von 2000 bis 2020 genutzt werden. Diese Analysen basieren jeweils auf statischen Input-Output-Berechnungen von Umweltwirkungen entlang globaler Lieferketten (GRAM-Ansatz).

Gemäß Aufgabenstellung (Leistungsbeschreibung) bestand der zweite zentrale Schritt der makroökonomischen Analysen in diesem Forschungsvorhaben darin, mögliche zukünftige Entwicklungspfade (**Szenarien**) des in diesem Vorhaben definierten „Systems Digitalisierung“ quantitativ zu modellieren.

Das folgende Kapitel dokumentiert, dass sich das Modell GRAMOD auch zur Simulation zukünftiger globaler Ressourceninanspruchnahmen und Treibhausgasemissionen der Digitalisierung in Deutschland nutzen lässt.

Zunächst wurde eine Trendprojektion parametrisiert. Sie projiziert die Entwicklung von Ökonomie, Digitalisierung, Ressourceninanspruchnahme und THG-Emissionen zwischen 2000 und 2020 unter der Annahme anhaltender Entwicklungstrends auf den Zeitraum bis zum Jahr 2050.<sup>51</sup> Auf dieser Trendprojektion aufbauend wurden anschließend unterschiedliche Simulationen durchgeführt. Diese Modellanwendungen verdeutlichen, dass sich mit GRAMOD simulieren lässt, welchen Einfluss unterschiedliche Entwicklungen der Digitalisierung in Deutschland auf zukünftige globale Ressourceninanspruchnahmen und Treibhausgasemissionen ausüben.

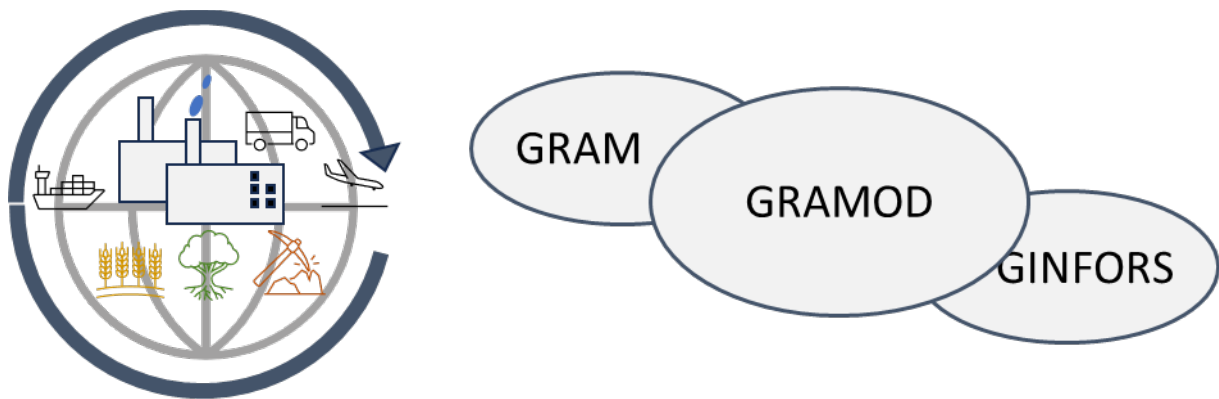
#### 6.1.1 Grundlagen des Modells

Zur konzeptionellen „Abgrenzung des Systems Digitalisierung aus Input-Output-Perspektive“ wurde bereits im Kapitel 3 „System- und Betrachtungsgrenzen“ festgehalten, dass die makroökonomischen Berechnungen und Simulationen mit einem multiregionalen Input-Output-(MRIO)-Modell umzusetzen sind. Zunächst soll nun das Modell GRAMOD methodisch eingeordnet werden. Es wurde in diesem Vorhaben vor dem Hintergrund der festgelegten Grenzen entwickelt und für die Simulationseigenschaften angewandt. An dieser Stelle werden die dynamischen Eigenschaften unterschiedlicher MRIO-Bewertungsansätze vorgestellt. Für eine bessere Nachvollziehbarkeit wird das Modell GRAMOD anderen früheren GWS-Modellentwicklungen (GRAM (Wiebe *et al.*, 2013) und GINFORS-E (Lutz *et al.*, 2010)) gegenübergestellt.

Das „*Global Resource Accounting Model*“ (GRAM) entspricht einem statischen Bewertungsansatz. Statische Bewertungsansätze berichten über vergangene Entwicklungen und können, wenn zukünftige Entwicklungen individuell parametrisiert sind, auch zur Beurteilung von Zukunftsszenarien dienen. Wiebe *et al.* (2019) oder Dittrich *et al.* (2020) sind Beispiele für jüngere Anwendungen unterschiedlicher statischer Bewertungsansätze im Themenfeld der Ressourcenschonungspolitik.

<sup>51</sup> Ursprünglich sollte in diesem Vorhaben das Jahr 2060 als Zieljahr der Projektionen genutzt werden. In Absprache mit der UBA-Fachbegleitung wurde dieses auf das Jahr 2050 geändert. Das Jahr 2050 ist ein übliches Zieljahr im wissenschaftlichen und politischen Diskurs.

**Abbildung 98: Einordnung des Modells GRAMOD**



Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Das „*Global Interindustry Forecasting System – Energy*“ (GINFORS-E) ist ein dynamisches Simulationsmodell. Unter Vorgabe zentraler Szenarioannahmen schreibt es die zukünftige globale wirtschaftliche Entwicklung eigenständig fort.<sup>52</sup> Insbesondere für die Berücksichtigung von Rebound-Effekten ist es von herausragender Bedeutung, zwischen statischen und dynamischen Bewertungsansätzen zu entscheiden: Dynamische Modelle bilden Rebound-Effekte in den jeweiligen Simulationen eigenständig ab. Statische Modelle sind nicht in der Lage, Rebound-Effekte eigenständig abzubilden.

Das in diesem Vorhaben entwickelte Modell **GRAMOD** lässt sich als Zwischenstufe von GRAM und GINFORS-E einordnen. Im Gegensatz zu GRAM ermöglicht GRAMOD nicht nur statische Analysen von Materialflüssen zwischen 2000 und 2020 und weiterer Fußabdrücke der heimischen Endnachfrage. GRAMOD schreibt vielmehr auch alle Daten, die **für die Fußabdruck-Berechnungen notwendig sind, dynamisch** in die Zukunft vor.

GINFORS-E hingegen ist ein dynamisches, ökonometrisches Modell weltwirtschaftlicher Zusammenhänge. Es ist primär für die Analyse von ökonomischen sowie energie- und klimapolitischen Fragestellungen konzipiert. Für die Analyse von Materialflüssen fehlt jedoch insbesondere ein hinreichender Detailgrad bei den unterschiedlichen Wirtschaftszweigen. Zudem geben die von GINFORS-E genutzten Datenquellen keine Auskunft über die genutzte Entnahme von biotischen und abiotischen Rohstoffen.

Das neu konzipierte Modell GRAMOD nutzt im Kern die Methodik von GRAM zur Abschätzung von Materialflüssen und weiteren Fußabdrücken der heimischen Endnachfrage. Dazu kommt die GINFORS-Modellphilosophie zur Projektion der wirtschaftlichen Dynamik sowie der direkten Umweltwirkungen (inländische Entnahme von Rohstoffen, CO<sub>2</sub>-Emissionen der Wirtschaftsbereiche), jeweils für 34 Länder und Regionen der Welt.

Neben allen Gemeinsamkeiten von GRAMOD und GINFORS-E bestehen aber auch Unterschiede:

GINFORS-E basiert in Bezug auf die Input-Output-Daten auf der ICIO der OECD, GRAMOD hingegen auf Version 055 der Datenbank GLORIA.

GINFORS-E unterscheidet in der I-O-Modellierung derzeit 66 Länder. Eine Modellierung/Projektion der „*Rest of World*“-Region erfolgt nicht. GRAMOD hingegen unterscheidet 34 Länder und Regionen und hat eine globale Abdeckung.

<sup>52</sup> Siehe <https://web.jrc.ec.europa.eu/policy-model-inventory/explore/models/model-ginfors-e> (Stand: 19.09.2023) für weiterführende Details zu Berichtsumfang und Simulationseigenschaften des Modells GINFORS-E.

GINFORS-E unterscheidet in der I-O-Modellierung 45 Wirtschaftsbereiche. GRAMOD geht von 120 Wirtschaftsbereichen aus.

GINFORS-E projiziert die makroökonomischen Systemzusammenhänge auf Grundlage von Einzelschätzungen. Hier werden die Endnachfrage-Komponenten in Abhängigkeit von der Wirtschaftsleistung (Bruttoinlandsprodukt) erklärt. Bei GRAMOD (siehe Abschnitt 6.1.2) erfolgen diese ökonometrischen Spezifikationen getrennt für zwei Panels: die Gruppe der Industrieländer und die Gruppe der Entwicklungs- und Transformationsländer.

In GINFORS-E wirkt die I-O-Modellierung nur sehr selten auf die makroökonomische Modellierung zurück. In GRAMOD hingegen wird auf getrennte Makromodelle verzichtet. Veränderungen in den I-O-Strukturen nehmen also direkten Einfluss auf die Wertschöpfung (Bruttoinlandsprodukt) und damit auf Konsum- und Investitionsentscheidungen. Um hieraus resultierende Reihenfolgeprobleme zu minimieren, werden Simulationsrechnungen in GRAMOD wie GINFORS-E als iterative Prozesse durchgeführt.

GINFORS-E projiziert Veränderungen in der Struktur privater Konsumausgaben auf Basis von Parametern aus der Literatur. So führt ein im Zeitverlauf relativer Wohlstandsgewinn<sup>53</sup> insbesondere dazu, dass der Anteil der Konsumausgaben für Grundbedürfnisse wie Nahrungsmittel abnimmt. In GRAMOD wird dieser Erklärungsansatz auf die aktuellen Datengrundlagen des Modells angewandt (siehe Abschnitt 6.1.2). Zudem erklärt GRAMOD im Gegensatz zu GINFORS Strukturveränderungen bei den Bruttoanlageinvestitionen.

Von besonderem Interesse für das Vorhaben „Digitalisierung und natürliche Ressourcen – Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ ist die Dynamik der Verwendung von IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen. Vor diesem Hintergrund wurde getrennt für IKT-Güter und IKT-Dienstleistungen ökonometrisch untersucht, ob in der Historie eine signifikante Trendabhängigkeit dieser Verwendungen zu beobachten war. Ist dies der Fall, dann wird angenommen, dass die identifizierte Trendstärke auch in der Projektion weiter anhält.

Für das Modell GINFORS-E gibt es eine modulare Erweiterung zum Themenkomplex Energie und Emissionen, die im Wesentlichen auf Daten aus Energiebilanzen beruht. Budgetäre Gründe, aber auch begrenzte Datenverfügbarkeiten ließen es nicht zielführend erscheinen, in GRAMOD eine ähnlich komplexe Modellbasis zu konzipieren. Die Modellierung der Energiewende und von deren Implikationen auf Ökonomie, Ressourcen-Inanspruchnahme und CO<sub>2</sub>-Emissionen der Wirtschaftsbereiche erfolgt vielmehr vergleichsweise simpel:

- ▶ Der Zuwachs des Anteils der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung gegenüber dem Vorjahr ist szenarioabhängig exogen vorgegeben. Ein Zuwachs des EE-Anteils an der Stromerzeugung führt zu einem geringeren Vorleistungseinsatz von fossilen Inputs im Sektor „Stromerzeugung“. Gleichzeitig wird vereinfachend Kostenneutralität angenommen. Alle nicht fossilen Inputs werden also entsprechend erhöht.
- ▶ Auch die Veränderung der durchschnittlichen Energieintensität, mit der alle anderen Wirtschaftsbereiche produzieren, ist eine exogen vorgegebene Szenariovariable. Eine bessere Energieeffizienz vermindert den Vorleistungseinsatz von fossilen Inputs in den einzelnen Wirtschaftsbereichen. Auch hier wird vereinfachend Kostenneutralität angenommen. Alle nicht fossilen Inputs werden also jeweils entsprechend erhöht.

---

<sup>53</sup> Bruttoinlandsprodukt pro Kopf im Verhältnis zum Bruttoinlandsprodukt pro Kopf in den USA.

- ▶ Als dritte Stellgröße für eine einfachere Abbildung der Energiewende fungiert die Dekarbonisierung der Produktionsprozesse (außer Stromerzeugung, siehe oben). Hier steuert eine szenarioabhängige exogene Vorgabe, in welchem Maße fossile Inputs in Zukunft durch Strom substituiert werden. Genau wie bei der Energieintensität (s. o.) führt eine solche Vorgabe zu einem verringerten Vorleistungseinsatz von fossilen Inputs in den einzelnen Wirtschaftsbereichen. Anders funktioniert hier aber die Kompensation: Erhöht werden nun lediglich die Inputs aus der Stromerzeugung.

In GINFORS-E gibt es (derzeit) keine Datengrundlagen und Modellierungen für Materialflüsse.<sup>54</sup> In GRAMOD hingegen bildet die Projektion der inländischen genutzten Entnahme von Rohstoffen – differenziert nach 62 bzw. 39 Materialkategorien – für alle Länder/Regionen der Welt sowie der resultierenden Materialflussindikatoren (RMC, RMI) einen zentralen Fokus der Modellentwicklung. Als Ergebnis der ökonomischen Projektionen ist im Modell bekannt, wie sich die preisbereinigten Produktionswerte aller Wirtschaftsbereiche – und somit auch derjenigen, die der Natur Rohstoffe entnehmen – unter den gegebenen ökonomischen Parametrisierungen entwickeln werden. Im Normalfall sollten sich der preisbereinigte Produktionswert eines Wirtschaftsbereichs und dessen physische Produktionsmenge, das heißt die Entnahme von Rohstoffen in Tonnen, in gleichem Maße entwickeln. Vor diesem Hintergrund gehen die Modellprojektionen, soweit nicht anderweitig exogen vorgegeben, davon aus, dass die Materialintensitäten der Produktion (also die Relation aus genutzter Entnahme in Tonnen zu preisbereinigtem Produktionswert) für alle besetzten Kombinationen aus Materialien und Wirtschaftsbereichen konstant bleiben.

## 6.1.2 Parametrisierung der Trendprojektion

### 6.1.2.1 Gesamtwirtschaftliches Umfeld

Die Trendprojektion ist ein Entwicklungspfad und für das zu erwartende **Wirtschaftswachstum** in den 34 Ländern und Weltregionen exogen vorgegeben. Diese exogene Vorgabe speist sich aus zwei Informationsquellen: 1) dem „*OECD Economic outlook No. 109*“ vom Oktober 2021 (OECD, 2021) als aktuelle Langfristprojektion der OECD zur globalen, nach Ländern und Ländergruppen differenzierten Entwicklung des preisbereinigten BIP pro Kopf und 2) den „*World population prospects 2022*“ der Vereinten Nationen (United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022). Aus der Kombination dieser beiden Datenhintergründe ergibt sich die in Tabelle 24 zusammengefasste Dynamik des preisbereinigten BIP in den 34 Ländern/Regionen von GRAMOD. Für ergänzende Detailinformationen zu den Ländern und Regionen siehe Tabelle 21 (Kap. 5.2.2).

**Tabelle 24: Erwartetes durchschnittliches jährliches Wachstum des preisbereinigten BIP in der Trendprojektion**

Land/Region	2020–2030	2030–2040	2040–2050
Deutschland	0,8 %	0,6 %	0,7 %
Belgien, Niederlande, Luxemburg	1,8 %	1,1 %	1,1 %
Frankreich	1,8 %	1,1 %	1,1 %
Iberische Halbinsel	2,1 %	0,8 %	0,5 %

<sup>54</sup> Die (u. a.) in Distelkamp und Meyer (2018) und Distelkamp und Meyer (2019) dokumentierte Modellversion GINFORS<sub>3</sub> zeichnet sich durch eine explizite Modellierung von Materialflüssen aus. Da die Datengrundlagen dieser Modellversion inzwischen veraltet sind, wurde in diesem Vorhaben von einer Anwendung des Modells GINFORS<sub>3</sub> abgesehen.

Land/Region	2020–2030	2030–2040	2040–2050
Süd-Ost-EU	1,6 %	0,5 %	0,6 %
Mittel-Ost-EU	3,0 %	0,7 %	0,3 %
Österreich, Tschechien, Slowakei	1,7 %	1,1 %	0,9 %
Nord-Ost-EU	2,7 %	0,9 %	0,1 %
Nördliche EU	2,5 %	1,4 %	1,2 %
EFTA-Länder	1,7 %	1,4 %	1,4 %
Vereinigtes Königreich	1,9 %	1,1 %	1,1 %
Übriges Europa	2,8 %	1,7 %	1,1 %
Russland	-0,1 %	0,9 %	0,4 %
Türkei	4,6 %	2,5 %	2,3 %
Zentralasien	5,0 %	3,2 %	2,6 %
Ostasien (ohne China)	1,4 %	0,7 %	0,3 %
China	4,2 %	2,2 %	1,4 %
Südasien (ohne Indien)	5,4 %	3,6 %	2,8 %
Indien	7,0 %	4,1 %	3,0 %
Südostasien (ohne Indonesien)	4,7 %	2,9 %	2,1 %
Indonesien	4,8 %	3,3 %	2,7 %
Ozeanien	2,6 %	2,1 %	1,9 %
Kanada	2,0 %	1,4 %	1,3 %
USA	1,9 %	1,4 %	1,3 %
Mittelamerika, Karibik	2,9 %	2,2 %	1,9 %
Mercosur-Länder	2,6 %	1,8 %	1,5 %
Übriges Südamerika und Karibik	3,6 %	1,8 %	1,4 %
Nordafrika	5,5 %	3,6 %	2,9 %
Westafrika	6,4 %	4,5 %	3,7 %
Zentralafrika	7,0 %	5,1 %	4,1 %
Ostafrika	6,4 %	4,5 %	3,6 %
Südliches Afrika	3,1 %	3,0 %	2,7 %
Naher Osten (ohne Israel)	2,8 %	2,0 %	1,8 %
Israel	3,0 %	2,3 %	2,3 %

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“, 2023), in Anlehnung an OECD (2021) und United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division (2022)



**Tabelle 25: Erklärung der Endnachfrage-Komponenten in GRAMOD**

Endnachfrage-Komponente (makroökonomische Aggregate)	Gruppe	Elastizität zum BIP	t-Wert
Konsumausgaben der privaten Haushalte	IN	1,01	745,1
	SE	0,94	274,9
Konsumausgaben der privaten Organisationen ohne Erwerbszweck	IN	1,21	225,7
	SE	1,06	51,4
Konsumausgaben des Staates	IN	0,95	349,0
	SE	1,06	247,1
Bruttoanlageinvestitionen	IN	0,96	210,7
	SE	1,08	218,9

IN = Industrieländer; SE = Schwellen- und Entwicklungsländer

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Das Wachstum des preisbereinigten BIP erklärt im Modell die Dynamik der verschiedenen Endnachfrage-Komponenten: die gesamten Konsumausgaben der privaten Haushalte, die gesamten Konsumausgaben der privaten Organisationen ohne Erwerbszweck, die gesamten Konsumausgaben des Staates und die gesamten Bruttoanlageinvestitionen. Auf Grundlage von Beobachtungen für die Jahre 2000 bis 2020 wurde hierzu mittels Panelregressionen überprüft, welche dieser Komponenten tendenziell stärker als das BIP wachsen (Elastizität > 1) und welche tendenziell schwächer (Elastizität < 1).

Für die Gruppe der Industrieländer zeigt sich hierbei (siehe Tabelle 25), dass bei zunehmender Wirtschaftsleistung sowohl die Konsumausgaben des Staates als auch die Bruttoanlageinvestitionen nur unterproportional mitwachsen. In Schwellen- und Entwicklungsländern hingegen wachsen diese Komponenten überproportional und die Konsumausgaben der privaten Haushalte halten nicht Schritt mit der allgemeinen Wirtschaftsdynamik.

In einem nächsten Schritt wird nun danach gefragt, wie sich die Struktur dieser Endnachfrage-Komponenten in allen Ländern/Regionen der Welt in einem Trendszenario entwickeln werden. Dieser Frage wird lediglich für die Komponenten „Konsumausgaben der privaten Haushalte“ und „Bruttoanlageinvestitionen“ nachgegangen. Für die Komponenten „Konsumausgaben der privaten Organisationen ohne Erwerbszweck“ und „Konsumausgaben des Staates“ wird hingegen angenommen, dass sich deren Struktur – also die Aufteilung der Gesamtausgaben auf die verschiedenen Produktgruppen – in Zukunft nicht verändern wird.<sup>55</sup>

Die Struktur der Endnachfrage-Komponenten wird nicht für jede einzelne der 120 unterschiedenen Produktgruppen erklärt, sondern für ausgewählte Bedarfsfelder, zu denen jeweils (die Ausgaben für) mehrere Produktgruppen zusammengefasst wurden.

<sup>55</sup> Der Großteil der Konsumausgaben der privaten Organisationen ohne Erwerbszweck entfällt in der Regel auf Dienstleistungen des Gesundheits- und Sozialwesens, auf Erziehungs- und Unterrichtsdienstleistungen und auf sonstige öffentliche Dienstleistungen. Hierbei waren in der Vergangenheit sehr wohl Unterschiede zwischen den Ländern/Regionen beobachtbar, nicht jedoch Veränderungen der Strukturen im Zeitverlauf. Dasselbe gilt für die Konsumausgaben des Staates. Hier konzentrieren sich die Ausgaben auf die Produktgruppen „Dienstleistungen der öffentlichen Verwaltung, Verteidigung und Sozialversicherung“, „Erziehungs- und Unterrichtsdienstleistungen“ und „Dienstleistungen des Gesundheits- und Sozialwesens“.

**Tabelle 26: Erklärung der Veränderung von Konsummustern in GRAMOD**

Industrieländer	Elastizität linearer Trend	t-Wert
Ernährung	-1,04	-21,5
Mobilität	+0,32	4,2
Energie (ohne Kraftstoffe)	+0,34	2,8
Schwellen- und Entwicklungsländer	Elastizität relatives BIP pro Kopf	t-Wert
Ernährung	-0,26	-62,9
Mobilität	0,14	18,1
Energie (ohne Kraftstoffe)	Nicht signifikant	

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Bei den Konsumausgaben der privaten Haushalte wird hierbei neben den Ausgaben für Digitalisierung (s. Abschnitt 6.1.2.3) nach drei Bedarfsfeldern gefragt:

dem Anteil der Ausgaben für Ernährung an den gesamten Konsumausgaben;

dem Anteil der Ausgaben für Mobilität an den gesamten Konsumausgaben;

dem Anteil der Ausgaben für Energie (ohne Kraftstoffe) an den gesamten Konsumausgaben.

Die Systemzusammenhänge wurden auf Grundlage von Beobachtungen für die Jahre 2000 bis 2020 ökonometrisch überprüft. Dabei wurde für die Gruppe der Industrieländer untersucht, inwiefern sich die Ausgabenanteile als trendabhängig erweisen. Für die Gruppe der Schwellen- und Entwicklungsländer dient hingegen der Abstand des BIP pro Kopf zum BIP pro Kopf in den USA.<sup>56</sup> Tabelle 26 fasst die aufgrund dieser Analysen im Modell parametrisierten Elastizitäten zusammen.

Bei der Frage nach Veränderungen in der Struktur der Bruttoanlageinvestitionen ist die Vorgehensweise ähnlich:

Für die Gruppe der Industrieländer wird ökonometrisch überprüft, ob sich eine Trendabhängigkeit bei der Bedeutung einer Ausgabenkategorie zeigt.

Für die Gruppe der Schwellen- und Entwicklungsländer wird ökonometrisch überprüft, ob die Bedeutung einer Ausgabenkategorie abhängig vom Wohlstandsgefälle zu den USA ist.

Wie die folgende Tabelle 27 zeigt, erfolgt diese ökonometrische Überprüfung wiederum für drei bedeutende Kategorien von Bruttoanlageinvestitionen: dem Anteil der Ausgaben für Bauarbeiten an den gesamten Bruttoanlageinvestitionen, dem Anteil der Ausgaben für Fahrzeuge an den gesamten Bruttoanlageinvestitionen und dem Anteil der Ausgaben für Maschinen und elektrischen Ausrüstungen an den gesamten Bruttoanlageinvestitionen.

<sup>56</sup> Vermindert sich im Laufe der Zeit in einem Schwellenland das Wohlstandsgefälle zu den USA, so sind auch veränderte Konsumstrukturen zu erwarten, bei denen Ausgaben für Grundbedürfnisse wie Ernährung an Bedeutung verlieren.

**Tabelle 27: Erklärung der Veränderung von Konsummustern in GRAMOD**

Industrieländer	Elastizität linearer Trend	t-Wert
Bauarbeiten	nicht signifikant	
Fahrzeuge	0,43	3,6
Maschinen und elektr. Ausrüstungen	-0,80	-6,3
Schwellen- und Entwicklungsländer	Elastizität relatives BIP pro Kopf	t-Wert
Bauarbeiten	0,06	10,8
Fahrzeuge	-0,05	-3,8
Maschinen und elektr. Ausrüstungen	-0,11	-11,4

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

In den Industrieländern zeigt sich die Tendenz zu einer wachsenden Bedeutung von Investitionen in Fahrzeuge und einer abnehmenden Bedeutung von Investitionen in Maschinen und elektronische Ausrüstungen. Für die Bedeutung von Bauleistungen ließ sich keine Trendabhängigkeit identifizieren. In den Schwellen- und Entwicklungsländern zeigt sich bei abnehmendem Wohlstandsgefälle zu den USA eine (leichte) Verschiebung von Ausrüstungs- zu Bauinvestitionen.

Ein weiterer Themenkomplex, für den in GRAMOD Parametrisierungen des gesamtwirtschaftlichen Umfelds vorgenommen werden (können), ist die Frage nach der Zukunft der weltwirtschaftlichen **Verflechtungen**. Entwickelt sich der Welthandel dynamischer als die globale Wirtschaftsleistung, so spricht man von einer zunehmenden Globalisierung. Abbildung 99 zeigt eine entsprechende Auswertung der Datenbank GLORIA. Dargestellt werden der Globalisierungsindex sowie der Globalisierungsindex für die IKT-Güter und -Dienstleistungen. Der dargestellte Zeitraum umfasst die Jahre 2000 bis 2050. Der dunkelblau dargestellte Globalisierungsindex verdeutlicht, dass anhaltende volkswirtschaftliche Globalisierungstrends insbesondere bis zur globalen Finanzkrise im Jahr 2009 zu beobachten waren. Analysiert man den gesamten beobachtbaren Zeitraum von 2000 bis 2020, ist aus der Trendfortschreibung langfristig lediglich eine leichte Zunahme der Globalisierung bis 2050 zu erwarten. Unter dieser Annahme weist die Trendprojektion darauf hin, dass sich die weltwirtschaftlichen Verflechtungen (Exporte/Importe) im Vergleich zu inländischen ökonomischen Prozessen in den jeweiligen Volkswirtschaften etwas dynamischer entwickeln.

Ergänzend wurden auch IKT-Güter und IKT-Dienstleistungen individuell im Hinblick auf spezifische Globalisierungstrends hin analysiert. Beim Vergleich dieser IKT-spezifischen Globalisierungstrends (hellblaue und gelbe Zeitreihen in Abbildung 99) mit dem allgemeinen Globalisierungstrend fällt insbesondere bei den IKT-Dienstleistungen auf, dass sich die Globalisierung vor der Finanzkrise deutlich dynamischer entwickelt hat. Ausgehend vom Peak im Jahr 2008 kam es aber auch zu einem deutlich ausgeprägteren Rückgang des Verhältnisses aus Welthandelsvolumen und globaler Produktion bis zum ersten Corona-Jahr 2020.

**Abbildung 99: Entwicklung der Globalisierung in den Jahren 2000 bis 2050**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### 6.1.2.2 Energie- und klimapolitisches Umfeld

Die Trendprojektion unterstellt eine langfristige Dekarbonisierung bisheriger Wirtschaftsstrukturen in Form eines kontinuierlichen Anstiegs des Anteils der **Erneuerbaren Energien** an der Stromerzeugung, einer langfristigen Steigerung der Energieeffizienz der übrigen Wirtschaftsbereiche sowie eines stetigen Rückgangs des Anteils fossiler Energieträger an sämtlichen Inputs dieser übrigen Wirtschaftsbereiche. Zur vollständigen Modellierung sämtlicher nationaler CO<sub>2</sub>-Emissionen werden die aus diesen Einstellungen herleitbaren Wachstumsraten der gesamtwirtschaftlichen CO<sub>2</sub>-Emissionsintensitäten in den Simulationen auch zur Fortschreibung der Emissionsintensitäten der Haushalte angewandt.

Für entsprechende Parametrisierungen können in GRAMOD grundsätzlich unterschiedliche Entwicklungsdynamiken für individuell ausgewählte Regionen und Wirtschaftsbereiche vorgegeben werden. Dadurch wird unter anderem eine explizite Berücksichtigung der Befunde detaillierter sektoraler Transformationsstudien (bspw. zur zukünftigen Entwicklung der Energienachfrage des Verkehrssektors) in weiterführenden gesamtwirtschaftlichen Bewertungen ermöglicht. Auch können global variierende klimapolitische Ambitionsniveaus in unterschiedlichen Szenarioparametrisierungen berücksichtigt und die jeweiligen Szenarioergebnisse in ihren Auswirkungen auf globale Ressourcen-Inanspruchnahmen und CO<sub>2</sub>-Emissionen weiter analysiert werden.

Das gegenständliche Vorhaben zielte nicht darauf ab, einen entsprechend ausführlichen Ausblick auf zukünftige klimapolitische Entwicklungen auszuarbeiten. Daher wurden die energie- und klimapolitischen Umfeldparametrisierungen nicht individuell für einzelne Wirtschaftsbereiche oder Weltregionen festgelegt. Zur Berücksichtigung langfristiger globaler

Dekarbonisierungsentwicklungen in den makroökonomischen Simulationen wurden stattdessen folgende Parametrisierungen einheitlich für alle modellierten Weltregionen vorgegeben:

Ein Anstieg des Anteils der Erneuerbaren Energien an der Stromerzeugung um durchschnittlich 1,9 Prozentpunkte pro Jahr;

ein Rückgang der Energieintensität der Produktion in übrigen Wirtschaftsbereichen um 1 % pro Jahr;

ein Rückgang des Anteils fossiler Energieträger an sämtlichen Inputs übriger Wirtschaftsbereiche um 1 % pro Jahr.

Für Deutschland implizieren diese exogenen Vorgaben bis zum Jahr 2050 unter anderem eine vollständige Dekarbonisierung der Stromerzeugung sowie eine Reduktion der sektoralen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Vergleich zu 2020 um annähernd -68 %. Eine weitergehende Einordnung ausgewählter eigener Simulationsergebnisse im Vergleich zu internationalen Projektionen der globalen Entwicklung von Rohstoffextraktionen erfolgt später in Kapitel 6.2. Wie die dortigen Ausführungen verdeutlichen, resultieren aus den hier vorgestellten Projektionsannahmen des Trendszenarios langfristig deutliche Rückgänge der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen. Ein Erreichen ambitionierter klimapolitischer Ziele (wie dem 1.5 °C-Ziel) und der dazu global notwendigen weitreichenden Transformationen traditioneller Wirtschaftsstrukturen wird, in Übereinstimmung mit den in Kapitel vorgestellten Referenzprojektionen des *International Resource Panel* (Oberle *et al.*, 2019) sowie der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD, 2018), dabei allerdings nicht unterstellt. Insbesondere für die annahmegemäß stark wachsenden Modellregionen des afrikanischen Kontinents werden unter diesen Annahmen auch langfristig ansteigende CO<sub>2</sub>-Emissionen simuliert.

### 6.1.2.3 Themenfeld Digitalisierung

Im Vorhaben „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“ stehen weniger die gesamtwirtschaftliche Dynamik und deren Implikationen für Ressourcenbedarf und THG-Emissionen im Fokus. Vielmehr geht es speziell um den Teilbereich der Wirtschaft, der sich in den volkswirtschaftlichen Gesamtrechnungen als die Verwendung von IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen wiederfindet. Daher lag bei der Parametrisierung der Trendprojektion in GRAMOD besonderes Augenmerk auf diesem Ausschnitt aus der Gesamtwirtschaft.

Sowohl bei den Konsumausgaben der privaten Haushalte als auch bei den Bruttoanlageinvestitionen wurden in diesem Kontext jeweils zwei zusätzliche Anteile an den Ausgaben ökonomisch spezifiziert:

Der Anteil der Ausgaben für IKT-Güter;

Der Anteil der Ausgaben für IKT-Dienstleistungen.

Wie Tabelle 28 zeigt, sind in den Industrieländern die Anteile der Ausgaben für IKT-Güter und für IKT-Dienstleistungen an den gesamten Konsumausgaben der privaten Haushalte **rückläufig**.

**Tabelle 28: Erklärung der Veränderung der Ausgabenanteile für IKT-Güter und IKT-Dienstleistungen in GRAMOD**

Industrieländer		Elastizität linearer Trend	t-Wert
Konsumausgaben der privaten Haushalte	IKT-Güter	-0,36	-2,4
	IKT-Dienstleistungen	-1,12	-14,0
Bruttoanlageinvestitionen	IKT-Güter	-2,34	-13,9
	IKT-Dienstleistungen	2,84	15,1
Schwellen- und Entwicklungsländer		Elastizität relatives BIP pro Kopf	t-Wert
Konsumausgaben der privaten Haushalte	IKT-Güter	0,22	16,1
	IKT-Dienstleistungen	nicht signifikant	
Bruttoanlageinvestitionen	IKT-Güter	0,06	4,5
	IKT-Dienstleistungen	0,70	19,7

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Bei den Bruttoanlageinvestitionen hingegen ist eine deutliche **Verschiebung** von Ausgaben für IKT-Güter zu Ausgaben für IKT-Dienstleistungen zu beobachten. Diese von 2000 bis 2020 beobachteten Trends werden in der Projektion als weiterhin gültig (bis zum Jahr 2050) angenommen. In den Schwellen- und Entwicklungsländern zeigt sich insbesondere beim Anteil der Ausgaben für IKT-Güter an den gesamten Konsumausgaben der privaten Haushalte und beim Anteil der Ausgaben für IKT-Dienstleistungen an den gesamten Bruttoanlageinvestitionen eine **Zunahme**, wenn sich das Wohlstandsgefälle gegenüber den USA verringert.

Die letzte Verwendung von IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen durch Konsumierende oder in Form von Investitionsausgaben sind nicht die einzigen Aspekte, die für die gesamtwirtschaftliche Sichtweise auf Ressourcenbedarf und THG-Emissionen der Digitalisierung wichtig sind. Auch die Verwendung von IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen als Vorleistungsinputs in der Produktion spielt eine nicht unerhebliche Rolle. Nun sollte ein empirisch fundierter Ausblick auf zukünftige Entwicklungen entstehen. Dafür wurde zunächst für die Historie aller Länder/Regionen ermittelt, wie sich der durchschnittliche Inputkoeffizient<sup>57</sup> IKT-Güter und der durchschnittliche Inputkoeffizient IKT-Dienstleistungen entwickelt haben.

Diese durchschnittlichen Inputkoeffizienten wurden dann in getrennten Zeitreihenregressionen für alle 34 Länder/Regionen auf einen signifikanten Zeittrend hin untersucht. Nachstehende Tabelle 29 zeigt, dass für die Hälfte aller Länder/Regionen beim Einsatz von IKT-Gütern ein signifikanter Zeittrend identifiziert werden konnte. Bei den IKT-Dienstleistungen gilt dies sogar für 23 der 34 untersuchten Zeitreihen. In der Tabelle ist dokumentiert, ob der identifizierte Zeittrend positiv oder negativ ist und ob es sich um eine Spezifikation mit linearem Zeittrend oder eine mit abnehmendem Zeittrend handelt.

<sup>57</sup> Ein Inputkoeffizient gibt an, wie viele (monetäre) Einheiten von einem Vorleistungsgut eingesetzt wurden, um eine (monetäre) Einheit von einem Output-Gut zu erzeugen.

**Tabelle 29: Identifizierte Trendabhängigkeiten der durchschnittlichen Inputkoeffizienten für den Einsatz von IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen**

Globale Wirtschaftsregion	IKT-Güter	IKT-Dienstleistungen
Deutschland	Negativ; abnehmend	Positiv; abnehmend
Belgien, Niederlande, Luxemburg	Negativ; abnehmend	Positiv; abnehmend
Frankreich	Kein Trend	Negativ; abnehmend
Iberische Halbinsel	Kein Trend	Negativ; abnehmend
Süd-Ost-EU	Negativ; abnehmend	Negativ; abnehmend
Mittel-Ost-EU	Positiv; linear	Positiv; abnehmend
Österreich, Tschechien, Slowakei	Positiv; abnehmend	Negativ; abnehmend
Nord-Ost-EU	Kein Trend	Negativ; abnehmend
Nördliche EU	Negativ; abnehmend	Positiv; abnehmend
EFTA-Länder	Kein Trend	Kein Trend
Vereinigtes Königreich	Negativ; abnehmend	Positiv; abnehmend
Übriges Europa	Negativ; abnehmend	Positiv; abnehmend
Russland	Kein Trend	Negativ; abnehmend
Türkei	Negativ; abnehmend	Kein Trend
Zentralasien	Negativ; abnehmend	Kein Trend
Ostasien (ohne China)	Positiv; abnehmend	Positiv; abnehmend
China	Kein Trend	Negativ; abnehmend
Südasien (ohne Indien)	Negativ; abnehmend	Kein Trend
Indien	Kein Trend	Negativ; abnehmend
Südostasien (ohne Indonesien)	Kein Trend	Negativ; abnehmend
Indonesien	Kein Trend	Kein Trend
Ozeanien	Kein Trend	Negativ; abnehmend
Kanada	Kein Trend	Kein Trend
USA	Positiv; linear	Positiv; abnehmend
Mittelamerika, Karibik	Negativ; abnehmend	Positiv; abnehmend
Mercosur-Länder	Kein Trend	Negativ; abnehmend
Übriges Südamerika und Karibik	Positiv; abnehmend	Kein Trend
Nordafrika	Kein Trend	Kein Trend
Westafrika	Negativ; abnehmend	Kein Trend
Zentralafrika	Kein Trend	Positiv; abnehmend
Ostafrika	Kein Trend	Negativ; abnehmend

Globale Wirtschaftsregion	IKT-Güter	IKT-Dienstleistungen
Südliches Afrika	Kein Trend	Kein Trend
Naher Osten (ohne Israel)	Kein Trend	Positiv; abnehmend
Israel	Negativ; abnehmend	Kein Trend

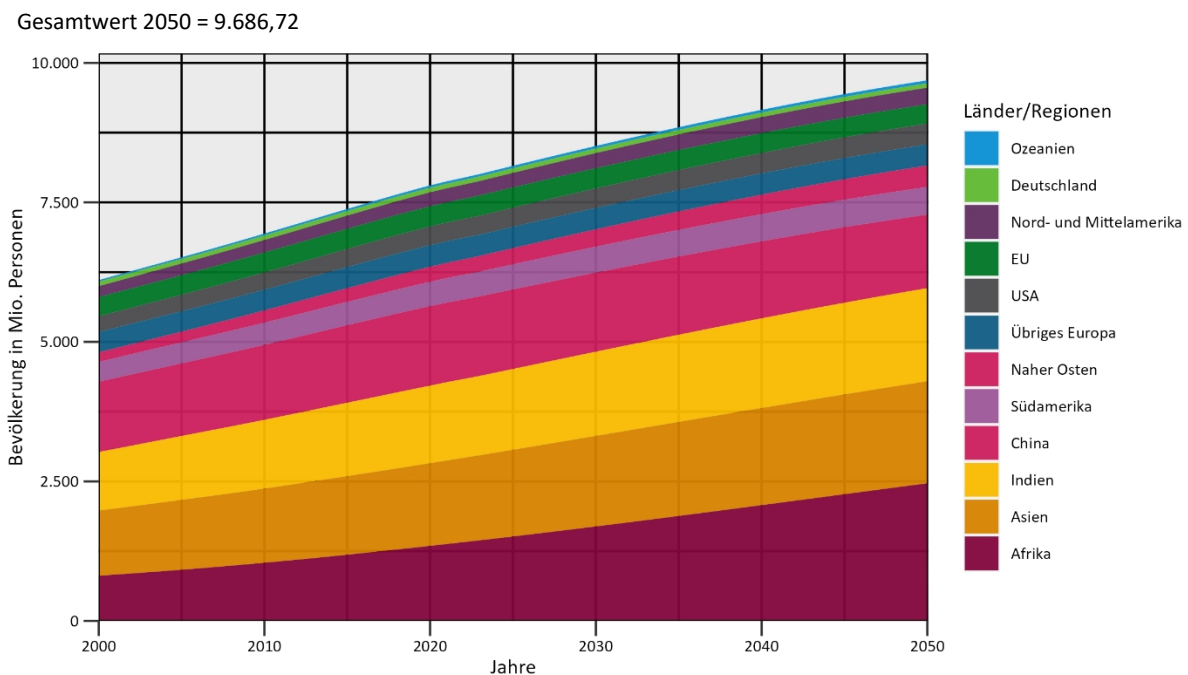
Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

## 6.2 Ergebnisse: Die Trendprojektion

### 6.2.1 Globale Umfeldentwicklungen

Die UN-Bevölkerungsprojektion unterstellt eine insgesamt steigende globale Bevölkerungsentwicklung, wie in Abbildung 100 ersichtlich. Für das Jahr 2050 ist demnach eine Gesamtzahl von **9,7 Milliarden Menschen** zu erwarten. Im Vergleich zum Ausgangswert des Jahres 2020 entspricht dies einem Anstieg um insgesamt 24,1 %. Insbesondere der afrikanische Kontinent weist im Betrachtungszeitraum eine deutliche Bevölkerungszunahme auf. Auch Indien und die unter „Asien“ zusammengefassten Länder wachsen, während die chinesische Bevölkerung zurückgeht. In Deutschland, im europäischen Ausland und in den USA bleiben die Zahlen relativ konstant. Für Deutschland wird dabei langfristig ein leichter Bevölkerungsrückgang (Reduktion der Bevölkerungsanzahl bis zum Jahr 2050 um ca. -5,1 % im Vergleich zu 2020) unterstellt.

**Abbildung 100: Trendszenario: Globale Ergebnisse – Bevölkerung von 2000 bis 250 in Millionen Personen**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

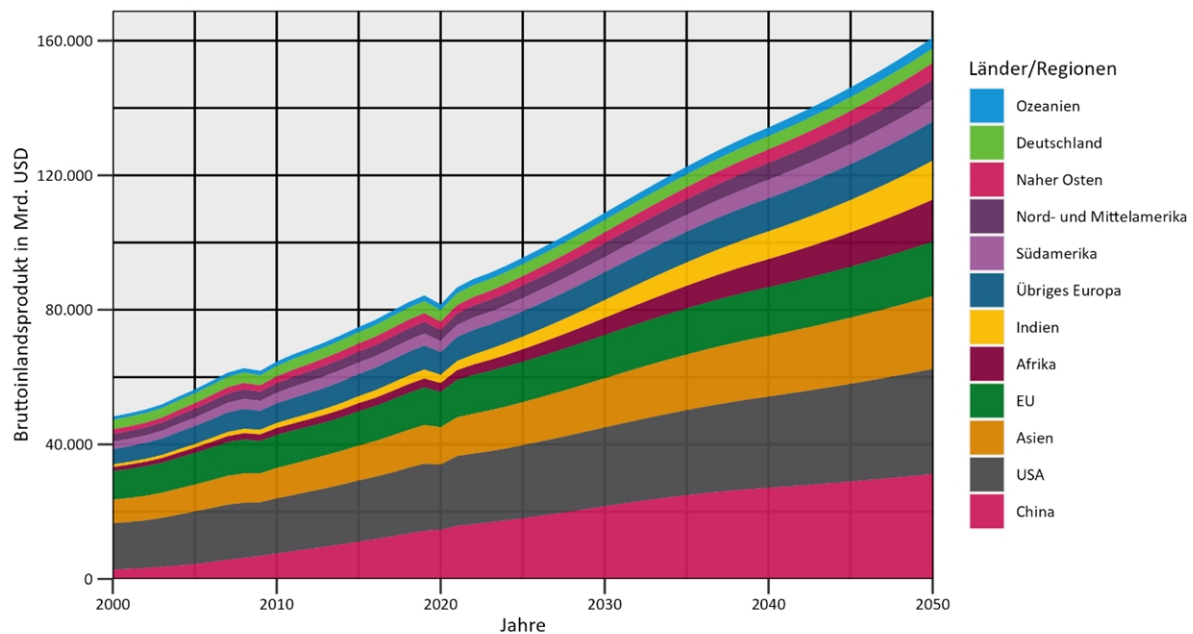
Die folgende Abbildung 101 zeigt, dass sich (angelehnt an die Projektionen der OECD) das globale Bruttoinlandsprodukt von 82 Billionen USD im Jahr 2020 bis zum Jahr 2050 ungefähr verdoppeln wird. China, die USA und Asien verzeichnen eine deutliche absolute Zunahme, wohingegen die europäischen Länder weitestgehend stagnieren. Zu deutlichen relativen



Anstiegen kommt es vornehmlich in Afrika und Indien – mit prognostizierter Vervielfachung des BIP.

**Abbildung 101: Trendszenario: Globale Ergebnisse – makroökonomische Entwicklung des Bruttoinlandsprodukts von 2000 bis 2050 in Milliarden USD**

Gesamtwert 2050 = 160.893,86

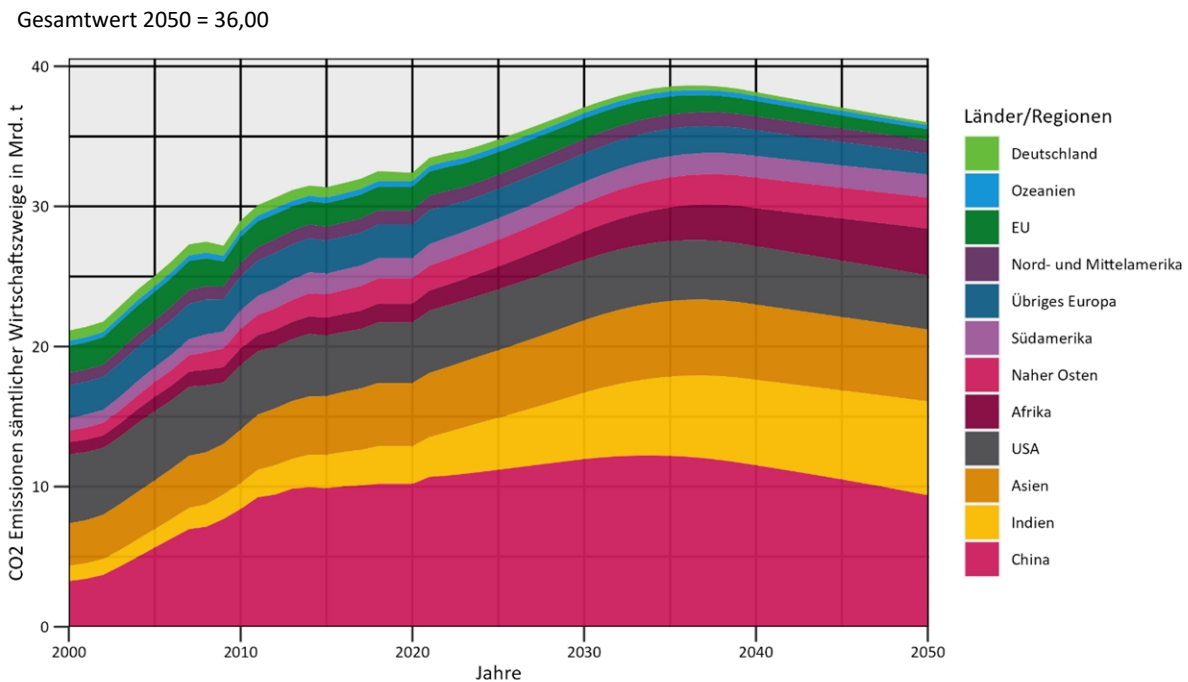


Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Für Deutschland wird langfristig ein stabiles, wenn auch moderates Wirtschaftswachstum angenommen. Trotz der langfristig rückläufigen deutschen Bevölkerungsprojektion projiziert das Trendszenario ein durchschnittliches reales Wachstum des Bruttoinlandsprodukts von annähernd 0,8 % pro Jahr.

Die aus globalen Produktionstätigkeiten resultierenden CO<sub>2</sub>-Emissionen sind wesentlicher Bestandteil des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks. Wie Abbildung 102 zeigt, steigen diese im Trendszenario zunächst weiter an und erreichen im Jahr 2036 ihren Höchstwert. In der Folge gehen die Emissionen leicht zurück, vornehmlich getrieben durch eine Reduktion des chinesischen Ausstoßes. Für Afrika und Indien wird davon ausgegangen, dass es auch nach 2035 zu höheren Emissionen kommt. In den übrigen asiatischen Volkswirtschaften und den USA ist ein moderater Rückgang zu beobachten, in Deutschland und der EU ein verhältnismäßig deutlicherer. In Deutschland nehmen die CO<sub>2</sub> Emissionen ab: Von 0,7 Milliarden Tonnen im Jahr 2000 auf 0,2 Milliarden Tonnen im Jahr 2050.

**Abbildung 102: Trendszenario: Globale Ergebnisse – produktionsseitige CO<sub>2</sub>-Emissionen sämtlicher Wirtschaftszweige von 2000 bis 2050 in Milliarden Tonnen (vgl. Anhang F, Tab. 144)**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Mit dem Bevölkerungswachstum und zunehmender wirtschaftlicher Aktivität geht ein höheres Maß der Rohstoffextraktion einher. Im Prognosezeitraum zeigt sich ein kontinuierlicher Anstieg der globalen Rohstoffextraktion. Insbesondere die Extraktion nichtmetallischer Mineralien nimmt deutlich zu und erreicht im Jahr 2050 gegenüber 2020 mehr als den doppelten Umfang. Im Bereich Biomasse kommt es ebenfalls zu einer deutlichen relativen wie absoluten Zunahme. Relativ konstant bleibt demgegenüber die Extraktionsmenge fossiler Energieträger, die nach 2020 nur leicht zunimmt. Deutlicher fällt das relative Wachstum bei der globalen Extraktion von Metallerzen aus. Auf diese entfällt jedoch ein vergleichsweise geringer Anteil an der Gesamtgröße.

Ausblicke auf die längerfristige Entwicklung der Weltwirtschaft und daraus ableitbare Einflüsse auf die globale Rohstoffinanspruchnahme wurden in den vergangenen Jahren vom *International Resource Panel* (Oberle *et al.*, 2019) sowie der Organisation für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung (OECD, 2018) veröffentlicht. Sowohl der IRP-Bericht als auch der OECD-Bericht können als maßgebende internationale Referenzen im Themenfeld der internationalen Ressourcenschonungspolitik angesehen werden. Die einzelnen Befunde dieser Berichte sind nicht unmittelbar untereinander vergleichbar.<sup>58</sup> In der Gesamtschau erlauben diese Berichte aber eine plausible Beurteilung der von unterschiedlichen umweltökonomischen Gruppen von Experten\*Expertinnen im Kontext der Ressourcenschonungspolitik als langfristig bedeutsam eingeschätzten Entwicklungstendenzen. An dieser Stelle erfolgt daher ein kurzer Abgleich der eigenen Parametrisierungen des Trendszenarios mit den jeweiligen Referenzsimulationen in IRP (2019) und OECD (2018).

<sup>58</sup> Der IRP-Bericht und der OECD-Bericht analysieren jeweils unterschiedliche Datensätze und projizieren die relevanten Treiber der globalen Ressourceninanspruchnahme mit unterschiedlichen Modellen.

Der inhaltliche Vergleich der eigenen Trendprojektion mit diesen Referenzsimulationen wird dadurch erschwert, dass in IRP (2019) sowie OECD (2018) jeweils Modellrechnungen bis zum Jahr 2060 erstellt wurden. Detailergebnisse der jeweiligen Modellsimulationen werden daher sowohl in IRP (2019) als auch in OECD (2018) insbesondere für das Simulationsjahr 2060 dokumentiert. Dennoch verdeutlicht eine Betrachtung der in den jeweiligen Umfeldparametrisierungen unterstellten Wachstumsraten der Weltbevölkerung, dass die im gegenständigen Vorhaben unterstellten jährlichen Wachstumsraten (0,72 % im globalen Durchschnitt) nahezu identisch sind mit den in der OECD-Studie („*global population is projected to grow by 0.7% per year on average*“, OECD (2018), S. 64) sowie in der IRP-Studie unterstellten Wachstumsraten („*all scenarios, including Historical Trends, assume population grows from 7.3 billion people in 2015 to 10.2 billion people in 2060, an average annual growth of 0.7 per cent.*“, IRP (2019), S. 192). In sämtlichen drei Szenarioanalysen wird zudem unterstellt, dass diese globalen Entwicklungen wesentlich durch ein starkes Bevölkerungswachstum in Afrika getrieben werden.

Das globale reale Bruttoinlandsprodukt steigt in der eigenen Parametrisierung des Trend-szenarios pro Jahr um durchschnittlich 2,29 % an. In IRP (2019) wurde diesbezüglich eine langfristige durchschnittliche jährliche Wachstumsrate in Höhe von 2,2 % unterstellt. Im Vergleich hierzu basiert der OECD *Outlook* auf einer dynamischeren Wachstumsannahme zur zukünftigen Entwicklung der globalen wirtschaftlichen Aktivitäten (durchschnittlich 2,8 % p.a.). Dem IRP Report können keine weitergehenden Detailergebnisse zu nationalen Entwicklungen entnommen werden. Im OECD Ausblick ist aber dokumentiert, dass dieser mittelfristig für China und Indien ein im Vergleich zu vorherigen Entwicklungen weniger dynamisches Wirtschaftswachstum unterstellt. Langfristig werden stattdessen insbesondere für den afrikanischen Kontinent deutlich höhere Wachstumsraten als zuvor erwartet. All diese soeben genannten regionalen Annahmen kennzeichnen ebenfalls die ökonomischen Wachstumsprojektionen der im gegenständigen Vorhaben parametrisierten Trendprojektion.

Ein Vergleich der klimapolitischen Befunde der Szenarioprojektionen wird dadurch erschwert, dass im IRP Report wie auch im Bericht der OECD jeweils CO<sub>2</sub>-Äquivalente modelliert werden. Hiervon abweichend basieren die eigenen Modellierungen auf einer Simulation direkter CO<sub>2</sub>-Emissionen. Generell ist aber offensichtlich, dass IRP sowie OECD in ihren jeweiligen Referenzszenarien global ein deutliches Verfehlen ambitionierter klimapolitischer Ziele unterstellen: Im Referenzszenario des IRP Reports steigen die globalen Treibhausgasemissionen bis zum Jahr 2060 jährlich um durchschnittlich ca. 0,7 % an. Der Bericht der OECD kategorisiert Treibhausgasemissionen als „*Materials Management Emissions*“ sowie (im Gesamtumfang weniger bedeutende) „*Non-materials Management Emissions*“. Die Annahmen zur Entwicklung der „*Materials Management Emissions*“ (durchschnittliches jährliches Wachstum um mehr als 0,9 %) können mit den eigenen Projektionen der globalen sektoralen CO<sub>2</sub>-Emissionen (durchschnittliches jährliches Wachstum um ca. 0,35 %) verglichen werden.

Die eigene Projektion eines Anstiegs der globalen sektoralen CO<sub>2</sub>-Emissionen um annähernd 11,1 % zwischen 2020 und 2050 stimmt somit grundsätzlich mit dem in den Referenzsimulationen von IRP (2019) wie auch OECD (2018) unterstellten Verfehlen global ambitionierter klimapolitischer Zielsetzungen überein. Weitergehende Detailvergleiche (bspw. anhand einer Betrachtung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks für Deutschland) können nicht durchgeführt werden, da weder IRP (2019) noch OECD (2018) über die Entwicklung nationaler Fußabdruck-Indikatoren berichten.

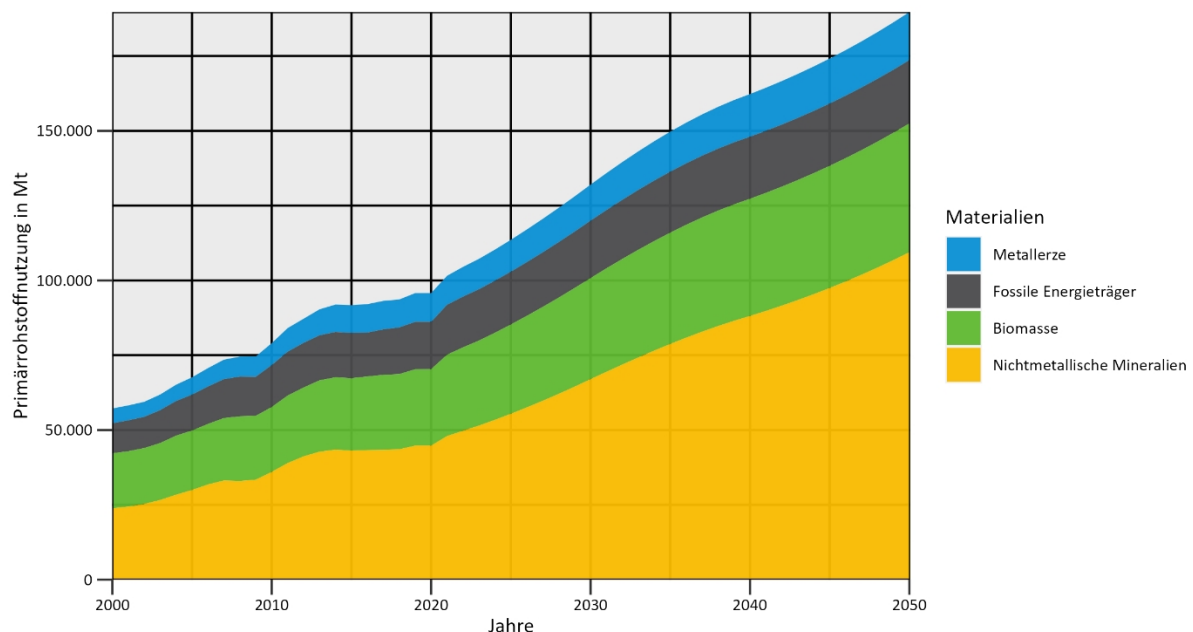
Die globalen Rohstoffextraktionen steigen in der eigenen Trendprojektion jährlich um durchschnittlich 2,3 % an (Abbildung 103). Im Vergleich zum IRP (2019) Referenzszenario (Wachstum der globalen Rohstoffextraktionen um durchschnittlich 1,8 % p.a.) wie auch dem OECD

(2018) Referenzszenario (Wachstum der globalen Rohstoffextraktionen um durchschnittlich 1,5 % p.a.) erweist sich diese Wachstumsdynamik als relativ hoch. Im Gesamtbild erscheinen diese Abweichungen in den Simulationsergebnissen aber weder widersprüchlich noch unplausibel.

Eine Detailbetrachtung der für die Hauptrohstoffgruppen projizierten Extraktionsentwicklungen zeigt, dass die eigenen Modellierungen im Vergleich zu den IRP-Bewertungen für Metallerze nahezu identische jährliche Wachstumsraten implizieren. Mit einem projizierten Wachstum um durchschnittlich 1,75 % p.a. weisen die eigenen Simulationen der Extraktionen biotischer Rohstoffe zudem nur sehr geringe Abweichungen von den entsprechenden IRP-Wachstumsprojektionen (1,4 % p.a.) auf. Deutlicher sind die Abweichungen der zukünftigen Wachstumsraten der Extraktionen fossiler Rohstoffe (0,98 % p.a. in der eigenen Trendprojektion, IRP: 0,2 % p.a.) sowie, insbesondere, bei den nichtmetallischen Mineralien: IRP (2019) projiziert einen langfristigen durchschnittlichen globalen jährlichen Anstieg der genutzten Extraktionen nichtmetallischer Mineralien um 2,2 %. In der eigenen Trendprojektion steigen die genutzten Extraktionen nichtmetallischer Mineralien global jährlich um durchschnittlich 3,0 % an. Die Abweichungen der projizierten Wachstumsraten der Extraktionen fossiler Rohstoffe kann dadurch erklärt werden, dass für den IRP-Bericht eine detaillierte Kalibrierung der dort projizierten Treibhausgasemissionen an exogene Referenzwerte (van Vuuren *et al.* 2011, Szenario *RCP6.0*) vorgenommen wurde. Grundsätzlich könnten entsprechend detaillierte Kalibrierungen klimapolitischer Szenarioannahmen auch in den eigenen Trendprojektionen berücksichtigt werden. Hierfür müssten, insbesondere in den sich im Simulationszeitraum emissionsintensiv entwickelnden Volkswirtschaften (vergleiche hierzu Abbildung 102), regionale Transformationsannahmen zur weitergehenden Dekarbonisierung der jeweiligen Wirtschaftsstrukturen parametrisiert werden. Das gegenständliche Vorhaben zielte nicht auf die Simulation eines entsprechend umfangreich parametrisierten spezifischen Klimaszenarios ab. Entsprechende Weiterentwicklungen verbleiben daher für spätere Anwendungen des Bewertungsansatzes. Da ein Großteil der globalen Extraktionstätigkeiten bereits heute auf die Hauptrohstoffgruppe der nichtmetallischen Mineralien entfällt, wäre es dann ebenfalls spannend und naheliegend, mögliche Ursachen der Ergebnisabweichungen für diese Hauptrohstoffkategorie weitergehend zu analysieren. Im gegenständigen Vorhaben konnten entsprechende Methodenvergleiche nicht durchgeführt werden.

**Abbildung 103: Trendszenario: Globale Ergebnisse – Rohstoffextraktionen von 2000 bis 2050 in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 145)**

Gesamtwert 2050 = 189.686,31

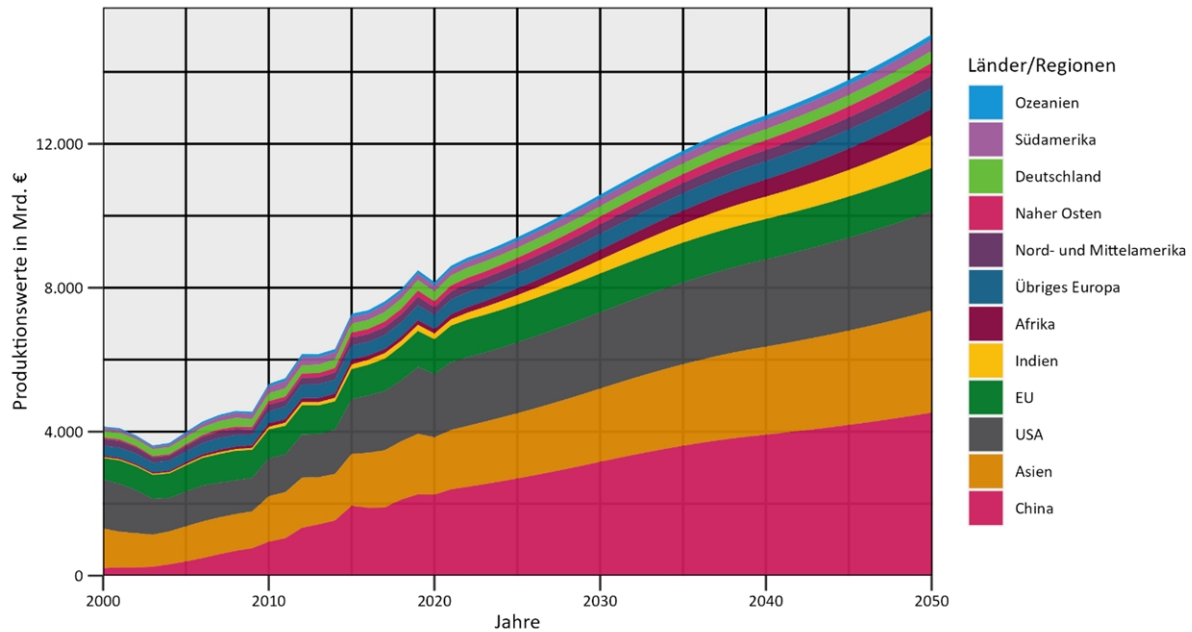


Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die zukünftige Weltmarktentwicklung für IKT-Güter und -Dienstleistungen wird im Trendszenario mit langfristig stabiler Dynamik fortgeschrieben. Wie in Abbildung 104 dargestellt ist, steigt das globale Produktionsniveau der IKT-Güter und -Dienstleistungen zwischen den Jahren 2020 (8.157 Milliarden Euro) und 2050 (15.040 Milliarden Euro) insgesamt um mehr als 84 % an. Da für das Trendszenario keine ergänzenden Annahmen zur zukünftigen Entwicklung der Strukturen globaler Lieferketten von IKT-Gütern und -Dienstleistungen parametrisiert wurden, bleiben entsprechende Produktionstätigkeiten während des gesamten Simulationszeitraums auf wenige Weltregionen konzentriert. Die Produktionswerte Chinas, weiterer ostasiatischer Herstellerländer, Südasiens (ohne Indonesien) sowie der Vereinigten Staaten summieren sich in der Trendprojektion für das Jahr 2050 auf einen Gesamtwert von annähernd 9.760 Milliarden Euro. Dieser Wert repräsentiert nahezu zwei Drittel (64,9 %) des Gesamtwerts sämtlicher im Jahr 2050 global produzierter IKT-Güter und -Dienstleistungen (Referenzwert dieses Weltmarktanteils des Jahres 2020: 67,4 %). Der Anteil Chinas an der globalen Produktion von IKT-Gütern und -Dienstleistungen steigt dabei im Zeitverlauf von 27,6 % im Jahr 2020 auf 30,1 % im Jahr 2050 an. Für Deutschland wird ein Produktionswachstum um insgesamt 19,2 % (von gut 280 Milliarden Euro im Jahr 2020 auf annähernd 334 Milliarden Euro im Jahr 2050) projiziert. Mit diesem im internationalen Vergleich geringen Wachstum, verliert die Herstellung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland in der Trendprojektion langfristig an globaler Bedeutung. Mit einem projizierten Anteil von 2,2 % am Gesamtwert der global im Jahr 2050 produzierten IKT-Güter und -Dienstleistungen bleibt diese Branche der deutschen Wirtschaft auch zukünftig international relevant. Andere Weltregionen holen diesbezüglich allerdings auf. Das markanteste Wachstum der Herstellung von IKT-Produkten wird dabei für Indien projiziert: Während in Indien im Jahr 2020 entsprechende Güter- und Dienstleistungen in einem Gesamtwert von (etwas mehr als) 160 Milliarden Euro hergestellt wurden, steigt dieser Wert in der Trendprojektion bis zum Jahr 2050 auf (etwas mehr als) 905 Milliarden Euro an.

**Abbildung 104: Trendszenario: Globale Ergebnisse – Produktion von IKT-Gütern und -Dienstleistungen von 2000 bis 2050 in Milliarden Euro**

Gesamtwert 2050 = 15.039,94



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

## 6.2.2 Entwicklungen in Deutschland

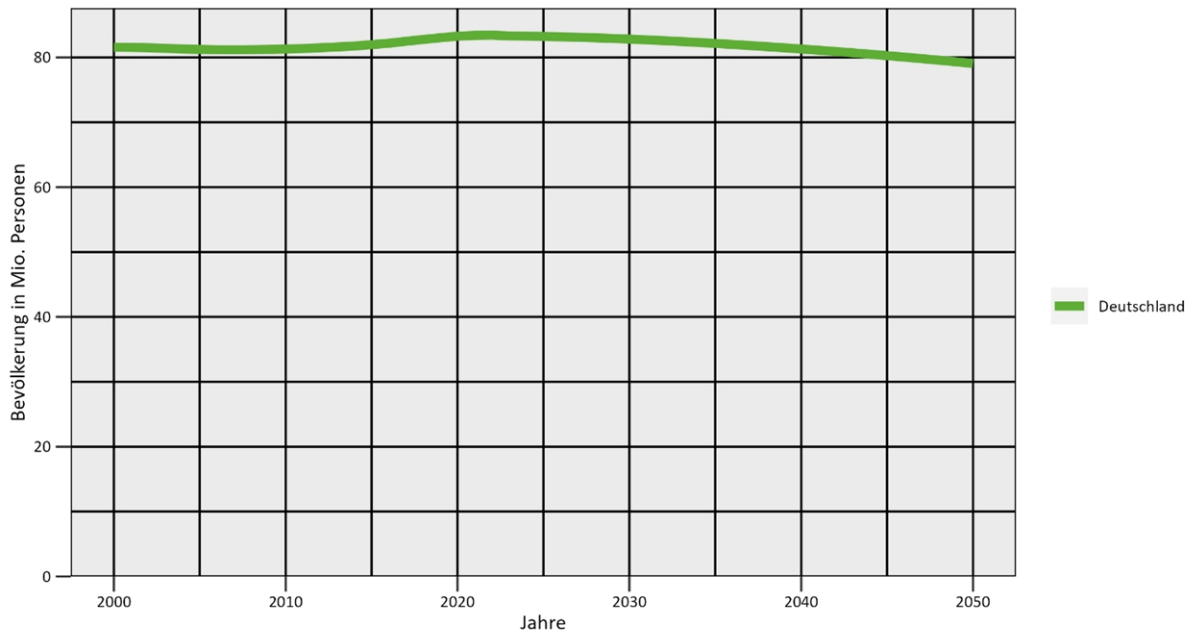
Entsprechend der UN-Projektionen (United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022) geht die deutsche Bevölkerung nach 2022 langsam, aber kontinuierlich zurück. Abbildung 105 zeigt, dass die Bevölkerungszahl in Deutschland bis 2046 über 80 Millionen liegt. Zum Ende des Betrachtungszeitraum reduziert sich diese Zahl auf 79 Millionen.

Der Blick auf Abbildung 106 zeigt, dass das deutsche Bruttoinlandsprodukt im Trendszenario trotz sinkender Bevölkerungszahlen **stetig wächst**. Gemessen an früheren Wachstumsraten ist dieses Wachstum aber lediglich schwach ausgeprägt: Die durchschnittliche Wachstumsrate liegt in der Trendprojektion unterhalb von 0,9 % pro Jahr. Im Vergleich hierzu ist das deutsche Bruttoinlandsprodukt laut Angaben des Statistischen Bundesamts im Zeitraum 2010 bis 2020 (welcher mit der Rezession der Corona-Krise endet) preisbereinigt um durchschnittlich 1,1 % jährlich gewachsen. Die durchschnittliche jährliche Wachstumsrate des Zeitraums 2000 - 2010 (in welchem auch die Rezession der Finanzmarktkrise auftrat) entsprach 0,9 %. In früheren Dekaden wurden in der Regel deutlich höhere jährliche Wachstumsraten (bis zu 8,2 % im Durchschnitt der Jahre 1950 bis 1960) erreicht.<sup>59</sup>

<sup>59</sup> <https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/BIP-Langfristig.html> (Stand: 19.12.2023).

**Abbildung 105: Trendszenario: Bevölkerungsentwicklung in Deutschland von 2000 bis 2050 in Millionen Personen**

Wert 2050 = 79,06

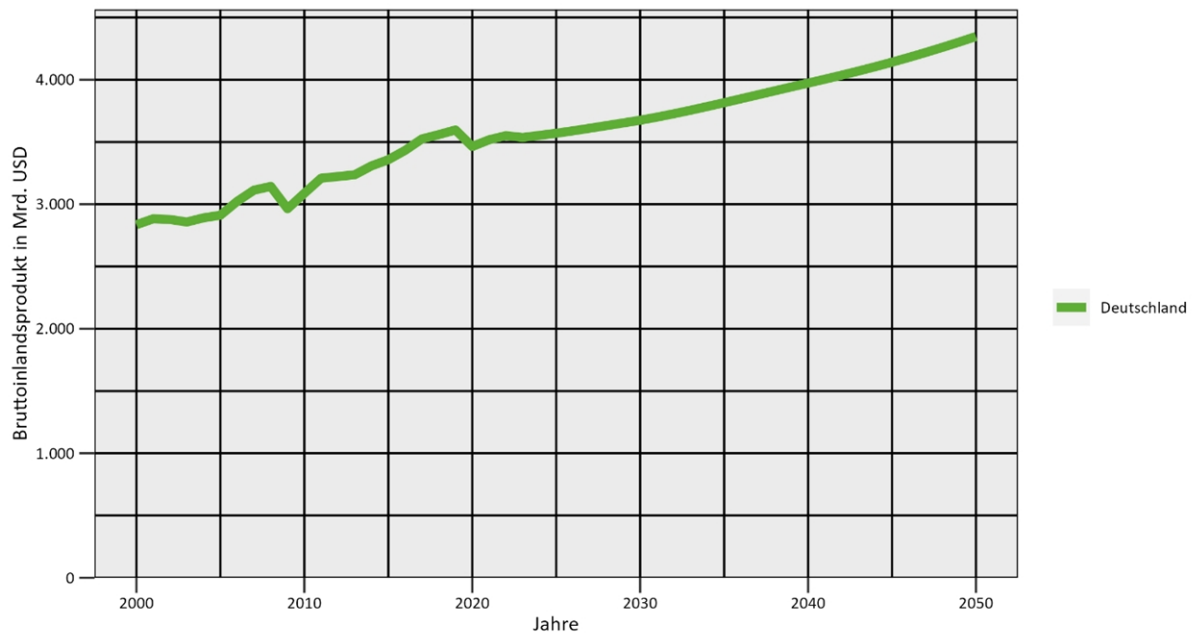


Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Mit diesen Wachstumsraten steigt das deutsche Bruttoinlandsprodukt im Trendszenario zwischen den Jahren 2020 und 2050 insgesamt um 25,5 %. Wie bereits bei Vorstellung der Abbildung 101 erwähnt, werden für das globale Bruttoinlandsprodukt gleichzeitig bis zum Jahr 2050 durchschnittliche jährliche Wachstumsraten in einer Größenordnung von nahezu 2,3 % unterstellt, woraus (nahezu) eine Verdopplung der globalen Wirtschaftsleistung zwischen den Jahren 2020 und 2050 resultiert. Infolge dieser globalen Konvergenzentwicklungen entwickelt sich die Exportnachfrage aus dem Ausland in der Trendprojektion deutlich dynamischer als die inländische Endnachfrage in Deutschland.

**Abbildung 106: Trendszenario: Entwicklung des deutschen Bruttoinlandsprodukts von 2000 bis 2050 in Milliarden USD**

Wert 2050 = 4.347,23



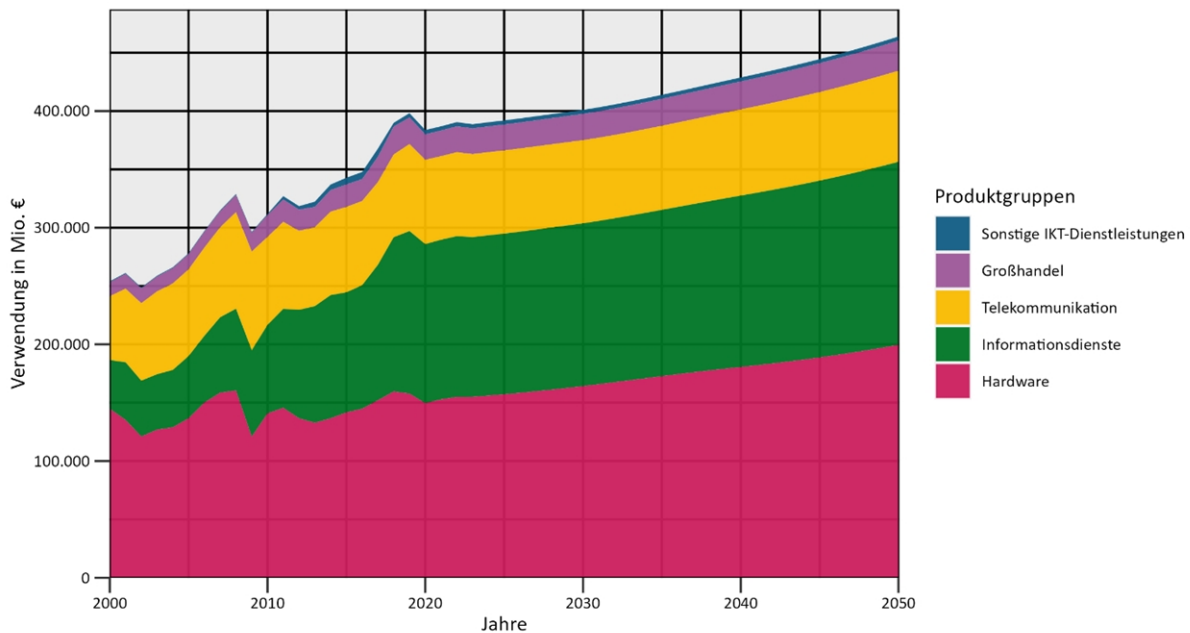
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die zeitliche Veränderung der monetären Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland ist in Abbildung 107 differenziert nach Produktgruppen dargestellt. Auf die Produktgruppe Hardware entfällt dabei der größte Anteil – sowohl aktuell als auch im Verlauf der Projektion bis zum Jahr 2050. Der Gesamtwert sämtlicher in Deutschland verwendeten Hardware-Produkte steigt im Simulationszeitraum von (nahezu) 150 Milliarden Euro im Jahr 2020 auf annähernd 200 Milliarden Euro im Jahr 2050 an. Dieses Wachstum ist deutlich markanter als das Wachstum der übrigen in den Analysen berücksichtigten Produktgruppen: Der Wert der in Deutschland verwendeten Informationsdienstleistungen steigt von 136 Milliarden Euro im Jahr 2020 bis zum Jahr 2050 auf nahezu 157 Milliarden Euro. Für Telekommunikationsdienstleistungen wird ein Anstieg von 72 Milliarden Euro im Jahr 2020 auf 78 Milliarden Euro im Jahr 2050 projiziert. Der Wert der digitalisierungsrelevanten gesamtwirtschaftlichen Handelsdienstleistungen steigt im selben Zeitraum von annähernd 22 Milliarden Euro auf nahezu 26 Milliarden Euro an. Die Entwicklung „sonstiger“ IKT-Dienstleistungen stagniert im Zeitablauf. Mit einem für das Jahr 2050 projizierten Gesamtwert von weniger als 60 Millionen Euro erweist sich diese Verwendungskomponente in der makroökonomischen Betrachtung für Deutschland als nahezu vernachlässigbar.



**Abbildung 107: Trendszenario: Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2050 nach Produktgruppen in Millionen Euro**

Gesamtwert 2050 = 463.854,06



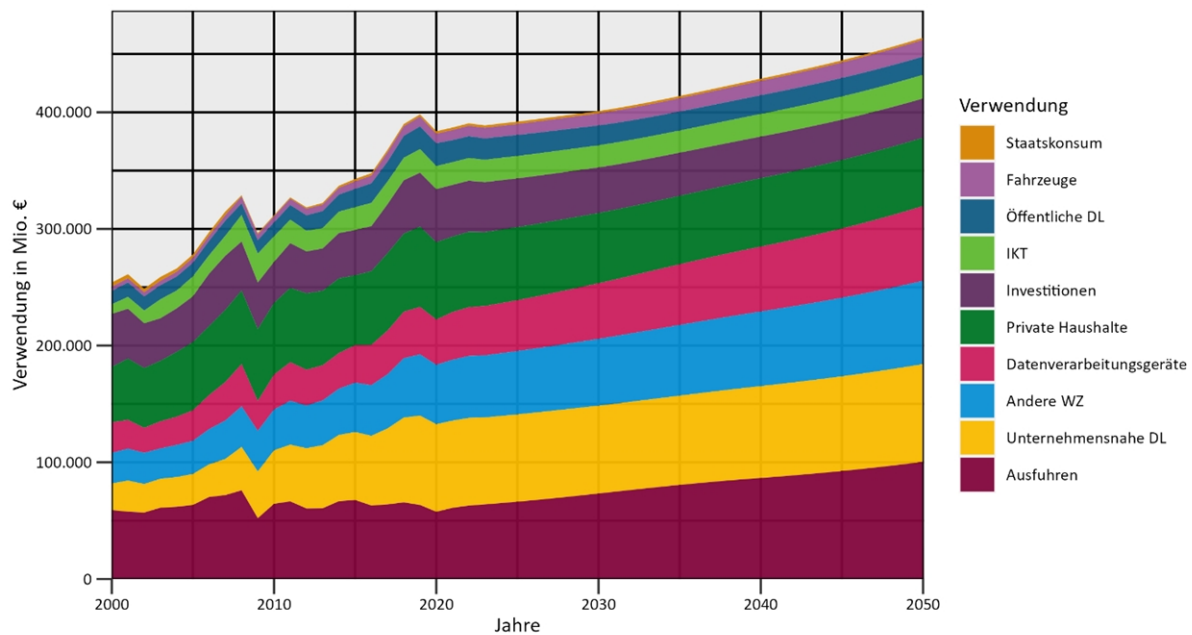
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 108 differenziert analog dazu die IKT-Verwendung der deutschen Volkswirtschaft nach Nachfragekomponenten. Die Entwicklung im Simulationszeitraum 2020 bis 2050 ist durch einen deutlichen Anstieg der Nachfrage nach IKT-Produkten für Ausfuhrzwecke geprägt. Von einem Wert in Höhe von rund 58 Milliarden Euro im Jahr 2020 ausgehend, steigt diese Nachfragekomponente bis zum Ende des Simulationszeitraums auf über 100 Milliarden Euro an. Die übrigen Endnachfragekomponenten entwickeln sich im Vergleich hierzu weniger dynamisch: Die IKT-Ausgaben für den Konsum privater Haushalte und Organisationen ohne Erwerbszweck, den Staatskonsum sowie für Investitionen sinken langfristig von insgesamt annähernd 114 Milliarden Euro im Jahr 2020 auf 94 Milliarden Euro im Jahr 2050 ab.

Aufgrund des Anstiegs der Nachfrage nach IKT-Produkten für Ausfuhrzwecke um insgesamt über 74 % erweist sich die Vorleistungsnachfrage zur Erbringung unternehmensnaher Dienstleistungen im Jahr 2050 nur noch als zweitwichtigste Nachfragekomponente der gesamten deutschen Verwendung von IKT-Produkten. Ausgehend von einem Wert von rund 75 Milliarden Euro im Jahr 2020, steigt der Wert der als Vorleistungsnachfrage zur Erbringung unternehmensnaher Dienstleistungen verwendeten IKT-Produkte bis zum Jahr 2050 auf nahezu 84 Milliarden Euro an. Ein sehr dynamisches Wachstum kennzeichnet daneben die Entwicklung der Vorleistungsnachfrage zur Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten (2020: 39 Milliarden Euro, 2050: 64 Milliarden Euro). Während die intermediäre Nachfrage des IKT-Sektors selbst im Zeitverlauf weitestgehend konstant bleibt (2020: etwas weniger als 20 Milliarden Euro, 2050: etwas mehr als 20 Milliarden Euro), steigt die Summe sämtlicher als Vorleistungen genutzter IKT-Güter und -Dienstleistungen zwischen den Jahren 2020 und 2050 insgesamt um mehr als 170 Milliarden Euro an. Dadurch gewinnt die Vorleistungsnachfrage langfristig insgesamt an volkswirtschaftlicher Bedeutung für die Verwendung von IKT-Produkten. Im Jahr 2050 werden insgesamt mehr als 58 % sämtlicher verwendeter IKT-Produkte als Vorleistungen genutzt (im Gegensatz zu annähernd 39 % im Jahr 2000).

**Abbildung 108: Trendszenario: Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland von 2000 bis 2050 nach nachfragenden Wirtschaftsbereichen in Millionen Euro**

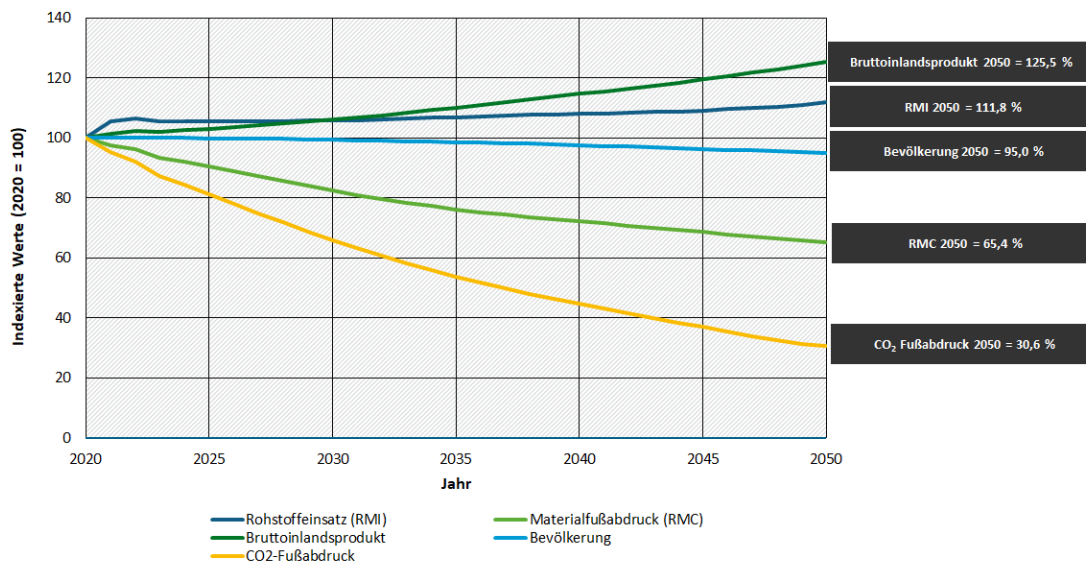
Gesamtwert 2050 = 463.854,07



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 109 fasst zentrale gesamtwirtschaftliche Berichtsgrößen des Trendszenarios für Deutschland zusammen. Der gesamtwirtschaftliche Rohstoffeinsatz, der gesamtwirtschaftliche Rohstoff-Fußabdruck, das deutsche Bruttoinlandsprodukt, die deutsche Bevölkerungszahl sowie der deutsche CO<sub>2</sub>-Fußabdruck wurden zur besseren Vergleichbarkeit als Indexzeitreihen mit dem Basisjahr 2020 dargestellt. Unter Hinweis auf die abgebildeten Entwicklungen prägen ambitionierte nationale klimapolitische Fortschritte das Trendszenario. Trotz global bis zur Mitte der 2030er-Jahre ansteigender industrieller CO<sub>2</sub>-Emissionen (Abbildung 102) entwickelt sich der deutsche CO<sub>2</sub>-Fußabdruck im Trendszenario stetig rückläufig. Im gesamten Zeitraum zwischen 2020 und 2050 geht er um annähernd 70 % zurück. Auch der nationale Rohstoff-Fußabdruck entwickelt sich langfristig rückläufig. Allerdings ist in diesem Fall zwischen den Jahren 2020 und 2030 nur ein Rückgang von ungefähr einem Drittel des ursprünglichen Niveaus zu verzeichnen. Beide Indikatoren erreichen somit eine absolute Entkopplung ihrer jeweiligen Entwicklung in Relation zum Wirtschaftswachstum. Im Gegensatz hierzu ist beim Rohstoffeinsatz der deutschen Wirtschaft (**RMI = RMC + Exportnachfrage**) langfristig lediglich eine relative Entkopplung von der wirtschaftlichen Entwicklung zu beobachten.

**Abbildung 109: Trendszenario: Entwicklung zentraler gesamtwirtschaftlicher Schlüsselindikatoren für Deutschland von 2020 bis 2050 in Prozent (vgl. Anhang F, Tab.146)**



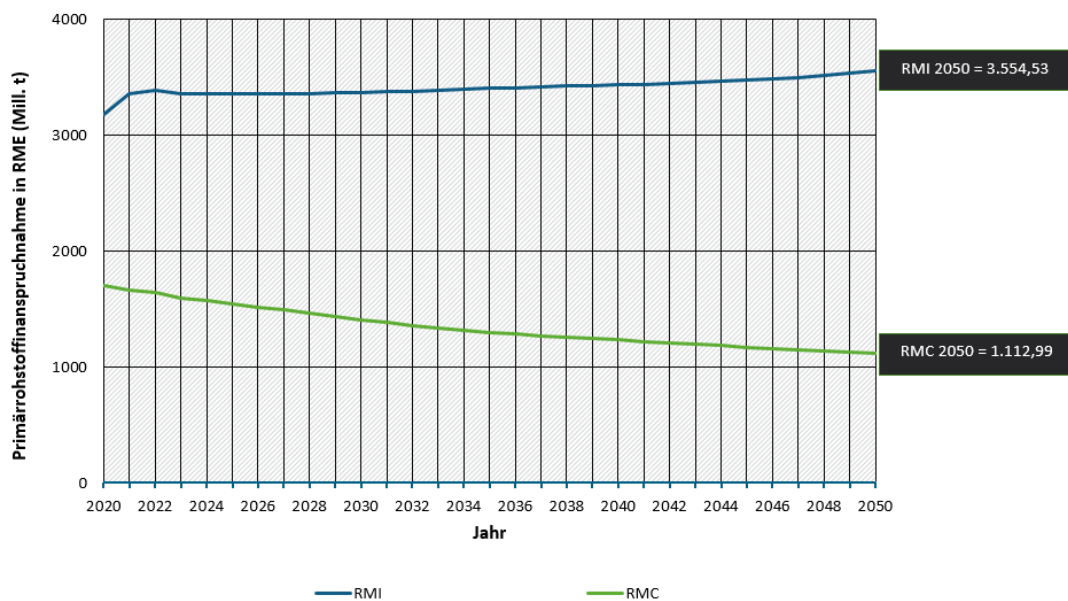
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Zwischen den Jahren 2020 und 2050 wird der deutsche **Rohstoffkonsum** (RMC) um mehr als ein Drittel reduziert. Der gesamtwirtschaftliche deutsche **Rohstoffeinsatz** (RMI) steigt im gleichen Zeitraum insgesamt um rund 12 % an. Die unterschiedliche Dynamik der gesamtwirtschaftlichen Indikatoren RMI und RMC im Trendszenario erklärt sich durch die unterschiedlichen sozioökonomischen Entwicklungen in Deutschland und dem Rest der Welt. Da die übrigen Weltregionen im Vergleich zu Deutschland ein stärkeres durchschnittliches Wirtschaftswachstum aufweisen, entwickelt sich in der Simulation die Exportnachfrage aus dem Ausland dynamischer als die inländische Endnachfrage in Deutschland.

In ihrer Zusammensetzung zeigen beide gesamtwirtschaftlichen Materialindikatoren langfristig qualitativ übereinstimmende Entwicklungstendenzen: 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 %).

Die in dieser Abbildung indiziert dargestellten Projektionsergebnisse für das deutsche Bruttoinlandsprodukt sowie die deutsche Bevölkerungsanzahl wurden bereits zuvor bei der Darstellung der absoluten Simulationsergebnisse vorgestellt (Abbildung 105 sowie Abbildung 106). Die absoluten Simulationsergebnisse zur Entwicklung des RMC, RMI und CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks werden in den nachfolgenden Abbildungen dargestellt.

**Abbildung 110: Trendszenario: Entwicklung des Rohstoffkonsums und des Rohstoffeinsatzes von 2020 bis 2050 in Millionen Tonnen**

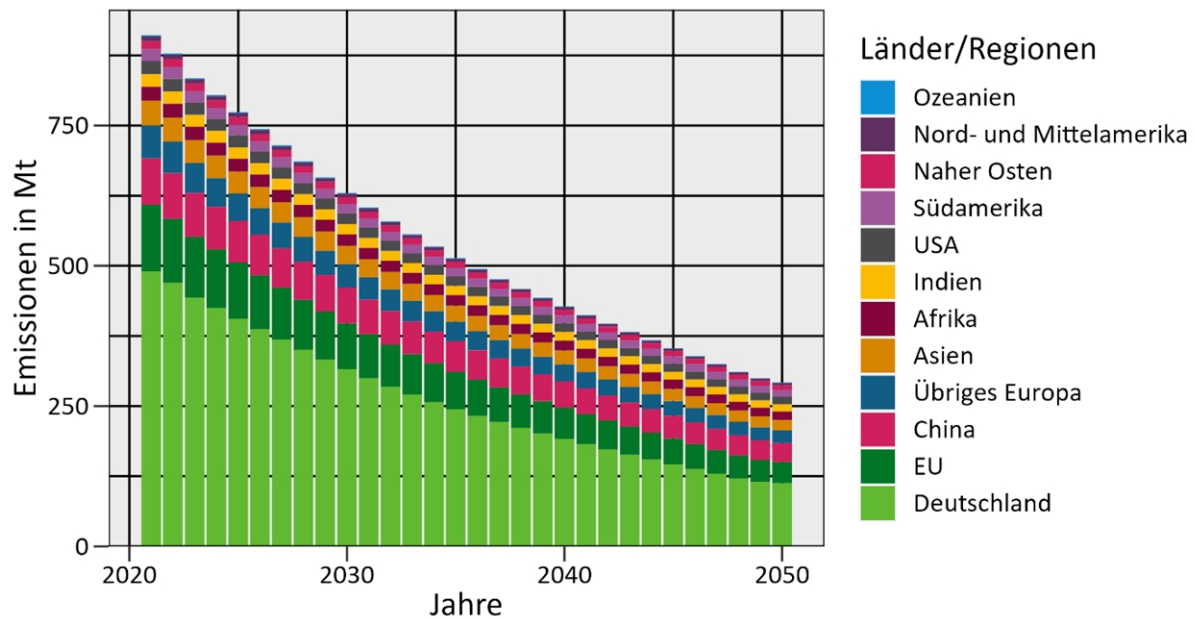


Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 110 zeigt die eigenen Projektionsergebnisse für den deutschen Rohstoffkonsum (RMC) sowie den deutschen Rohstoffeinsatz (RMI). Wie zuvor bei der Vorstellung von Abbildung 66 erläutert wurde, weisen die eigenen Berechnungen für das Jahr 2020 einen Gesamtwert von 1.722 Millionen Tonnen Rohmaterialäquivalenten für den deutschen RMC aus. In der Trendprojektion wird der deutsche Rohstoffkonsum bis zum Jahr 2050 um annähernd 590 Millionen Tonnen auf einen Jahreswert in Höhe von (ungefähr) 1.114 Millionen Tonnen reduziert. Die größten Reduktionen werden dabei für fossile Rohstoffe (Reduktion um mehr als -240 Millionen Tonnen bis zum Jahr 2050) und biotische Rohstoffe (Reduktion um mehr als -210 Millionen Tonnen bis zum Jahr 2050) projiziert. Die gesamtwirtschaftlichen Inanspruchnahmen nicht-metallischer Mineralien (Reduktion um mehr als -70 Millionen Tonnen bis zum Jahr 2050) sowie von Metallerzen (Reduktion um annähernd -60 Millionen Tonnen bis zum Jahr 2050) entwickeln sich ebenfalls rückläufig, tragen allerdings weniger stark zur insgesamt projizierten Reduktion des deutschen Rohstoffkonsums bei.

Aus Abbildung 67 ist bereits bekannt, dass die eigenen Berechnungen für den deutschen RMI des Jahres 2020 einen Gesamtwert von (annähernd) 3.179 Millionen Tonnen Rohmaterialäquivalenten ergeben. In der Trendprojektion steigt dieser Wert bis zum Jahr 2050 um annähernd 380 Millionen Tonnen auf einen Jahreswert in Höhe von (ungefähr) 3.555 Millionen Tonnen. Dieser Anstieg ist auf den deutlich erhöhten Einsatz nicht-metallischer Mineralien zurückzuführen (Anstieg um mehr als 620 Millionen Tonnen im Zeitraum 2020 bis 2050). Auch die Inanspruchnahme von Metallerzen steigt nach dem RMI-Konzept langfristig an (Anstieg um mehr als 160 Millionen Tonnen bis zum Jahr 2050). Diese ansteigenden Rohstoffinanspruchnahmen werden im Aggregat teilweise durch Rückgänge bei den fossilen Rohstoffen (Reduktion um mehr als 250 Millionen Tonnen zwischen 2020 und 2050) sowie bei der Inanspruchnahme biotischer Rohstoffe (Reduktion um nahezu 160 Millionen Tonnen bis zum Jahr 2050) gedämpft.

**Abbildung 111: Trendszenario: Gesamtwirtschaftlicher CO<sub>2</sub>-Fußabdruck in Deutschland von 2020 bis 2050 in Megatonnen**



Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 111 zeigt die eigenen Projektionsergebnisse für den deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Von einem Wert von (ungefähr) 954 Megatonnen im Jahr 2020 ausgehend, wird dieser bis zum Jahr 2050 um (mehr als) 660 Megatonnen auf annähernd 290 Megatonnen reduziert. Diese Entwicklung beruht überwiegend auf einer deutlichen Senkung der Emissionen im Inland (Reduktion um mehr als 410 Megatonnen auf nahezu 113 Megatonnen). Auch für sämtliche übrige Weltregionen entwickeln sich die absoluten Emissionsbeiträge zum gesamten deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck bis zum Jahr 2050 jeweils rückläufig. Aufgrund regional unterschiedlicher klimapolitischer Ambitionsniveaus werden in der Trendprojektion allerdings deutliche strukturelle Veränderungen des deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks projiziert: Während die in übrigen europäischen Regionen freigesetzten CO<sub>2</sub>-Emissionen langfristig stabil (etwas mehr als) 15 % zum deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck beitragen, steigt der Anteil außereuropäischer Weltregionen am deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck von 29,5 % im Jahr 2020 auf 45,9 % im Jahr 2050 an. Für das Jahr 2050 werden dabei die größten Auslandsbeiträge zum deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck für China (33,4 Megatonnen), Indien (13,2 Megatonnen), die Vereinigten Staaten (13,2 Megatonnen), Russland (11,9 Megatonnen) und die Gruppe der Mercosur-Länder (10,4 Megatonnen) projiziert.

### Zwischenfazit Trendprojektion

- ▶ Das Modell **GRAMOD** lässt sich auch zur **Simulation zukünftiger globaler Ressourceninanspruchnahmen und Treibhausgasemissionen gesamtwirtschaftlicher Entwicklungen in Deutschland** nutzen.
- ▶ Unter Vorgabe **exogener Szenarioannahmen** bezüglich des **Wirtschaftswachstums** und der **Bevölkerungsentwicklung** in den abgebildeten **34 globalen Wirtschaftsregionen** schreibt **GRAMOD die globalen Wirtschaftsstrukturen und sämtliche für Fußabdruck-Berechnungen benötigten Daten dynamisch bis zum Jahr 2050 fort.**
- ▶ **Die Trendprojektion ist keine Wirtschaftsprognose, sondern ein plausibles zukünftiges Entwicklungsszenario, das als Grundlage zur Bewertung alternativer Entwicklungsszenarien dient.**
- ▶ Im gegenständigen Vorhaben wurde eine Trendprojektion parametrisiert, die **die globalen Wachstumsprojektionen des OECD Economic Outlook vom Oktober 2021 (OECD, 2021) sowie die Bevölkerungsprojektionen der World Population Prospects 2022 der Vereinten Nationen (United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division, 2022)** berücksichtigt. Diese Vorgaben unterstellen **eine insgesamt steigende globale Bevölkerungsentwicklung** und eine ungefähre **Verdopplung des globalen Bruttoinlandsprodukts** zwischen den Jahren 2020 und 2050.
- ▶ Das **globale Produktionsniveau der IKT-Güter und -Dienstleistungen verdoppelt sich** unter diesen Annahmen nahezu zwischen den Jahren 2020 und 2050.
- ▶ Darüber hinaus können in **allen Szenarioprojektionen weitere individuelle Szenarioannahmen parametrisiert** werden. Das Trendszenario unterstellt **ambitionierte nationale klimapolitische Fortschritte, allerdings bei bis zur Mitte der 2030er-Jahre weiterhin global ansteigenden CO<sub>2</sub>-Emissionen.**
- ▶ Aus diesen Parametrisierungen resultiert für Deutschland **ein langfristig stabiles (wenn auch geringes) Wirtschaftswachstum bei gleichzeitiger absoluter Entkopplung von globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen und Rohstoffkonsum (RMC).**
- ▶ Für den deutschen **Rohstoffeinsatz (RMI)** projiziert das Trendszenario eine **relative Entkopplung** vom Wirtschaftswachstum.

## 6.3 Ergebnisse: Die Simulationen

### 6.3.1 Alternative Szenarioparametrisierungen

Neben der Trendprojektion, die im vorherigen Unterkapitel beschrieben ist, parametrisierte das **Vorhaben sechs alternative Zukunftsszenarien**. Diese Szenarien dienen dazu, die Effekte zentraler Einflussfaktoren der zukünftigen Digitalisierung in Deutschland abzubilden. Im Projektverlauf fiel die Wahl auf folgende Einflussfaktoren als in den Simulationen zu variierende „zentrale Stellschrauben“:

Effizienzsteigerungen in der Produktion

Bedarfs- und Konsumententwicklungen der privaten Haushalte

Die Leistungsbeschreibung schlug darüber hinaus weitere potenzielle Ansatzpunkte zur Parametrisierung alternativer Szenarien vor. Diese Ansatzpunkte sind nachfolgend aufgeführt, zusammen mit einer kurzen Einschätzung zu der Frage, ob sie sich grundsätzlich zur Berücksichtigung in GRAMOD-Simulationen eignen:

**Rebound-Effekte:** Die dynamischen Eigenschaften des GRAMOD-Modells berücksichtigen, dass durch Wertschöpfungseffekte (beispielsweise durch Effizienzsteigerungen in der Produktion) alternative Einkommensdynamiken entstehen. Dank dieser Modelleigenschaft werden Rebound-Effekte (beispielsweise infolge einer steigenden Konsumnachfrage durch private Haushalte) in den Bewertungen **automatisch berücksichtigt**.

**Änderungen im Energiemix:** Die in Kapitel 5 zusammengefassten energie- und klimapolitischen Umfeldparametrisierungen unterstellen für die Energiewirtschaft langfristig globale Dekarbonisierungstendenzen. Änderungen im Energiemix werden somit **bereits im Trendszenario berücksichtigt**. Im Bereich der Energiewirtschaft oder auch in anderen gesellschaftlichen Transformationsbereichen (wie beispielsweise Verkehr, Landwirtschaft, Gesundheit) könnten zusätzliche Variationen der Modellierungsannahmen parametrisiert werden. Die entsprechenden Parametrisierungsvorgaben sollten dann aber im Austausch mit sektoralen Stakeholdern in gemeinsamen Szenarioprozessen hergeleitet werden, damit die entsprechende Sachexpertise einfließt. Im Verlauf des Vorhabens wurde beschlossen, dass entsprechende Szenarioprozesse **zukünftigen Forschungsvorhaben** vorbehalten bleiben.

**Allgemeine Wirtschaftsentwicklung:** GRAMOD leitet die allgemeine Wirtschaftsentwicklung in Deutschland auf Basis der in **Kapitel 5** vorgestellten globalen Umfeldparametrisierungen her. Wieder gilt: Zusätzliche Variationen der Modellierungsannahmen könnten parametrisiert werden, doch dies sollte für ausgewählte gesellschaftliche Transformationsbereiche in gemeinsamen Szenarioprozessen mit Stakeholdern erfolgen.

Mögliche **Effizienzsteigerungen** in der Betriebsphase: Effizienzsteigerungen in der Betriebsphase können in GRAMOD durch eine Variation der Energienachfrage (beispielsweise individueller Wirtschaftsbranchen oder aber der privaten Haushalte) simuliert werden. Da in GRAMOD bislang keine modulare Erweiterung des Themenkomplexes Energie und Emissionen implementiert wurde, sind für entsprechende Parametrisierungen ergänzende Zurechnungen notwendig. In diesen Zurechnungen ist dann der Anteil der Energienachfrage zum Betrieb von IKT-Gütern an der gesamten Energienachfrage der ausgewählten Branchen/Haushalte zu bestimmen. Im gegenständigen Vorhaben konnten entsprechende **Zurechnungen nicht vorgenommen werden**. Für zukünftige Vorhaben erscheint es lohnend zu prüfen, ob entsprechende Abschätzungen effizient aus gemeinschaftlichen Modellierungsaktivitäten

ableitbar sind. Dabei würde ein partialanalytisches Energiemodell entsprechende Detailinformationen abbilden und für eine Verwendung im I-O-Ansatz aufbereiten.

Mögliche **Recyclingpotenziale**: Die Datenstrukturen in GRAMOD sind grundsätzlich hervorragend geeignet, um Recyclingpotenziale gesamtwirtschaftlich zu bewerten. In entsprechenden Simulationen könnte beispielsweise die Vorleistungsnachfrage der IKT-Sektoren nach Erzeugnissen der Primärrohstoff-extrahierenden Sektoren gesenkt und im Gegenzug die Vorleistungsnachfrage nach Erzeugnissen des Recyclingsektors erhöht werden. Bislang sind entsprechende Analysen aber nicht möglich, weil Daten fehlen: Nötig wäre eine umfassende Abschätzung der durch Recycling verfügbaren Sekundärrohstoffmengen.

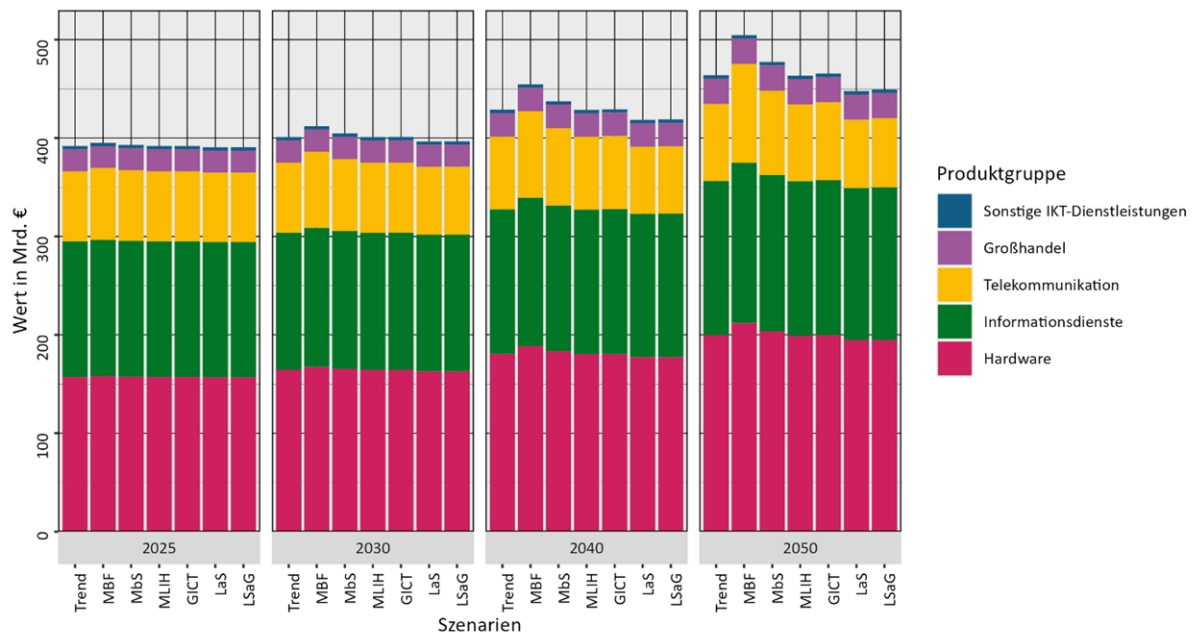
**Entsprechende Abschätzungen standen den forschungsnehmenden Institutionen in diesem Vorhaben nicht zur Verfügung.**



**Unter Variation der ausgewählten Stellschrauben wurden in diesem Forschungsvorhaben folgende Alternativszenarien parametrisiert:**

- ▶ 1) **MBF – More, Bigger and Faster:** Die privaten Haushalte in Deutschland steigern bis zum Jahr 2050 ihre Nachfrage nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen um 50 % gegenüber dem Trendszenario. Der Konsum fokussiert sich dabei auf die Nachfrage nach Hardware: Der Anteil der IKT-Güter an der gesamten Konsumnachfrage nach IKT-Gütern und Dienstleistungen verdoppelt sich im Vergleich zum Trendszenario bis zum Jahr 2050.
- ▶ 2) **MbS – More but Softer:** 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 nun aber durch die Nachfrage nach IKT-Dienstleistungen getrieben: Der Anteil von IKT-Dienstleistungen an der gesamten Konsumnachfrage nach IKT-Gütern und Dienstleistungen verdoppelt sich im Vergleich zum Trendszenario bis zum Jahr 2050.
- ▶ 3) **LaS – Less and Softer:** 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 in Richtung einer „rohstoff-leichteren“ 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) **MLIH – Material-Lighter ICT Hardware:** Dieses Szenario verdeutlicht Effekte von Effizienzsteigerungen in der inländischen Produktion von IKT-Gütern. Unterstellt wird, dass inländische Produzenten von IKT-Gütern bis zum Jahr 2050 ihre Materialinputs im Vergleich zur Trendprojektion um 7,5 % reduzieren können.
- ▶ 5) **GICT – Greener ICT:** Auch dieses Szenario veranschaulicht Effekte von Effizienzsteigerungen in der inländischen Produktion. Diesmal wird allerdings unterstellt, dass inländische Produzenten von IKT-Gütern und auch IKT-Dienstleistungen bis zum Jahr 2050 ihre Materialinputs im Vergleich zur Trendprojektion um 7,5 % reduzieren können. Eine weitere Annahme ist, dass die Produzenten von IKT-Gütern und IKT-Dienstleistungen in Deutschland bis zum Jahr 2050 auch zusätzliche Energieeinsparpotenziale realisieren können. Im Vergleich zur Trendprojektion kommt eine Reduktion der Energienachfrage durch Produzenten um 15 % bis zum Jahr 2050 zum Tragen.
- ▶ 6) **LSaG – Less, Softer and Greener:** Dieses Szenario betrachtet die kombinierten Effekte von Effizienzsteigerungen in der Produktion sowie Bedarfs- und Konsumententwicklungen der privaten Haushalte. Es handelt sich um eine Kombination der Szenarioeinstellungen zu „3) Less and Softer“ mit denen des Szenarios „5) Greener ICT“.

**Abbildung 112: Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland nach Produktgruppen für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2025, 2030, 2040 und 2050 in Milliarden Euro**



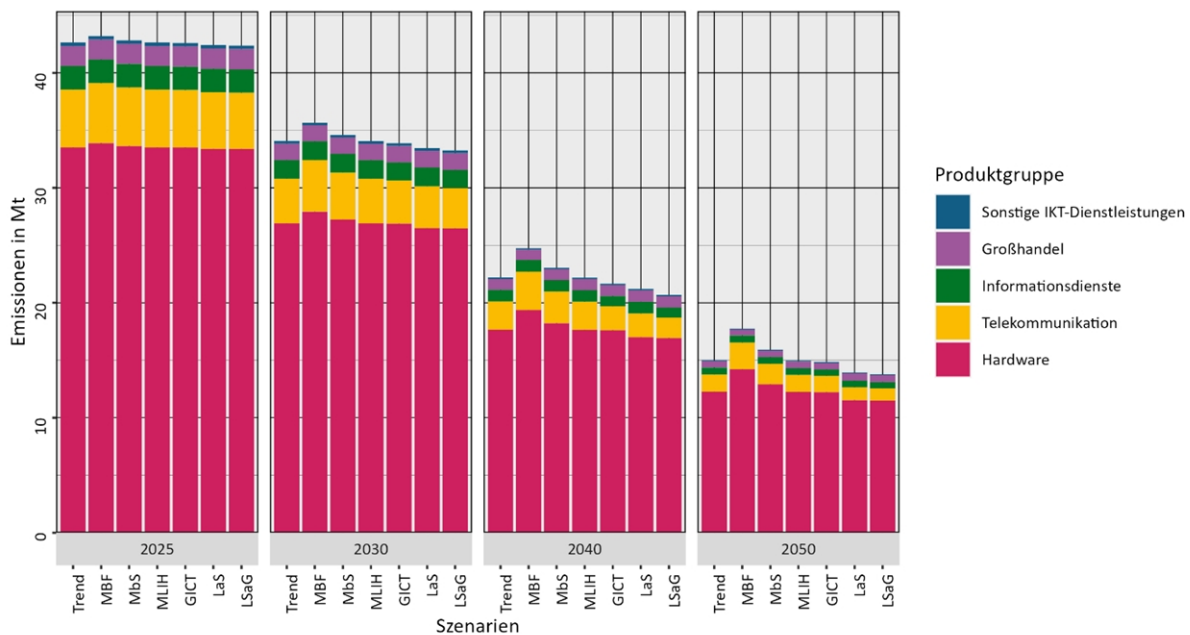
Trend. MBF (*More, Bigger and Faster*). Mbs (*More but Softer*). MLIH (*Material-Lighter ICT Hardware*). GICT (*Greener ICT*). LaS (*Less and Softer*). LSaG (*Less, Softer and Greener*).

Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 112 zeigt die Verwendung von IKT in Deutschland nach Produktgruppen aufgeschlüsselt. Für die ausgewählten Berichtsjahre 2025, 2030, 2040 und 2050 werden die bereits zuvor vorgestellten Simulationsergebnisse des Trendszenarios gemeinsam mit den korrespondierenden Simulationsergebnissen der Alternativszenarien dargestellt. Der Vergleich der jeweiligen Teilabbildungen verdeutlicht, dass die gesamtwirtschaftliche Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in sämtlichen projizierten Szenarien langfristig ansteigt. In sämtlichen Szenarien erweisen sich die Verwendung von Hardware-Gütern, Informationsdienstleistungen und Telekommunikationsdienstleistungen als wichtigste ökonomische Nachfragekomponenten der Digitalisierung in Deutschland. In sämtlichen Szenarien werden für die Verwendung von Hardware-Gütern und Informationsdienstleistungen jeweils jährliche Werte von mehr als 100 Milliarden Euro projiziert. Mit projizierten Jahreswerten unterhalb von 100 Milliarden Euro erweisen sich Telekommunikationsdienstleistungen in sämtlichen Simulationen als dritt wichtigste ökonomische Produktkategorie der gesamten Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland. Der Großhandel und vor allem die sonstigen IKT-Dienstleistungen liegen deutlich darunter.

Das Szenario *More, Bigger and Faster* liegt von Anfang an über den anderen Szenarien, wobei diese Differenz mit den Jahren zunimmt. Alle Szenarien bis auf *Less and Softer* und *Less, Softer and Greener* liegen im Jahr 2050 über dem Trend-Szenario. Bei Betrachtung einzelner Produktkategorien und deren projizierter Verwendung im Jahr 2050 kann beobachtet werden, dass insbesondere die gesamtwirtschaftliche Verwendung von Telekommunikationsdienstleistungen in den jeweiligen Szenarien variiert: Im Szenario *More, Bigger and Faster* werden im Vergleich zum Szenario *Less and Softer* im Jahr 2050 ungefähr 31 Milliarden Euro zusätzlich für Telekommunikationsdienstleistungen ausgegeben.

**Abbildung 113: CO<sub>2</sub>-Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland nach Produktgruppen für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2025, 2030, 2040 und 2050 in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 147)**



Trend. 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*).

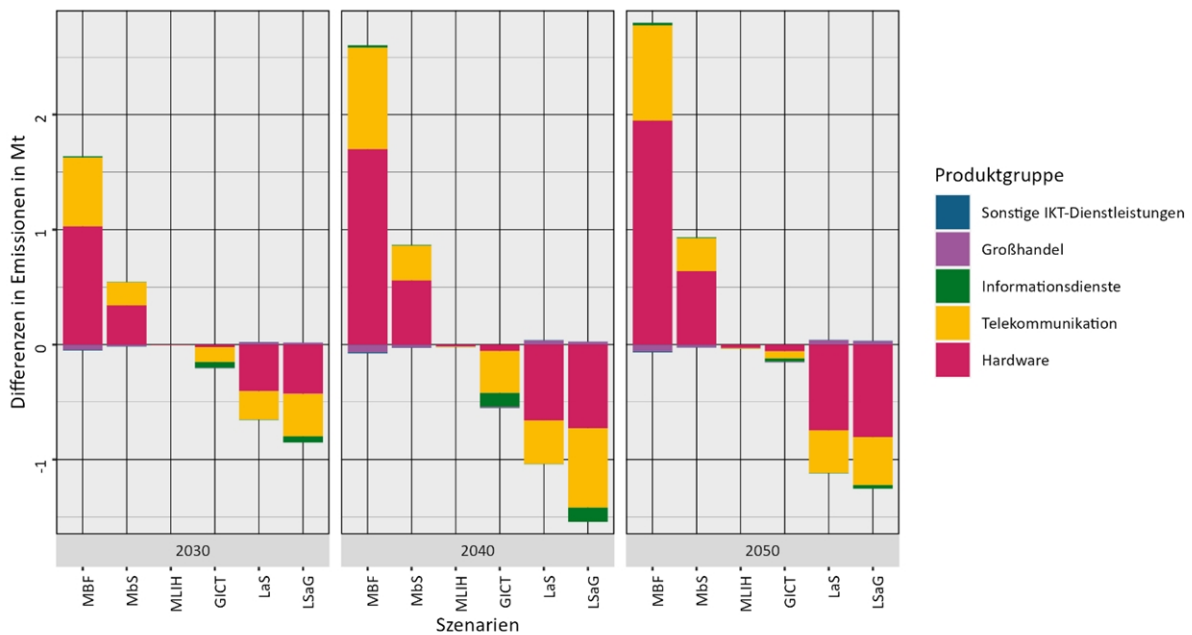
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die gesamtwirtschaftliche Verwendung von IKT-Gütern übersteigt im Jahr 2050 im Szenario *More, Bigger and Faster* den entsprechenden Referenzwert des Szenarios *Less and Softer* ungefähr um 17 Milliarden Euro. Die gesamten Ausgaben für die Verwendung von Informationsdienstleistungen übersteigen im Szenario *More, Bigger and Faster* den entsprechenden Referenzwert des Szenarios *Less and Softer* um mehr als 8 Milliarden Euro. Die Variationen sonstiger Dienstleistungen erweisen sich im Vergleich hierzu als gesamtwirtschaftlich weniger bedeutend (absolute Differenz der Verwendung von digitalisierungsrelevanten Handelsdienstleistungen im Jahr 2050 zwischen *More, Bigger and Faster* und *Less and Softer*: annähernd 120 Millionen Euro).

Abbildung 113 zeigt die Entwicklung des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Digitalisierung (CO<sub>2,Dig</sub>) in Deutschland in den gewählten Szenarien, wiederum untergliedert nach Produktgruppen. Dieser Indikator nimmt über die Jahre deutlich ab. Die bei der Herstellung von Hardwareprodukten verursachten CO<sub>2</sub>-Emissionen verkörpern über alle Jahre und Szenarien hinweg den größten Anteil des CO<sub>2,Dig</sub>. 2025 sorgt die Hardware noch für über 30 Megatonnen und im Jahr 2050 nur noch für gut 10 Megatonnen Emissionen. Ihr Rückgang fällt daher am stärksten ins Gewicht. Auch die Emissionen der anderen Produktgruppen nehmen ab, wobei diese insgesamt einen deutlich geringeren Umfang haben. Von diesen anderen Produktgruppen hat die Telekommunikation den größten Anteil. Über alle betrachteten Zeiträume hinweg liegt das Szenario *More, Bigger and Faster* über den anderen betrachteten Szenarien.

In Abbildung 114 werden für die jeweiligen Alternativszenarien die absoluten Abweichungen des CO<sub>2,Dig</sub> von den jeweiligen Referenzwerten des Trendszenarios ausgewiesen. Dabei fällt die Hardware besonders stark ins Gewicht. Von allen Produktgruppen unterscheidet sie sich am stärksten vom Trend. Aber auch die Telekommunikation zeigt deutliche Unterschiede auf. Bei den anderen Produktgruppen sind die Unterschiede vernachlässigbar klein.

**Abbildung 114: Differenz des CO<sub>2,Dig.</sub> in Deutschland gegenüber dem Trendszenario nach Produktgruppen für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 148)**



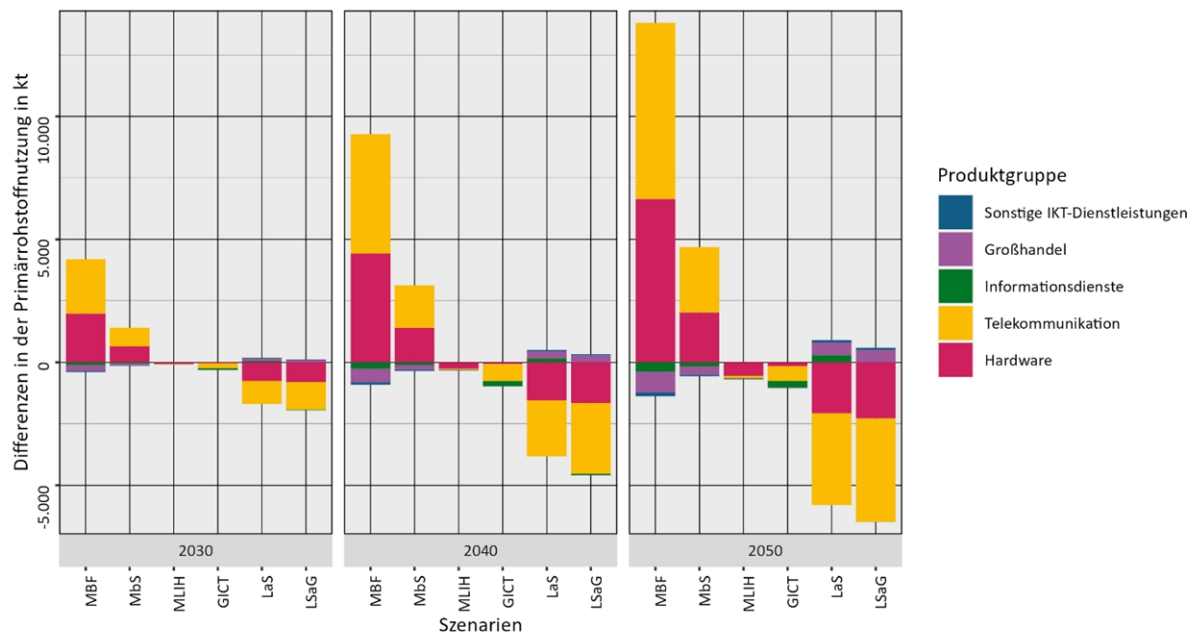
MBF (*More, Bigger and Faster*). MbS (*More but Softer*). MLIH (*Material-Lighter ICT Hardware*). GICT (*Greener ICT*). LaS (*Less and Softer*). LSaG (*Less, Softer and Greener*).

Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Im Jahr 2050 sind die Unterschiede insgesamt am größten und liegen bei Hardware im Szenario *More, Bigger and Faster* bei knapp 2 Megatonnen. Das Szenario *Material-Lighter ICT Hardware* weist über alle Zeiträume hinweg mit Abstand die geringsten Unterschiede auf. Auch die Abweichungen des Szenarios *Greener ICT* sind im Jahr 2050 deutlich geringer als die der übrigen Szenarien.

Abbildung 115 unterscheidet den RMI<sub>Dig.</sub> in Deutschland nach den fünf Produktgruppen. Die einzelnen Szenarien sind im Unterschied zum Trend abgebildet. Die Differenzen nehmen über alle Szenarien hinweg insgesamt mit der Zeit zu. Das Szenario *More, Bigger and Faster* zeigt die größten und *Material-Lighter ICT Hardware* die geringsten Differenzen. Die beiden „*More-Szenarien*“ liegen eher im positiven Bereich und die anderen im negativen Bereich. Es fällt auf, dass die Hardware und die Telekommunikation die größten Unterschiede aufweisen. Im Jahr 2050 verbuchen Hardware und Telekommunikation bei der Primärrohstoffnutzung je eine Differenz von über 5 Megatonnen. Die anderen Produktgruppenverzeichnen deutlich geringere Differenzen.

**Abbildung 115: Differenz des  $RMI_{Dig}$  in Deutschland gegenüber dem Trendszenario nach Produktgruppen für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 149)**

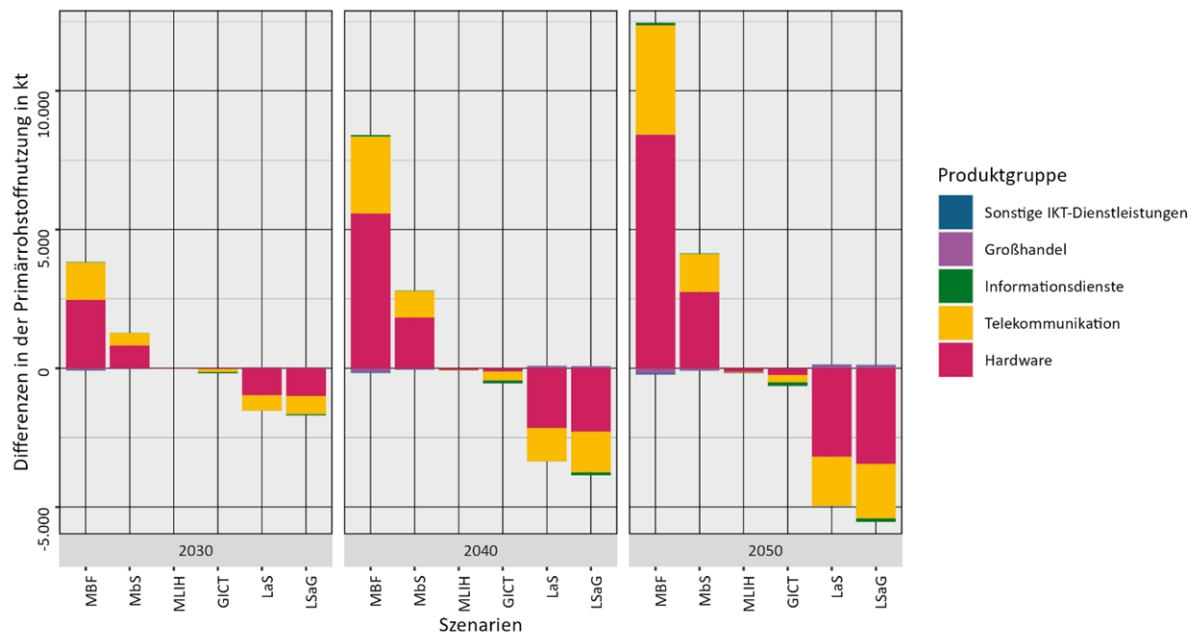


MBF (*More, Bigger and Faster*). MbS (*More but Softer*). MLIH (*Material-Lighter ICT Hardware*). GICT (*Greener ICT*). LaS (*Less and Softer*). LSaG (*Less, Softer and Greener*).

Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 116 schlüsselt den  $RMC_{Dig}$  in Deutschland nach den fünf Produktgruppen auf. Die einzelnen Szenarien werden im Unterschied zum Trend abgebildet. Insgesamt nehmen die Unterschiede über die Jahre bei allen Szenarien zu. Im Szenario *More, Bigger and Faster* treten die höchsten Werte und bei *Material-Lighter ICT Hardware* die geringsten Werte auf. Im Jahr 2050 liegt die Differenz hier im Fall der Hardware bei über 7,5 Megatonnen. Für die anderen Produktgruppen werden vernachlässigbar geringere Differenzen simuliert. Insgesamt zeigen sich mehrere Parallelen zu Abbildung 114 und Abbildung 115: Die dominierenden Produktgruppen sind in allen Darstellungen Hardware und Informationsdienste und die höchsten Differenzen weist *More, Bigger and Faster* und die geringsten *Material-Lighter ICT Hardware* auf.

**Abbildung 116: Differenz des  $RMC_{Dig}$  in Deutschland gegenüber dem Trendszenario nach Produktgruppen für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 150)**

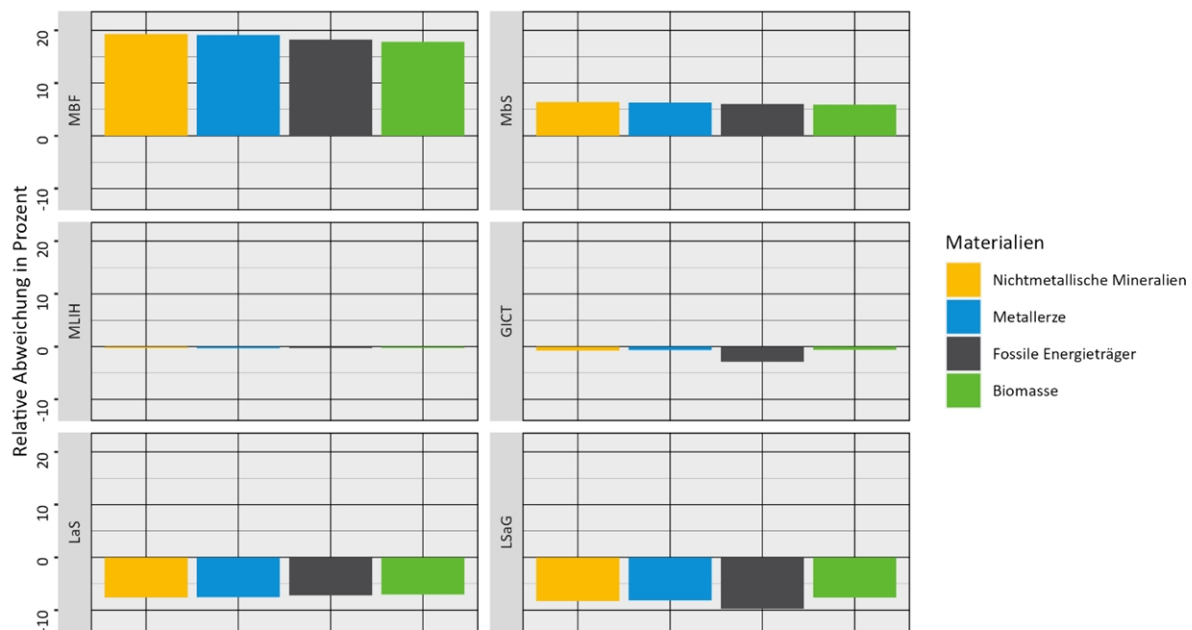


MBF (*More, Bigger and Faster*). MbS (*More but Softer*). MLIH (*Material-Lighter ICT Hardware*). GICT (*Greener ICT*). LaS (*Less and Softer*). LSaG (*Less, Softer and Greener*).

Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Ergänzend differenziert Abbildung 117 den  $RMC_{Dig}$  der verschiedenen Szenarien für das letzte Jahr des Betrachtungszeitraums nach Materialkategorien. Die Szenarien *More, Bigger and Faster*, *More but Softer* und *Less and Softer* weisen vergleichbare relative Abweichungen je Materialkategorie auf. Dabei entfallen auf nichtmetallische Mineralien stets die größten und auf Biomasse die kleinsten Abweichungen. In den Szenarien *Greener ICT* und *Less, Softer and Greener* sind die deutlichsten Rückgänge bei den fossilen Energieträgern zu beobachten. Die Auswirkungen des Szenarios *Material-Lighter ICT Hardware* auf den  $RMC_{Dig}$  sind vernachlässigbar. Die höchsten relativen Abweichungen weist hingegen das Szenario *More, Bigger and Faster* auf. Die relativen Abweichungen liegen hier im Bereich zwischen 15 und 20 %.

**Abbildung 117: Relative Abweichung des deutschen RMC<sub>Dig.</sub> gegenüber dem Trend im Jahr 2050 nach Materialien für unterschiedliche Szenarien in Prozent (vgl. Anhang F, Tab. 151)**



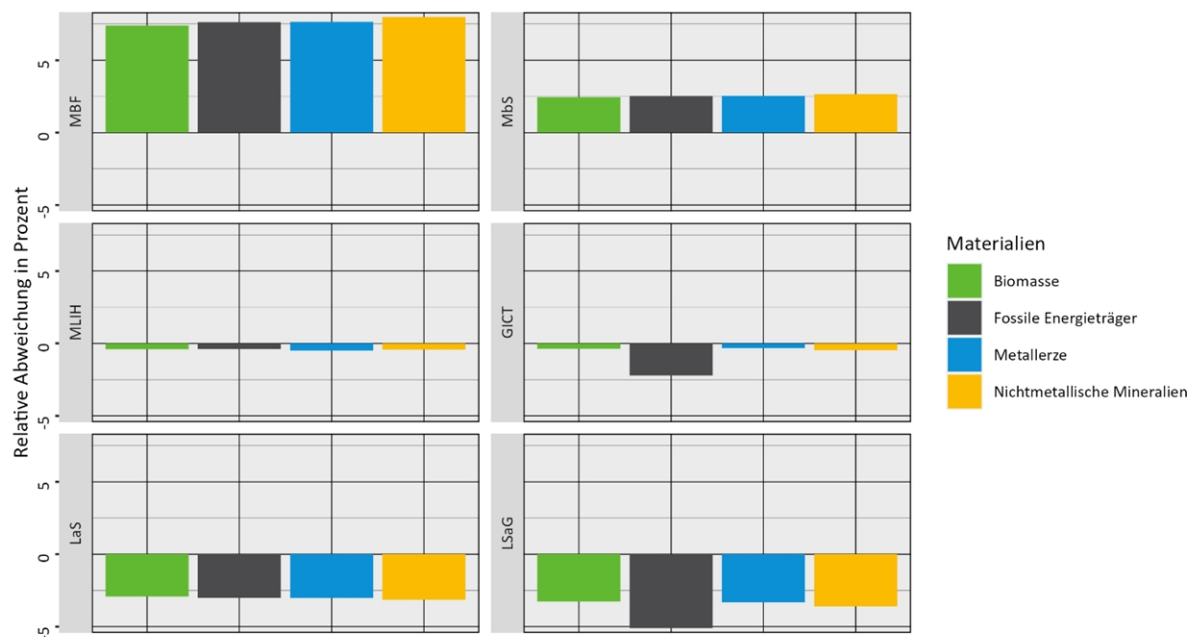
MBF (*More, Bigger and Faster*). MbS (*More but Softer*). MLIH (*Material-Lighter ICT Hardware*). GICT (*Greener ICT*). LaS (*Less and Softer*). LSaG (*Less, Softer and Greener*).

Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 118 zeigt wieder die in Abbildung 117 durchgeführte Differenzierung der verschiedenen Szenarien für das letzte Jahr des Betrachtungszeitraums nach Art der vier Materialien, aber diesmal für den RMI<sub>Dig.</sub>. Es wird auch hier auf die relativen Unterschiede gegenüber dem Trend abgestellt. Wie oben weisen die Szenarien *More, Bigger and Faster*, *More but Softer* und *Less and Softer* ähnliche relative Abweichungen pro Materialkategorie auf. Das Szenario *More, Bigger and Faster* weist die größte und *Material-Lighter ICT Hardware* die geringste relative Abweichung auf. Im ersteren Szenario liegt die Abweichung zwischen 7,4 und knapp 8 %.

Beim Vergleich mit Abbildung 117 wird deutlich, dass sich die Darstellungen insgesamt ähneln, aber auch Unterschiede zu erkennen sind. Die Achsen der Abbildung des RMC<sub>Dig.</sub> reichen bis 20 und damit weist das *More, Bigger and Faster* Szenario beispielsweise in etwa doppelt so hohe relative Abweichungen auf.

**Abbildung 118: Relative Abweichung des deutschen  $RMI_{Dig}$  gegenüber dem Trend im Jahr 2050 nach Materialien für unterschiedliche Szenarien in Prozent (vgl. Anhang F, Tab. 152)**



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*).

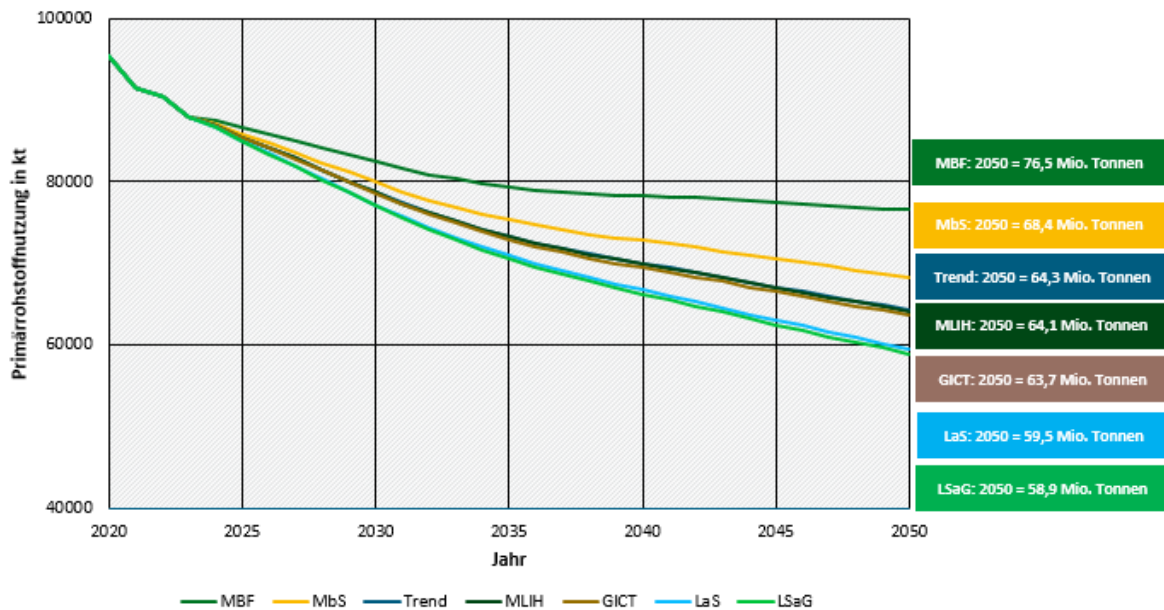
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 119 stellt die Entwicklung des deutschen  $RMC_{Dig}$  dar. Es werden sämtliche Szenarioergebnisse abgebildet. Über den gesamten Simulationszeitraum sinkt der  $RMC_{Dig}$  in sämtlichen Szenarien. Im Trendszenario folgt die Entwicklung des  $RMC_{Dig}$  im Wesentlichen der Entwicklung des gesamtwirtschaftlichen RMC. Die relativen Reduktionen bis zum Jahr 2050 fallen allerdings etwas geringer aus ( $RMC_{Dig}$ -Wert des Jahres 2050: 67,4 % des Jahreswertes 2020, gesamtwirtschaftlicher RMC: 65,4 %). Dies impliziert, dass die relativen Beiträge des  $RMC_{Dig}$  zum gesamtwirtschaftlichen RMC in diesem Szenario im Zeitablauf geringfügig ansteigen.

Bis zum Jahr 2024 entwickeln sich sämtliche simulierten Szenarien parallel. Ab 2024 setzen sie sich getrennt voneinander fort, wobei sich Trend, *Material-Lighter ICT Hardware* und *Greener ICT* sehr ähnlich entwickeln. Dieser Befund ist darauf zurückzuführen, dass in den Szenarien *Material-Lighter ICT Hardware* und *Greener ICT* ausschließlich Effizienzsteigerungen in der *inländischen* Produktion von IKT-Gütern unterstellt werden: Wie bereits die Analysen des Kapitels 5.4.1 verdeutlichten, wurde die Produktion der in Deutschland verwendeten IKT-Güter in der Vergangenheit zunehmend in außereuropäische Regionen verlagert. Da die Trendprojektion entsprechende Entwicklungstendenzen weiter fortschreibt, verdeutlichen die Ergebnisse der Szenarien *Material-Lighter ICT Hardware* und *Greener ICT*, dass – unter Beibehaltung gegenwärtiger globaler Lieferketten – **durch isolierte Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz in der heimischen Herstellung von Hardwareprodukten keine relevanten ressourcenpolitische Effekte erwartet werden können.**



**Abbildung 119: Entwicklung des RMC<sub>Dig.</sub> in Deutschland von 2020 bis 2050 für unterschiedliche Szenarien in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 153)**



Trend, 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 (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

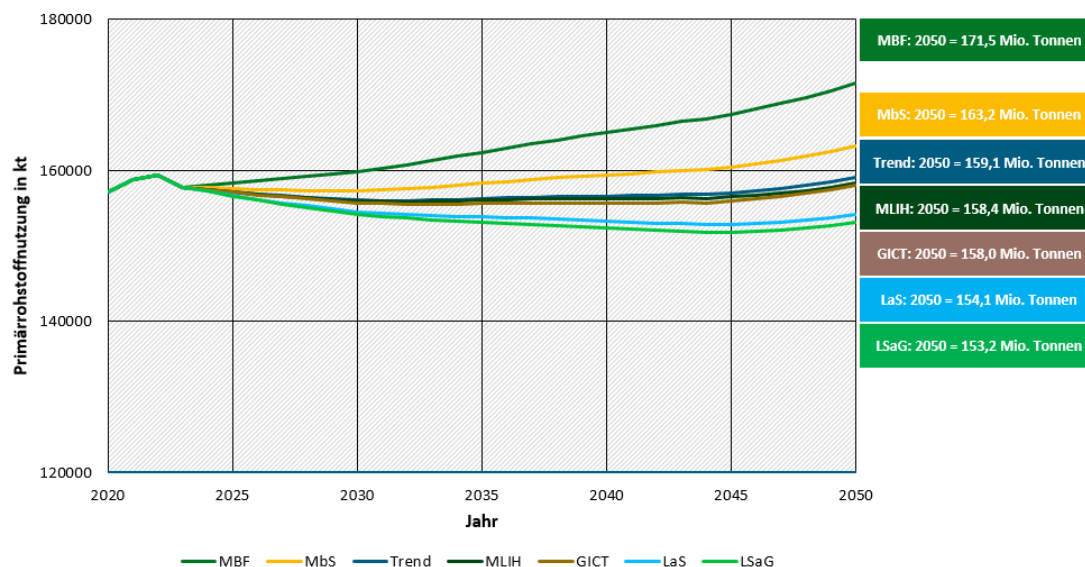
Im Gegensatz dazu sind die Ergebnisse der **Szenarien *Less and Softer* sowie *Less, Softer and Greener*** durch **sichtbare Reduktionen des RMC<sub>Dig.</sub>** gekennzeichnet. Im Szenario *Less, Softer and Greener* wird bis zum Jahr 2050 die stärkste Abnahme des RMC<sub>Dig.</sub> projiziert, in beiden Szenarien wird der Jahreswert des RMC<sub>Dig.</sub> mit weniger als 60 Megatonnen im Vergleich zum Trendszenario in einer absoluten Größenordnung von 5 Megatonnen reduziert. Die Beobachtung, dass sich die Simulationswerte für beide Szenarien nur geringfügig unterscheiden, zeigt wiederum, dass isolierte Maßnahmen zur Steigerung der Effizienz in der heimischen Herstellung von Hardwareprodukten keine relevanten ressourcenpolitischen Effekte hervorrufen. Die **sichtbaren Einsparungen der Primärrohstoffnutzung für die Digitalisierung in Deutschland** können stattdessen auf die unterstellte **Reduktion der absoluten Nachfrage nach digitalisierungsrelevanten Gütern und Dienstleistungen** sowie der **strukturellen Reduktion der Nachfrage nach Hardware-Produkten** zurückgeführt werden.

Die deutlich beobachtbaren Steigerungen des RMC<sub>Dig.</sub> in den Szenarien *More, Bigger and Faster* sowie *More but Softer* im Vergleich zum Trendszenario bestärken diese Befunde. Die Differenz zwischen dem Szenario *More, Bigger and Faster* sowie dem Szenario *Less, Softer and Greener* beträgt im Jahr 2050 etwa 17,6 Megatonnen.

Abbildung 120 zeigt die Entwicklung des RMI<sub>Dig.</sub> in den jeweils simulierten Szenarien. Bis zum Jahr 2024 entwickeln sich auch hier die Szenarien nahezu identisch. Ab 2024 setzen sie sich getrennt voneinander fort, wobei wiederum zwischen den Szenarien Trend, *Material-Lighter ICT Hardware* und *Greener ICT* kaum sichtbare Unterschiede zu erkennen sind. Wie zuvor bei der Betrachtung des RMC<sub>Dig.</sub> zeigt sich, dass die Entwicklung in den Szenarien *Less and Softer* sowie *Less, Softer and Greener* sehr ähnlich verläuft. Nur in diesen Szenarien wird im Jahr 2050 ein

absoluter Wert erreicht, welcher (geringfügig) unterhalb des Ausgangswertes des Jahres 2020 (157 Millionen Tonnen) liegt.

**Abbildung 120: Entwicklung des  $RMI_{Dig.}$  in Deutschland von 2020 bis 2050 für unterschiedliche Szenarien in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 154)**



Trend, 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*).

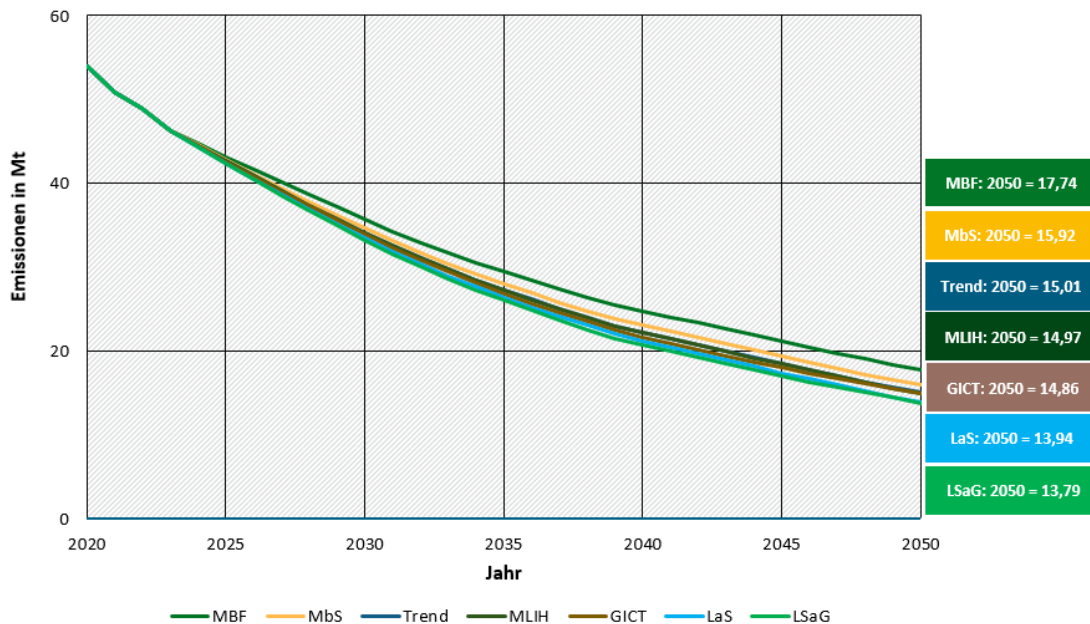
Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Während sich der  $RMI_{Dig.}$  im Trendszenario im Jahr 2050 auf 159 Millionen Tonnen summiert, beträgt dieser Wert im Szenario *Less and Softer* ungefähr 154 Millionen Tonnen und im Szenario *Less, Softer and Greener* ungefähr 153 Millionen Tonnen. Während die Primärrohstoffnutzung in allen übrigen Szenarien im Simulationszeitraum zunimmt, werden die höchsten Werte im Szenario *More, Bigger and Faster* mit einem Anstieg auf ungefähr 170 Megatonnen im Jahr 2050 erreicht.

Abbildung 121 stellt die Entwicklung des  $CO_{2,Dig.}$  in Deutschland dar. Es werden alle simulierten Szenarioergebnisse dargestellt. Der resultierende grafische Befund verdeutlicht insbesondere, dass die **Entwicklung des  $CO_{2,Dig.}$  wesentlich durch die langfristige Entwicklung der in den Herstellungsprozessen von IKT-Gütern und Dienstleistungen global genutzten Energiequellen beeinflusst** wird. Da entsprechende Rahmenparameter in den einzelnen Simulationen nicht variiert werden, wird der  $CO_{2,Dig.}$  in allen analysierten Szenarien zwar langfristig deutlich reduziert. **Das übergeordnete Politikziel einer (nahezu) vollständigen Dekarbonisierung bis zum Jahr 2050 wird aber in allen Szenarien deutlich verfehlt.**

Der  $CO_{2,Dig.}$  summiert sich zu Beginn des Simulationszeitraums auf annähernd 54 Megatonnen. Im Szenario *Less, Softer and Greener* wird bis zum Jahr 2050 die stärkste Reduktion auf ungefähr 14 Megatonnen erreicht. Dies entspricht einem Rückgang um ungefähr 74,1 %. Das Szenario *More, Bigger and Faster* ist insgesamt durch die höchsten Emissionen gekennzeichnet. In Relation zum Ausgangswert des Jahres 2020 wird aber auch in diesem Szenario der  $CO_{2,Dig.}$  Mit 67,1 % deutlich reduziert. Die Differenz zwischen diesem Szenario und *Less, Softer and Greener* beläuft sich im Jahr 2050 in etwa auf 4 Megatonnen.

**Abbildung 121: Entwicklung des CO<sub>2,Dig.</sub> in Deutschland von 2020 bis 2050 für unterschiedliche Szenarien in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 155)**



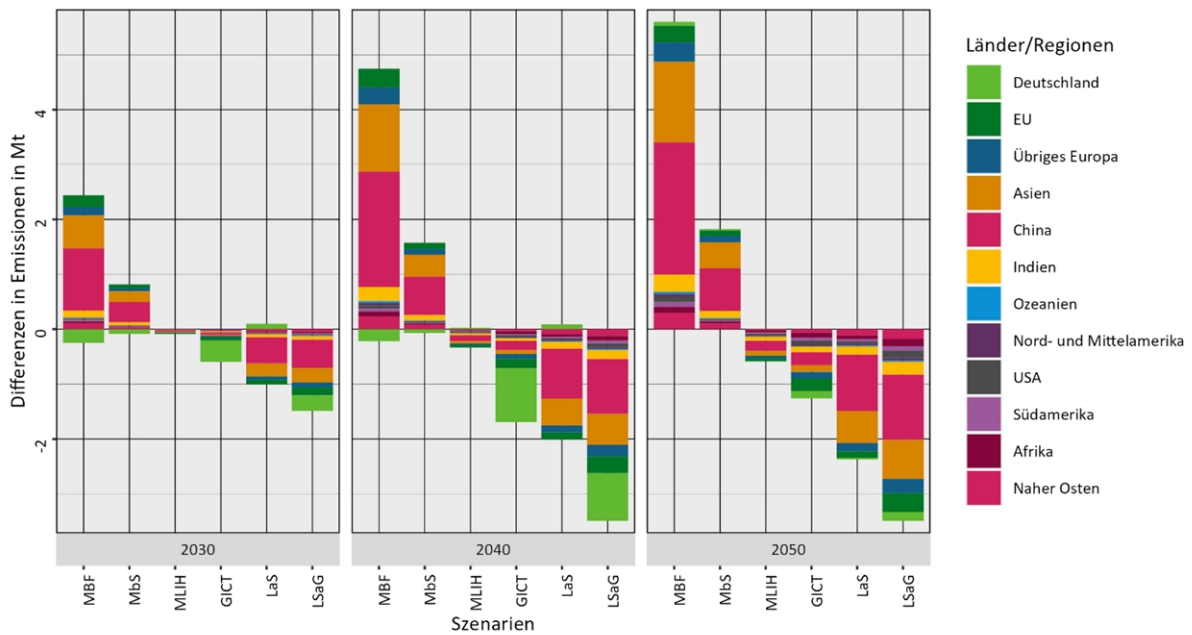
Trend. MBF (*More, Bigger and Faster*). MbS (*More but Softer*). MLIH (*Material-Lighter ICT Hardware*). GICT (*Greener ICT*). LaS (*Less and Softer*). LSaG (*Less, Softer and Greener*).

Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die globalen Ursprünge des CO<sub>2,Dig.</sub> werden in Abbildung 122 nach zwölf Ländern/Regionen aufgegliedert. Abgebildet sind die absoluten Differenzen der Alternativszenarien im Vergleich zum Trendszenario in Megatonnen. Im Szenario *More, Bigger and Faster* werden bis zum Jahr 2050 Steigerungen des CO<sub>2,Dig.</sub> in einer Größenordnung von über 5 Megatonnen im Vergleich zum Trendszenario simuliert. Auf China und Asien entfallen dabei mehr als die Hälfte dieser zusätzlichen Emissionen. Die Werte für Deutschland ändern sich vor allem in den Szenarien *Greener ICT* und *Less, Softer and Greener*, allerdings in einem geringeren Umfang.

Die wichtigste Erkenntnis dieser Abbildung ist, dass **der CO<sub>2,Dig.</sub> in Deutschland in sämtlichen Alternativszenarien wesentlich durch** (in den Simulationen nur langsam sinkende) **Emissionsintensitäten der Herstellung von IKT-Gütern in China und Asien geprägt wird. Eine weitergehende Dekarbonisierung** der Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland **bedarf** angesichts dieser Befunde **entweder einer langfristigen Stärkung der heimischen Produktionstätigkeit von IKT-Gütern oder aber einer wesentlich ambitionierteren Energiewende an außereuropäischen Produktionsstandorten.**

**Abbildung 122: Differenz globaler CO<sub>2</sub>-Emissionen gegenüber dem Trend für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in Megatonnen (vgl. Anhang F, Tab. 156)**

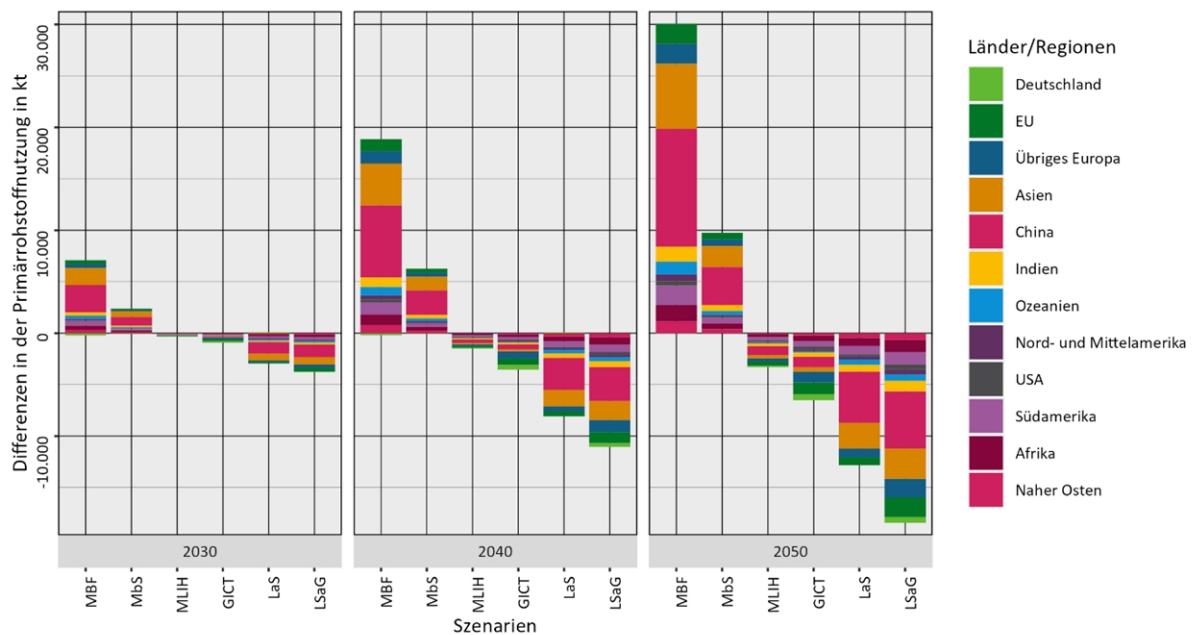


MBF (*More, Bigger and Faster*). MbS (*More but Softer*). MLIH (*Material-Lighter ICT Hardware*). GICT (*Greener ICT*). LaS (*Less and Softer*). LSaG (*Less, Softer and Greener*).

Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung 123 zeigt die Alternativsimulationen zur Entwicklung der weltweiten Entnahmen als Differenzen gegenüber dem Trendszenario in Kilotonnen. Die Darstellung ist unterteilt nach zwölf Ländern/Regionen. Die Unterschiede nehmen insgesamt über alle Szenarien zu. Bei den Ländern/Regionen haben China und Asien, bei den Szenarien hat *More, Bigger and Faster* die größten Differenzen vorzuweisen. Beim Szenario *More, Bigger and Faster* nimmt die Differenz von über 5.000 auf ca. 30.000 Kilotonnen zu, wobei China und Asien ca. die Hälfte ausmachen. Deutschland taucht in der Abbildung wertemäßig nicht dominant auf, aber ist bei den Szenarien *Greener ICT* und *Less, Softer and Greener* größtenteils deutlich zu erkennen.

**Abbildung 123: Differenz weltweiter Entnahmen gegenüber dem Trend für unterschiedliche Szenarien in den Jahren 2030, 2040 und 2050 in Kilotonnen (vgl. Anhang F, Tab. 157)**



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 (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### Fazit Simulationen

- ▶ **Zusätzlich** zum Trendszenario wurden im **Vorhaben sechs alternative Zukunftsszenarien parametrisiert**: *More, Bigger and Faster, More but Softer, Less and Softer, Material-Lighter ICT Hardware, Greener ICT* sowie *Less, Softer and Greener*.
- ▶ **„Zentrale Stellschrauben“** dieser Alternativszenarien **sind Effizienzsteigerungen der inländischen Herstellung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen** sowie die **Bedarfs- und Konsumententwicklungen privater Haushalte in Deutschland**.
- ▶ Die in den Szenarien *Material-Lighter ICT Hardware* und *Greener ICT* **simulierten Effizienzsteigerungen in Deutschland** lösen im Vergleich zu den übrigen Szenarien (die die Auswirkungen alternativer Bedarfs- und Konsumententwicklungen der privaten Haushalte simulieren) **kaum sichtbare Reduktionen der Rohstoffintensität sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen durch den digitalen Wandel in Deutschland** aus. Dieser Befund ist darauf zurückzuführen, dass die im System Digitalisierung besonders Rohstoff- und CO<sub>2</sub>-intensive Hardware überwiegend aus dem Ausland importiert wird.
- ▶ Im Szenariovergleich lässt sich festhalten, dass im Hinblick auf den digitalen Wandel in Deutschland die aufgezeigte Spannweite der **prozentualen Veränderungen beim RMC<sub>Dig.</sub>** **in etwa der Spannweite der Veränderungen beim CO<sub>2</sub>-Fußabdruck entspricht**.

## 6.4 Zusammenfassung

In Kapitel 6 wurden verschiedene zukünftige Entwicklungspfade des Systems Digitalisierung unter Verwendung des Modells GRAMOD berechnet. Die Basis für die vorgenommenen Auswertungen stellt ein Trendszenario dar, welches unter Vorgabe exogener Szenarioannahmen zur globalen Bevölkerungsentwicklung und globalem Wirtschaftswachstum zukünftige Veränderungen von Produktions- und Konsumstrukturen abbildet. Diese **Trendprojektion ist nicht als Wirtschafts- oder Klimamaßnahmenprognose zu interpretieren**. Sie repräsentiert **stattdessen ein plausibles, in sich global geschlossenes zukünftiges wirtschaftliches Entwicklungsszenario, das als Grundlage zur Bewertung alternativer Entwicklungsszenarien dient**.

Unter den gesetzten Annahmen des Trendszenarios führen eine global zunehmende Bevölkerung und eine ungefähre Verdopplung des globalen Bruttoinlandsprodukts zu einer weltweiten Verdoppelung des Produktionsniveaus der IKT-Güter und -Dienstleistungen zwischen den Jahren 2020 und 2050. Für Deutschland wird dabei ein langfristig stabiles, im Vergleich zu früheren Entwicklungen allerdings geringes Wirtschaftswachstum bei gleichzeitiger absoluter Entkopplung von globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen und globalem Rohstoffkonsum projiziert.

Ambitionierte nationale klimapolitische Fortschritte prägen das Trendszenario. Der deutsche CO<sub>2</sub>-Fußabdruck geht im betrachteten Zeitraum um nahezu 70 % zurück. Aufgrund regional unterschiedlicher klimapolitischer Ambitionsniveaus werden dabei in der Trendprojektion deutliche strukturelle Veränderungen des deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks projiziert. Der Anteil außereuropäischer Weltregionen am deutschen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck steigt von 29,5 % im Jahr 2020 auf 45,9% im Jahr 2050 an. Der deutsche RMC wird in der Trendprojektion bis zum Jahr 2050 um ungefähr ein Drittel seines Ausgangswertes des Jahres 2020 reduziert. Der deutsche RMI steigt hingegen bis zum Jahr 2050 aufgrund einer dynamischen Entwicklung der Exportnachfrage geringfügig (mit einer durchschnittlichen jährlichen Wachstumsrate von 0,4 %) an.

Die Ergebnisse sämtlicher Szenariosimulationen zusammenfassend ist zur zukünftigen Entwicklung der Schlüsselindikatoren dieses Vorhabens (RMC<sub>Dig.</sub>, RMI<sub>Dig.</sub> und CO<sub>2,Dig.</sub>) folgendes festzuhalten:

Über den gesamten Simulationszeitraum sinkt der RMC<sub>Dig.</sub> in sämtlichen Szenarien. Die relativen Beiträge des RMC<sub>Dig.</sub> zum gesamtwirtschaftlichen RMC steigen im Trendszenario aber langfristig geringfügig an.

Der RMI<sub>Dig.</sub> steigt im Trendszenario bis zum Jahr 2050 geringfügig gegenüber seinem Ausgangswert der Jahres 2050 an. Nur in alternativen Suffizienz-Szenarien wird im Jahr 2050 ein absoluter Wert erreicht, welcher unterhalb des Ausgangswertes des Jahres 2020 liegt.

Die Entwicklung des CO<sub>2,Dig.</sub> wird in sämtlichen Szenariosimulationen wesentlich durch die Emissionsintensitäten der Herstellung von IKT-Gütern in China und Asien geprägt. Eine weitestgehende Dekarbonisierung der Verwendung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland bedarf daher entweder einer langfristigen Stärkung der heimischen Produktionstätigkeit von IKT-Gütern oder aber einer ambitionierteren Energiewende an außereuropäischen Produktionsstandorten.

Zur Herleitung dieser Befunde wurden neben dem Trendszenario insgesamt sechs alternative Zukunftsszenarien untersucht. Dabei wurden die Einflüsse von zwei zentralen Stellschrauben in unterschiedlichen Konfigurationen analysiert: Effizienzsteigerungen in der Produktion von IKT-

Gütern sowie die Bedarfs- und Konsumententwicklung der privaten Haushalte. Während die Verwendung von IKT-Gütern für alle Szenarien bis 2050 ansteigt, fällt das Wachstum in den Szenarien *Less and Softer* sowie *Less, Softer and Greener* etwas schwächer aus als im Trend, während das Szenario *More, Bigger and Faster* am deutlichsten nach oben hin abweicht. In der Konsequenz ergibt sich für den  $RMC_{\text{Dig}}$  ein bis zu 15 Megatonnen höherer Wert im Szenario *More, Bigger and Faster*, für die einzelnen Materialgruppen schlägt sich dies in einer Abweichung von 15 bis 20 Prozent gegenüber dem Trendszenario nieder. In den Szenarien *Greener ICT* und *Less, Softer and Greener* sind die deutlichsten Rückgänge bei den fossilen Energieträgern zu beobachten, während die Auswirkungen des Szenarios *Material-Lighter ICT Hardware* auf den  $RMC_{\text{Dig}}$  vernachlässigbar sind.

Aus den in den Szenarien *Material-Lighter ICT Hardware* und *Greener ICT* simulierten **Effizienzsteigerungen bei der Herstellung von IKT-Gütern und Dienstleistungen in Deutschland resultieren im Vergleich zu alternativen Szenarien mit veränderten Bedarfs- und Konsumentwicklungen der privaten Haushalte wesentlich schwächere Reduktionen der Rohstoffintensität sowie der CO<sub>2</sub>-Emissionen des digitalen Wandels** in Deutschland. Dies bedeutet keineswegs, dass lediglich Verhaltensänderungen derzeitiger Konsummuster relevante Möglichkeiten zur **Gestaltung von Handlungsansätzen zur Minderung der** mit der Verwendung von IKT-Gütern und Dienstleistungen in Deutschland einhergehenden **Umweltinanspruchnahmen** bieten. Grundsätzlich könnten die CO<sub>2</sub>-Emissionen des digitalen Wandels in Deutschland durch eine umfassende **globale Dekarbonisierung sämtlicher Lieferketten der in Deutschland genutzten IKT-Güter und -Dienstleistungen** radikal reduziert werden. Im gegenständlichen Vorhaben konnte nicht abschließend bewertet werden, in welchem Umfang die daraus unmittelbar resultierende Reduktion der Verwendung fossiler Rohstoffe auch den Rohstoffkonsum ( $RMC_{\text{Dig}}$ ) sowie den Rohstoffeinsatz ( $RMI_{\text{Dig}}$ ) für die Digitalisierung in Deutschland insgesamt beeinflussen würde. Durch Parametrisierung weitergehender Transformationsannahmen (wie bspw. dem dauerhaften Ausbau einer ressourcenleichten und CO<sub>2</sub>-neutralen Fertigung von IKT-Gütern in Deutschland) könnten entsprechende Bewertungen vorgenommen werden. In diesem Vorhaben standen den forschungsnehmenden Institutionen die dafür benötigten Informationen (bspw. Details zu zukünftig denkbaren Produktionsstrukturen und dabei im Vergleich zu bisherigen Produktionsstrukturen zu berücksichtigende Substitutionsbeziehungen) nicht zur Verfügung.

## 7 Diskussion und Ableitung von Gestaltungsansätzen

Basierend auf den Analysearbeiten des Forschungsvorhabens (siehe Kapitel 4, Kapitel 5 und Kapitel 6 zuvor) waren laut Aufgabenstellung (Leistungsbeschreibung) Handlungsoptionen und Gestaltungsansätze (Gestaltungsfelder) sowie Politikempfehlungen für eine nachhaltige, umwelt- und ressourcenschonende Entwicklung und Gestaltung der Digitalisierung in Deutschland zu erarbeiten.

Diese Handlungsoptionen, Gestaltungsansätze und Politikempfehlungen sind im folgenden Kapitel dargestellt. Daran angegliedert sind beispielhafte Maßnahmen für ihre Umsetzung und Ausgestaltung.

### 7.1 Definition und Methodik für die Herleitung der Gestaltungsfelder

Beschreibt man die Digitalisierung als **System** (Kapitel 3.4), zeigt sich: Sämtliche Teilsysteme wie beteiligte Ausgangssektoren, Technologien, verwendete Geräte etc. stehen miteinander in Beziehung und beeinflussen sich gegenseitig. Das gegenständliche Forschungsvorhaben „DigitalRessourcen“ analysierte die Ressourcenintensität der Digitalisierung sowohl auf der Mikroebene (Fallstudien) als auch auf der Makroebene (Input-Output-Modelle). Aus beiden Blickwinkeln ergeben sich Informationen zu Bereichen, in denen oder aufgrund derer die Digitalisierung zu einem signifikanten Ressourcenbedarf und bedeutenden Treibhausgasemissionen führt. Diese Bereiche wurden zu Gestaltungsfeldern zusammengefasst, in denen sich eine Reduktion der Ressourcenbedarfe und Treibhausgasemissionen sowie der Umweltbelastungen insgesamt mithilfe thematisch ähnlicher Maßnahmen(-bündel) erreichen lässt. Die Gestaltungsfelder beziehen sich daher nicht auf konkrete Teilsysteme des Systems Digitalisierung oder auf spezifische Sektoren unserer Wirtschaft, sondern auf **thematisch übergreifende Handlungsbereiche** zur Umsetzung von Nachhaltigkeits- und Ressourcenschutzprinzipien. Jedes Gestaltungsfeld kann diverse Teilbereiche des Systems Digitalisierung betreffen und somit zum Ziel einer nachhaltigen und ressourcenschonenden Digitalisierung beitragen. Maßnahmen aus einem Gestaltungsfeld können auch Einfluss auf die potenziellen Ergebnisse anderer Gestaltungsfelder nehmen. Beispielweise können die Maßnahmen des Gestaltungsfeld „Kreislaufwirtschaft“ auch Einfluss auf das Gestaltungsfeld „Lieferketten“ haben.

Zur ressourcenschonenden Ausgestaltung der Digitalisierung sind Maßnahmen erforderlich, die zur Steigerung von Effizienz, Konsistenz und Suffizienz beitragen (Behringer, 2022; Santarius *et al.*, 2022). Die Effizienz von Geräten können die Nutzenden indirekt beeinflussen, indem sie bei (Kauf-) Entscheidungen sparsame Geräte bevorzugen. Die Konsistenz beeinflussen Nutzende, indem sie beispielsweise Strom aus erneuerbaren Energien beziehen. Die Suffizienz wiederum betrifft die Nachfrage nach IKT-Geräten und -Dienstleistungen. Sie lässt sich somit von Nutzenden direkt beeinflussen, indem diese den Bedarf an Geräten oder Dienstleistungen kritisch hinterfragen. Die im Folgenden dargestellten Gestaltungsfelder beschäftigen sich mit allen drei **Nachhaltigkeitsprinzipien – Effizienz, Konsistenz und Suffizienz** und sind von den zuvor dargestellten quantitativen Ergebnissen in diesem Forschungsvorhaben abgeleitet.

Eine nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung bedarf einer großflächigen Transformation sowie der Unterstützung durch viele Akteure\*Akteurinnen und Ebenen unseres Zusammenlebens und Wirtschaftens. Die beispielhaften Maßnahmen beziehen sich daher auf unterschiedliche Interessengruppen aus Politik, Wirtschaft, Gesellschaft und Wissenschaft.

Für jedes Gestaltungsfeld werden im Folgenden die Problemstellung und die aktuelle Situation erläutert. Relevante Ergebnisse aus diesem Forschungsvorhaben werden beschrieben und



beispielhaft mögliche Maßnahmen im Rahmen dieses Gestaltungsfelds genannt. Die wichtigsten Punkte sind für jedes Gestaltungsfeld jeweils in zwei Tabellen zusammengefasst. Die eine Tabelle enthält Informationen zu den relevanten Ergebnissen aus der Analyse der Fallstudien (siehe Kapitel 4) sowie der makroökonomischen Berechnungen (Kapitel 5 und Kapitel 6). Die andere Tabelle nennt beispielhafte Maßnahmen für Politik, Verbraucher\*innen und Unternehmen und beschreibt schlaglichtartig erste Ideen für den weiteren Forschungsbedarf (siehe dazu auch Kapitel 8).

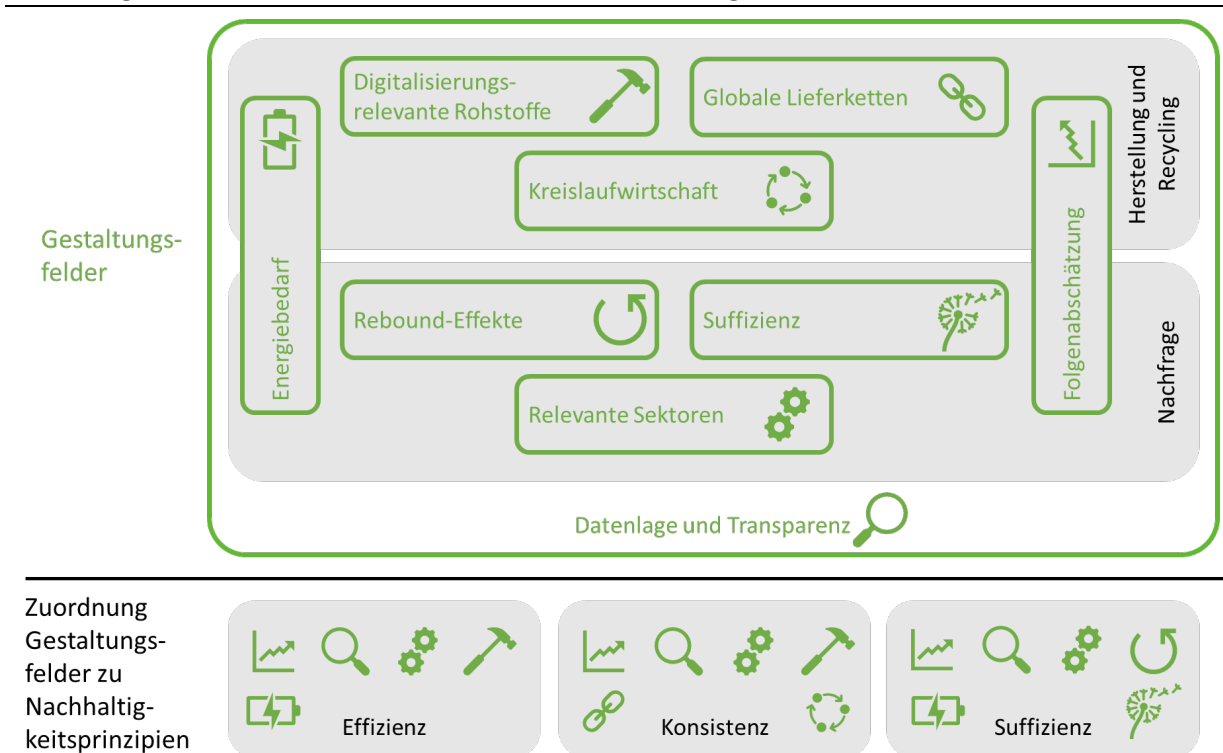
Übergreifend gilt somit für die Gestaltungsfelder und Beispielmaßnahmen:

Gestaltungsfelder bezeichnen Bereiche, die einen **Hebel zur ressourcenschonenden und nachhaltigeren Gestaltung** der Digitalisierung bieten.

Für jedes Gestaltungsfeld werden – wo passend – **beispielhafte Maßnahmen** für Politik, Verbraucher\*innen, Unternehmen und Forschung identifiziert, mit deren Hilfe die Digitalisierung nachhaltiger gestaltet werden kann bzw. Energie und Ressourcen weniger und/oder effizienter genutzt werden können.

Insgesamt wurden **neun Gestaltungsfelder** aus den Vorarbeiten identifiziert, die sowohl die Herstellung und das Recycling von IKT-Gütern und -Dienstleistungen als auch die Nachfrage danach thematisieren (Abbildung 124). Eines der Gestaltungsfelder („Datenlage und Transparenz“) wurde als Querschnittsfeld definiert, da es Einfluss auf alle anderen Gestaltungsfelder hat. Die Gestaltungsfelder beziehen sich darüber hinaus auf ein oder mehrere der drei Nachhaltigkeitsprinzipien Effizienz, Suffizienz und Konsistenz (Abbildung 124). Die Folge ist eine nachhaltige Digitalisierung, bei der Rohstoffe und Energie effizienter genutzt, weniger nachgefragt und umweltfreundlicher bereitgestellt werden. Das letztendliche Ziel sind geringere Umwelteinflüsse und Treibhausgasemissionen.

**Abbildung 124: Übersicht über die identifizierten Gestaltungsfelder**



Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

## 7.2 Gestaltungsfeld „Kreislaufwirtschaft“

### 7.2.1 Ausgangslage

Die Digitalisierung benötigt große Rohstoffmengen, da viele IKT-Geräte und unterstützende Infrastrukturen in Nutzung und Umlauf sind und häufig in kurzen Abständen ersetzt und erneuert werden. Laut den makroökonomischen Berechnungen in diesem Forschungsvorhaben wurden im Jahr 2020 etwa 95,4 Millionen Tonnen Rohstoffe für die deutsche Digitalisierung verwendet (*Raw Material Consumption*,  $RMC_{\text{Dig.}}$ ) in 2020, siehe Kapitel 5.5.1). Dies entspricht ca. 3,1 % des gesamten deutschen Rohstoffbedarfs. Davon sind 27,3 Millionen Tonnen Metallerze wie Gold, Silber, Platin, weitere Edelmetalle, Kupfererze, Eisenerze usw. (siehe Kapitel 5.4.1.1, Abbildung 83). Gleichzeitig würde das Recycling der in deutschen Schubladen liegenden Handys oder Smartphones ausreichend Material für die Produktion neuer Smartphones in den kommenden zehn Jahren ergeben (Fluchs & Neligan, 2023). Das Gestaltungsfeld „Kreislaufwirtschaft“ (Tabelle 30, Tabelle 31) befasst sich mit der effizienteren Nutzung von Rohstoffen im Sinne einer *Circular Economy* im Bereich der Digitalisierung und zielt auf eine **absolute Reduktion** des Rohstoffkonsums ab. Die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft – eine möglichst lange Nutzung von Materialien und Produkten, deren produktive Weiterverwertung und die Reduktion von Abfällen – lassen sich auf das System Digitalisierung anwenden, damit der Rohstoffkonsum sinkt. Ansatzpunkt ist die Optimierung der Lebenszyklen von IKT-Geräten, beispielsweise durch eine möglichst lange Nutzungs- beziehungsweise Lebensdauer sowie effizientes Recycling.

Deutschland hat sich bereits stark in die Erarbeitung einer Ökodesign-Verordnung der EU-Kommission eingebracht. Dieser Verordnung legt die relevanten Kriterien einer zirkulären Wirtschaft auch für IKT-Geräte fest, wie zum Beispiel deren Langlebigkeit und Wiederverwendbarkeit. Mit dem Ziel eines effizienteren Ressourcen- und Energiebedarfs digitaler Geräte erarbeitet das Bundesumweltministerium derzeit – analog zu dem auf EU-Ebene bereits vorgeschlagenen „*Right to Repair*“ – nationale Kriterien für ein Recht auf Reparatur, unter anderem von IKT-Geräten<sup>60</sup>. Die Europäische Kommission hat darüber hinaus gemeinsam mit den EU-Mitgliedstaaten die Einführung eines EU-Energielabels für Smartphones und Tablets ab 2025 beschlossen, das anzeigt, wie gut das jeweilige Gerät reparierbar ist. Bei der Umsetzung des Rechts auf Reparatur ist das Handwerk ein wichtiger Partner. Bisher gibt es jedoch erst wenige Initiativen, die eine Stärkung des Handwerks und dessen Nachwuchsgewinnung im Rahmen einer Kreislaufwirtschaft mit in den Blick nehmen.

Eine lange Lebensdauer von IKT-Geräten kann zudem an Software-**Obsoleszenz** scheitern. Damit ist gemeint, dass sich ältere Geräte nicht mehr richtig nutzen lassen, weil sie beispielsweise durch ein Upgrade auf die neueste Version des Betriebssystems sehr langsam werden oder weil der Support für ältere Software eingestellt wird. Oder Peripheriegeräte (also externe, an den Computer angeschlossene Geräte) werden nutzlos, weil keine Treiber mehr bereitstehen (Ax *et al.*, 2018). Zusätzlich begünstigen bestimmte Angebote und Nutzungsmodelle für Verbraucher\*innen eine kurze Lebensdauer. Beispielsweise werden Smartphones häufig im Rahmen von Mobilfunkverträgen verkauft, die nach zwei Jahren Laufzeit neue Geräte vorsehen und somit Anreize für eine kurze Lebensdauer der Geräte geben (Tröger *et al.*, 2017). Dem Recycling alter Geräte steht unter anderem die niedrige Sammelquote für Altgeräte von nur 44,1 % im Jahr 2020 entgegen (BMUV, 2020a). Gründe hierfür sind Exporte von Altgeräten über informelle Wege, die falsche Entsorgung über den Hausmüll und das Horten über lange Zeiträume in den Haushalten (Ostertag *et al.*, 2021a). Fast die Hälfte der

<sup>60</sup> Eine Bestandsaufnahme zu politischen Programmen (und Forschungsprojekten) im Kontext dieses Vorhabens und des Themas Ressourcen ist in Kapitel 2 dargestellt.

Bundesbürger\*innen bewahrt die Altgeräte aus Sorge vor Datendiebstahl zu Hause auf (Informationszentrum Mobilfunk.de, 2022).

**Tabelle 30: Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Kreislaufwirtschaft“**

Beschreibung des Gestaltungsfelds	Erkenntnisse aus den Fallstudien	Erkenntnisse aus der makroökonomischen Analyse
<p><b>Ausgangslage:</b> Hoher Rohstoffbedarf durch Herstellung von IKT-Geräten Großes anthropogenes Lager Geringe Sammel- und Recyclingquoten</p> <p><b>Zielsetzung:</b> Reduktion des Rohstoffbedarfs Steigerung der Sammelquote Verbesserung der Recycling-Prozesse Längere Nutzungsdauern von IKT-Geräten</p>	<p>Rohstoffbedarf bei der Herstellung als Haupttreiber („Videokonferenz“, „3D-Druck“, „digitales Lesen“) Hoher RMI auch durch vermeintlich kleine digitale Anwendungen hochgerechnet auf die deutsche Bevölkerung (Bsp. „E-Health“) „Kryptowährung“: Lebensdauer von Chips nur 1,5 Jahre Recycling nicht möglich Allgemeine Recherche: kurze Nutzungsdauer von IKT-Geräten</p>	<p>Digitalisierung verursacht 95,4 Mt Rohstoffkonsum in Deutschland (RMC<sub>Dig.</sub>). Großes Urban-Mining<sup>61</sup>-Potenzial aufgrund hohen Bedarfs von Edelmetallen und Kupfererzen.</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

**Tabelle 31: Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Kreislaufwirtschaft“**

Beispiele für Maßnahmen		
<p><b>Politisch – bereits angestoßen:</b> Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie Recht auf Reparatur für IKT-Geräte inkl. Stärkung des Handwerks Batteriepass und digitale Produktpässe für IKT-Produktgruppen</p> <p><b>Politisch – weitere:</b> Recht auf „Reverse Engineering“ für mögliche Einspareffekte Anreize für Produkte und Angebote (beispielsweise Mobilfunkverträge) mit längerer Lebensdauer</p>	<p><b>Verbraucher*innen:</b> Sammelquote von IKT-Geräten erhöhen Längere Nutzung von IKT-Geräten</p> <p><b>Unternehmen:</b> Ressourceneffizientere Produktion Besseres Recycling Weniger Obsoleszenz von Geräten und Software Anreize für Produkte und Angebote (beispielsweise Mobilfunkverträge) mit längerer Lebensdauer</p>	<p><b>Forschungsbedarfe:</b> Effiziente Gestaltung von digitalen Geräten Entwicklung von standardisierten Recyclingprozessen Identifikation von Hemmnissen und Schaffen von Anreizen</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### Einblicke in die Ressourcenintensität der Digitalisierung: Ergebnisse aus dem Vorhaben

Im Rahmen der Analyse der zehn Fallstudien (siehe Kapitel 4) wurde der Primärrohstoffeinsatz (RMI) in der Herstellungsphase für jeden Anwendungsfall – also ein RMI auf Mikroebene – berechnet. Die Größenordnung des RMI hängt wesentlich von der Definition des Anwendungsfalls ab. So erscheint der RMI von rund 5,2 Gramm für die Herstellung einer

<sup>61</sup> Urban Mining bezeichnet die Bewirtschaftung des anthropogenen Lagers (Rohstoffe, die in genutzten oder ungenutzten Infrastrukturen, Gebäuden oder langlebigen Gütern enthalten sind) mit dem Ziel, Sekundärrohstoffe zu gewinnen.

Smartwatch bezogen auf eine 16-stündige Nutzung zunächst sehr klein. Bezieht man aber ein, dass rund ein Drittel der 84,6 Mio. Deutschen eine Smartwatch nutzt, so ergibt sich ein Primärrohstoffbedarf von mehr als 139 Tonnen sowie mehr als 73 Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalente allein durch die Herstellung der Uhren anteilig für die 16-stündige Benutzung. Die Ergebnisse der Fallstudien zeigen beispielhaft, dass auch von vermeintlich „kleinen“ digitalen Anwendungen ein beträchtlicher Rohstoffbedarf ausgehen kann.

Im Rahmen der Fallstudienbetrachtungen wurden, auf Basis von Angaben der Hersteller oder aus der Literatur, immer wieder Annahmen zur Lebensdauer von Geräten getroffen. Die angenommenen Werte liegen, je nach Produkt, zwischen zwei und vier Jahren. Diese Zahlen weisen auf eine – zumindest im privaten Bereich – kurze Lebensdauer von IKT-Geräten hin.

Die gesamtwirtschaftliche Berechnung zeigt, dass die Digitalisierung im Jahr 2020 für 94,5 Millionen Tonnen bzw. für 3,1 % des gesamten Rohstoffkonsums in Deutschland (RMC<sub>Dig.</sub>) verantwortlich ist (siehe Kapitel 5.5.1). Dabei sind 80 % des Materialkonsums auf die Herstellung der in Deutschland verwendeten IKT-Güter zurückzuführen. Für typische „Elektronik-Rohstoffe“ werden hohe Verbräuche ermittelt. So brauchte die Endnachfrage in Deutschland 2020 global ca. 10 Millionen Tonnen Edelmetalle und ca. 8 Millionen Tonnen Kupfererze. Diese Zahlen lassen auf beachtliche Urban-Mining-Potenziale schließen.

## 7.3 Gestaltungsfeld „Digitalisierungsrelevante Rohstoffe“

### 7.3.1 Ausgangslage

Einige der Rohstoffe, die von aktuellen Studien – etwa derjenigen der Europäischen Kommission – als kritisch in Bezug auf ihre Verfügbarkeit eingestuft wurden, sind für die Produktion von IKT-Geräten essenziell (z. B. Tantal, Palladium, Gallium, Neodym und Dysprosium) (Bobba *et al.*, 2020). Wegen ihrer besonderen Relevanz für das Thema Digitalisierung und für das vorliegende Forschungsvorhaben wurden besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe in Arbeiten zu den Fallstudien (siehe Kapitel 4) als eigene Kategorie in den ökobilanziellen Untersuchungen definiert und behandelt.

Die Digitalisierung erhöht die Nachfrage nach diesen Rohstoffen deutlich (BMUV, 2020b). Dabei ist deren Gewinnung oft mit erheblichen sozialen und ökologischen (negativen) Auswirkungen verknüpft. Tantal etwa wird hauptsächlich im Kongo, in Ruanda, in Brasilien und in Nigeria abgebaut. Mehr als 60 % der Primärförderung von Tantal erfolgt in handwerklichem – sogenanntem artisanalem – Kleinbergbau (Schütte, 2021). Der Kleinbergbau führt zu Landnutzungskonflikten, erhöhter Bodenerosion und Entwaldung. Die Finanzierung bewaffneter Gruppen durch den Tantalabbau (daher der Begriff „Konfliktmineral“) ist durch eine verbesserte Transparenz der Lieferketten zwar zurückgegangen, aber nicht beendet (Schütte, 2021).

Damit Deutschland nachhaltig mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen versorgt wird, hat die Bundesregierung im Jahr 2010 ihre erste **Rohstoffstrategie** veröffentlicht. Damit hat sie einen breiten öffentlichen Diskurs angestoßen (BMWK, 2010). Ziel der Rohstoffstrategie sind Maßnahmen, die durch einen effizienten Umgang mit Rohstoffen den Einsatz von Primärrohstoffen möglichst niedrig halten.

Maßnahmen in diesem Gestaltungsfeld könnten sich auf den Schutz der Rohstoffe und auf umweltfreundlichere Abbauprozesse, auf die Identifikation von Einsparpotenzialen und auf vermehrtes Recycling fokussieren.

**Tabelle 32: Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Digitalisierungsrelevante Rohstoffe“**

Beschreibung des Gestaltungsfelds	Erkenntnisse aus den Fallstudien	Erkenntnisse aus der makroökonomischen Analyse
<p><b>Ausgangslage:</b> Die Digitalisierung braucht bestimmte Rohstoffe (sogenannte „digitalisierungsrelevante Rohstoffe“). Gewinnung und Verarbeitung haben häufig schwerwiegende Umweltwirkungen. Die zukünftige Verfügbarkeit einiger Rohstoffe ist unsicher.</p> <p><b>Zielsetzung:</b> Schutz bestimmter Rohstoffe Reduktion von Umwelteinflüssen durch Abbauprozesse Identifikation und Reduktion von Rohstoffbedarfen Steigerung der Recycling-Quote</p>	<p>27 Rohstoffe wurden als digitalisierungsrelevant identifiziert und in allen Fallstudien betrachtet. Aus den Fallstudien ergaben sich als bedeutsamste Rohstoffe aus dieser Liste: Gallium, Tantal, Gold, Silber, Zinn, Nickel, Scandium, Lithium.</p>	<p>Für typische „Elektronik-Rohstoffe“ sind beachtliche Urban-Mining-Potenziale anzunehmen. Dominierende Rohstoffkategorie der Digitalisierung innerhalb der Metallerze sind die Edelmetalle und Kupfererze.</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

**Tabelle 33: Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Digitalisierungsrelevante Rohstoffe“**

Beispiele für Maßnahmen		
<p><b>Politisch – bereits angestoßen:</b> Deutsche Rohstoffstrategie und Kreislaufwirtschaftsstrategie verzahnen Critical Raw Materials Act der EU Rohstoffpartnerschaften inkl. Achtung der Nachhaltigkeitskriterien</p> <p><b>Politisch – weitere:</b> Recyclingquoten für IKT-Geräte</p>	<p><b>Unternehmen:</b> Recycling verbessern und recycelte Materialien verwenden Verantwortungsvolle Lieferketten fördern</p>	<p><b>Forschungsbedarfe:</b> Alternativen zu kritischen Rohstoffen Effiziente Rückgewinnungstechnologien Anreize für Einsparpotenziale</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

**Einblicke in die Ressourcenintensität der Digitalisierung: Ergebnisse aus dem Vorhaben**

In den Vorarbeiten zur Analyse der Fallstudien (siehe Kapitel 4) wurden – basierend auf ihrer Nutzung in IKT-Geräten und ihrer Kritikalität – insgesamt 27 „digitalisierungsrelevante Rohstoffe“ identifiziert (siehe Kapitel 4,

Tabelle 7). Für jeden Anwendungsfall wurden diese Rohstoffe gesondert betrachtet und in Bezug zu ihrer jährlichen globalen Gesamtproduktion gesetzt. Für die betrachteten Anwendungsfälle der Fallstudien haben sich besonders die Rohstoffe Gallium, Tantal, Gold, Silber, Zinn, Nickel, Scandium und Lithium als relevant herausgestellt. Dabei sind es oft einzelne Komponenten des betrachteten Produktsystems, die einen erheblichen Teil des Bedarfs an digitalisierungsrelevanten Rohstoffen verursachen. So stecken im Netzteil des 3D-Druckers mehr als 90 % des berechneten Tantal- und Zinnbedarfs und über 50 % des Lithium-, Kupfer- und Silberbedarfs des betrachteten Systems. Darüber hinaus werden einzelne Rohstoffe fast ausschließlich für bestimmte Endgeräte oder Komponenten gebraucht. Beispielsweise geht der Lithiumbedarf in der Fallstudie „Videokonferenz“ zu fast 100 % auf die Batterie des Laptops zurück.

Die gesamtwirtschaftliche Berechnung im Rahmen des Forschungsvorhabens (siehe Kapitel 5) löst die gebrauchten Rohstoffe nicht detailliert genug auf, um Aussagen zu den einzelnen als digitalisierungsrelevant klassifizierten Rohstoffen aus Makroperspektive zu erlauben. Innerhalb der Metallerze sind jedoch die Edelmetalle, zu denen auch Gold und Silber gehören, die wichtigste Gruppe (35 % der gebrauchten Metallerze, siehe Kapitel 5). Dies deutet darauf hin, dass die digitalisierungsrelevanten Rohstoffe zu großen Teilen für die Digitalisierung zum Einsatz kommen.

### 7.3.2 Gestaltungsmöglichkeiten

#### 7.3.2.1 Politische Maßnahmen

Rohstoffgewinnung darf nur nach ökologischen und sozialen Standards erfolgen. Eine neue deutsche Rohstoffstrategie ist in Arbeit (BMWK, 2020), ebenso wie der *Critical Raw Materials Act* der EU. Damit die angestoßene politische Debatte Wirkung zeigt, müssen strategische Rohstoffpartnerschaften entsprechend ausgestaltet und Nachhaltigkeitskriterien eingehalten werden.

Die Bundesregierung hat angekündigt, zukünftig für eine enge Verzahnung von Kreislaufwirtschafts- und Rohstoffstrategie zu sorgen (BMWK, 2023a). So soll der Aufbau von Leitmärkten unter anderem durch Quoten für Recyclingrohstoffe und Rezyklate erfolgen. Die einzelnen Stoffströme sollen analysiert und daraus Maßnahmen abgeleitet werden, die bestehende Hemmnisse für den Einsatz von Recyclingrohstoffen zielgerichtet abbauen.

Für Innovationen in Ressourceneffizienz und Recycling von digitalisierungsrelevanten Rohstoffen sind ökonomische Anreizsysteme ebenso nötig wie regulatorische Mindestanforderungen und geeignete Finanzierungsinstrumente. Zudem müssen die Lieferketten weiter diversifiziert werden. Wo immer möglich, sollte im Sinne der Nachhaltigkeit auf heimische Ressourcen und Produkte zurückgegriffen werden.

#### 7.3.2.2 Unternehmen

Bei der Produktion von IKT-Geräten lassen sich durch den Einsatz recycelter Materialien digitalisierungsrelevante Rohstoffe schonen. Darüber hinaus sind Recyclingunternehmen gefragt, effizientere Recyclingprozesse für die Rückgewinnung digitalisierungsrelevanter Rohstoffe zu entwickeln. Auch verantwortungsvolle Lieferketten – z. B. zur Vermeidung von Konfliktmineralien – sind eine Aufgabe der Unternehmen.

#### 7.3.2.3 Forschungsbedarfe

**Alternativen zu kritischen Rohstoffen:** Zukünftige Forschungsvorhaben sollten sich verstärkt mit Substitutionspotenzialen von kritischen Rohstoffen auseinandersetzen. Die Identifizierung

und Förderung von nachhaltigen Alternativen verringert die Abhängigkeit von knappen bzw. kritischen Rohstoffen und trägt zur langfristigen Nachhaltigkeit digitaler Geräte bei. Das UBA hat bereits 2019 in einer Studie (Pagano & Krause, 2019) die Substitutionspotenziale von kritischen Rohstoffen für Umwelttechnologien erforscht. Daran sollten weitere Forschungsprogramme anknüpfen, die sich zusätzlich mit Alternativen zu kritischen Rohstoffen außerhalb der Umwelttechnologien auseinandersetzen.

**Effiziente Rückgewinnungstechnologien:** Es besteht ein Bedarf an Weiterentwicklung und Optimierung von effizienten Technologien bzw. Verfahren zur Rückgewinnung kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten. Ziel sollte es sein, dass das Recycling hinsichtlich Ressourcenaufwand, Effizienz bei der Ausbeute sowie Reinheit der zurückgewonnenen Rohstoffe attraktiv ist, sodass es sich unter finanziellen genau wie nachhaltigen Gesichtspunkten lohnt.

**Anreize für Einsparpotenziale:** Forschungsvorhaben sollten darauf abzielen, für Unternehmen und andere Akteure\*Akteurinnen Anreize zu schaffen, um Einsparpotenziale bei kritischen Rohstoffen zu erkennen und umzusetzen. Dazu können beispielsweise Anreizsysteme entwickelt werden. Es ist wichtig, einen Rahmen zu schaffen, der Unternehmen dazu ermutigt, nachhaltige Beschaffungs- und Produktionspraktiken zu implementieren.

## 7.4 Gestaltungsfeld „Globale Lieferketten“

### 7.4.1 Gestaltungsmöglichkeiten

#### 7.4.1.1 Politische Maßnahmen

Das Bundesumweltministerium erarbeitet derzeit (Stand Dez. 2023) eine **Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie** (NKWS) (BMUV, 2023) als Gesamtmaßnahmenpaket. Die NKWS soll Ziele und Maßnahmen zum zirkulären Wirtschaften und zur Ressourcenschonung aus allen rohstoffpolitisch relevanten Strategien zusammenführen. Dies dient dem Vorhaben aus dem Koalitionsvertrag, den primären Rohstoffbedarf absolut zu senken.

Auch klare und verbindliche Definitionen und Standards unterstützen eine zirkuläre Wirtschaft. Die Politik sollte die Erarbeitung von Normen und Standards, die Umweltaspekte für IKT-Geräte und -Dienstleistungen berücksichtigen, durch etablierte Standardisierungs- und Normungsgremien aktiv einfordern und fördern. Dazu gehört beispielsweise die Umsetzung von Normungsbedarfen aus der Normungs-Roadmap *Circular Economy* (DIN et al., 2023), die vom Bundesumweltministerium beauftragt und im Januar 2023 veröffentlicht wurde.

Die Einführung eines digitalen Produktpasses für IKT-Geräte sollte zeitnah erfolgen. Der Batteriepass als erster digitaler Produktpass seiner Art kann mit seinen Standards, die derzeit erarbeitet werden, auch als Blaupause für andere Produktgruppen dienen. Der digitale Produktpass erhöht die Transparenz eines Produkts hinsichtlich seiner Herkunft und Nachhaltigkeit und kann helfen, das Vertrauen der Verbrauchenden in zirkuläre Produkte zu stärken.

Gleichzeitig müssen die Verbraucher\*innen und \*Produzent\*innen mit entsprechenden Kampagnen dafür sensibilisiert werden, dass für den Ressourcenschutz eine Abkehr von der bisherigen „Wegwerfgesellschaft“ auch im Bereich der IKT-Geräte unabdingbar ist. Mobilfunkverträge mit „automatischer“ Bereitstellung eines neuen Smartphones nach zwei Jahren incentivieren eine kurze Lebensdauer. Hier könnten politische Anreize für andere Vertragsstrukturen geprüft werden.

#### 7.4.1.2 Verbraucher\*innen

Verbraucher\*innen müssen in die Abläufe der Kreislaufwirtschaft einbezogen werden. Eine Möglichkeit für Verbraucher\*innen, Software-Obsoleszenz zu umgehen, ist die Nutzung von alternativer Software, wie sie z. B. die Initiative „*Upcycling Android*“ bereitstellt<sup>62</sup>. Das heißt allerdings nicht, dass die Vermeidung von Software-Obsoleszenz den Verbraucher\*innen übertragen werden soll. In erster Linie ist es die Aufgabe von Unternehmen, ihre Produkte – im Sinne der EU-Ökodesign-Richtlinie – langfristig nutzbar zu machen (siehe Abschnitte 7.4.1.1 und 7.4.1.3). Die Sammelquote von IKT-Geräten könnte etwa durch die Einführung eines Pfandsystems oder durch Sammelsysteme, z. B. vergleichbar mit dem Sperrmüll, erhöht werden. Der Einzelhandel ist unter bestimmten Bedingungen bereits heute verpflichtet, Elektrogeräte zurückzunehmen. Sammelstellen sind aber selten gut sichtbar ausgewiesen. Im Zusammenhang mit Mobilfunkverträgen, die Anreize für eine kurze Lebensdauer schaffen, sind eine bessere Aufklärung der Verbraucher\*innen und ein bewussterer Umgang mit den Endgeräten wünschenswert.

#### 7.4.1.3 Unternehmen

Beispielhafte Maßnahmen zur Reduktion der Rohstoffintensität in der Produktion von IKT-Gütern setzen auf verschiedenen Ebenen an: im Produktdesign (siehe Abschnitt 7.4.1.4), in der Einführung und Nutzung von Umweltmanagementsystemen sowie in der damit einhergehenden erhöhten Ressourceneffizienz. Ein sorgfältiges Produktdesign und optimierte Produktionsprozesse ermöglichen etwa den effizienten Ressourceneinsatz bei der IKT-Produktion sowie letztlich ein effizientes Recycling der Produkte. Zur Reduktion der Software-Obsoleszenz sollten Unternehmen Updates bereitstellen, die eine längere Nutzung der Geräte möglich machen. Marktplatzbetreibende sollten einfache Möglichkeiten zum Aufspielen von alternativer Software zur Verfügung stellen. Mobilfunkverträge sollten nicht einseitig Anreize zum Kauf neuer Endgeräte schaffen, sondern attraktive Angebote zur Nutzung von vorhandenen oder gebrauchten (*refurbished*) Geräten machen.

Die Produktion von IKT-Geräten ließe sich durch effizientere und „grünere“ Prozesse, beispielsweise in Bezug auf die Energiebereitstellung, und durch die vermehrte Verwendung von recycelten Rohstoffen verbessern. Für das Recycling von IKT-Geräten wären Maßnahmen in den folgenden drei Bereichen sinnvoll: 1) Höhere Sammelquote, beispielsweise durch ein Pfand- oder Rückkaufsystem; 2) weniger Exporte von Altgeräten über informelle Wege; und 3) Gestaltung von IKT-Geräten im Sinne der Kreislaufwirtschaft, sodass Bestandteile im Verwertungsprozess gut trennbar sind. Darüber hinaus sollten in der Recyclingindustrie effiziente Sortier- und Trenntechniken geschaffen werden (siehe Abschnitt 7.4.1.4).

#### 7.4.1.4 Forschungsbedarfe

**Effiziente Gestaltung von digitalen Geräten:** Digitale Geräte wie Smartphones, Computer und Tablets haben einen hohen Ressourcenverbrauch während Herstellung und Nutzung. Es sollte daher ein übergeordnetes Ziel sein, diesen Gebrauch zu minimieren. Zielführend wäre es, in weiteren Forschungsvorhaben spezifische Materialien und Ressourcen zu identifizieren, die bei der Herstellung digitaler Geräte eingespart werden können. Darüber hinaus sollte die Effizienz einzelner Produktionsprozesse untersucht werden. Es braucht neue Konzepte und Strategien, um Ressourcen effizienter zu nutzen und Materialsubstitution zu ermöglichen. Das Ziel wären digitale Geräte mit längerer Lebensdauer, deren Wiederverwendung bzw. Recycling erleichtert und incentiviert wird.

---

<sup>62</sup> <https://fsfe.org/activities/upcyclingandroid/upcyclingandroid.de.html> (Stand: 20. Februar 2023)



**Entwicklung von standardisierten Recyclingprozessen:** Die Recyclingprozesse für digitale Geräte sind komplex und oft ineffizient. Deshalb sollten standardisierte Recyclingprozesse und -technologien vorangetrieben werden, die die Wiederverwendung bzw. die effektive Rückgewinnung von Materialien stärken. Einheitliche Prozesse helfen in der Regel, die Ressourcenintensität zu optimieren und Abfälle zu reduzieren.

**Identifikation von Hemmnissen und Schaffen von Anreizen:** Grundsätzlich muss das System Kreislaufwirtschaft auch im Hinblick auf die Akzeptanz innerhalb der Gesellschaft und der Industrie beleuchtet werden. Dabei gilt es vor allem herauszufinden, welche Hemmnisse bzw. Treiber die Kreislaufwirtschaft erschweren bzw. fördern. Zu nennen sind hier etwa rechtliche oder regulatorische Barrieren sowie Hindernisse in der Infrastruktur oder bei der Zusammenarbeit zwischen verschiedenen Akteuren\* Akteurinnen in der Wertschöpfungskette.

**Zukünftige Forschungsaktivitäten** sollten sich in diesem Kontext auch mit der Entwicklung von Anreizsystemen und Geschäftsmodellen auseinandersetzen, die es insbesondere dem produzierenden Gewerbe schmackhaft machen, auf Kreislaufwirtschaft zu bauen, und eine wirtschaftliche Rentabilität ermöglichen. Im Zuge der ökologisch-sozialen Transformation ist es kaum zu vermeiden, bestehende Geschäftsmodelle zu hinterfragen und neue Modelle zu entwickeln. Hier gibt es außerdem Potenziale für neue Geschäftsmodelle, die z. B. vermeintliche Abfallstoffe für Geräte und Dienstleistungen nutzen.

#### 7.4.2 Ausgangslage

Die Globalisierung hat zunehmend international organisierte Lieferketten für die Herstellung und Bereitstellung von digitalen Geräten und Dienstleistungen zur Folge. Die dafür benötigten Rohstoffe werden größtenteils im Ausland abgebaut und verarbeitet, wo meist auch die Produktion der IKT-Produkte stattfindet (Flach *et al.*, 2021). Globale Lieferketten bedeuten lange Transportstrecken, die das Produkt und dessen Bestandteile im Laufe ihrer Herstellung zurücklegen müssen. Diese Transporte sind ressourcenintensiv und mit THG-Emissionen verbunden. Zudem werden Einsicht und Informationslage bei den Herstellungsprozessen aufgrund unterschiedlicher Produktions- und Dokumentationsstandards je nach Land unterschiedlich gehandhabt. Die Umwelteinflüsse von Produktion und Logistik der IKT-Geräte sind somit schwer nachzuvollziehen. Dies erschwert die Berechnung der ökologischen Fußabdrücke von IKT-Geräten oder macht sie gar unmöglich (Flach *et al.*, 2021).

**Tabelle 34: Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Globale Lieferketten“**

Beschreibung des Gestaltungsfelds	Erkenntnisse aus den Fallstudien	Erkenntnisse aus der makroökonomischen Analyse
<p><b>Ausgangslage:</b>                      Rohstoffe werden hauptsächlich im Ausland abgebaut.                      Viele IKT-Geräte werden im Ausland hergestellt.                      Kaum Einsicht in Herstellungsprozesse und ökologische Fußabdrücke.                      Globale Lieferketten sind meist ressourcenintensiv.</p> <p><b>Zielsetzung:</b>                      Verbesserung der internationalen Zusammenarbeit</p>	Ressourcengebrauch, Energiebedarfe und verbundene THG-Emissionen für eine digitale Dienstleistung sind abhängig von lokalen Gegebenheiten, z. B. Umwelteinflüsse von Bitcoin-Mining („Kryptowährung“).	Die Digitalisierung in Deutschland beruht materiell auf Produktionsprozessen in Asien. Bei globaler Herstellung von IKT-Gütern werden große Mengen fossiler Energieträger eingesetzt. Der Großteil des Material- und CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Digitalisierung in Deutschland entsteht durch die Produktion und Lieferung von Hardware. In den Mitgliedstaaten der EU entstehen 13,6 % und in

Beschreibung des Gestaltungsfelds	Erkenntnisse aus den Fallstudien	Erkenntnisse aus der makroökonomischen Analyse
Informationen über Rohstoffgewinnung, Herstellung und Servicebereitstellung erlangen Transparentere, ressourcenschonendere, THG-ärmere Rohstoffgewinnung, Herstellung und Servicebereitstellung		Deutschland 13,4 % des CO <sub>2</sub> -Fußabdrucks der Digitalisierung in Deutschland.

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

**Tabelle 35: Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Globale Lieferketten“**

Beispiele für Maßnahmen		
<p><b>Politisch – bereits angestoßen:</b> Lieferkettengesetz Rückverfolgbarkeit über Digitale Produktpässe, wie den Batteriepass, ermöglichen</p> <p><b>Politisch – weitere:</b> Verstärkte Entwicklungskooperationen: Einrichtung einer internationalen Datenbank zu Bestandteilen, Produktion und Lieferketten von IKT-Geräten</p>	<p><b>Verbraucher*innen:</b> Bewussterer Konsum von IKT-Geräten und digitalen Dienstleistungen</p> <p><b>Unternehmen:</b> Green-Supply-Chain-Management einführen Anwendung von Ökodesign auf Geräte</p>	<p><b>Forschungsbedarfe:</b> Energieeffizienz in der Logistik Rückverfolgbarkeit Kriterien für nachhaltige Beschaffung</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

**Einblicke in die Ressourcenintensität der Digitalisierung: Ergebnisse aus dem Vorhaben**

In den Fallstudien wird die Herkunft der verwendeten Rohstoffe nicht aufgeschlüsselt. Die THG-Emissionen eines Anwendungsfalls sind hauptsächlich vom verwendeten Strommix abhängig. Wird also eine digitale Dienstleistung im Ausland bereitgestellt, können die THG-Emissionen dafür je nach verwendeter Energiequelle deutlich variieren („Kryptowährung“). Somit hängen die Treibhausgasemissionen stark von der spezifischen Lieferkette ab.

Die durch die deutsche Digitalisierung ausgelösten Umweltwirkungen treten überwiegend außerhalb Deutschlands auf. Die Produktion von IKT-Produkten und -Dienstleistungen hat stark zugenommen, das globale Produktionsniveau hat sich in den letzten 20 Jahren fast verdoppelt. Gleichzeitig ist seit dem Jahr 2000 der Anteil der inländischen Produktion von IKT-Gütern deutlich gesunken und der Anteil der IKT-Güter aus ostasiatischen Produktionsstätten hat deutlich zugenommen. Im Jahr 2020 wurden insgesamt lediglich ca. 26 % der Primärrohstoffe für die deutsche Digitalisierung (RMC<sub>Dig.</sub>) in Europa gewonnen, während davon nur ca. 21% in Deutschland gewonnen wurden (siehe Kapitel 5.4.1, Abbildung 85). Für die globale Herstellung von IKT-Gütern werden derzeit noch große Mengen fossiler Energieträger eingesetzt. Insgesamt waren im Jahr 2020 ca. 22,8 Millionen Tonnen des Rohstoffbedarfs (RMC<sub>Dig.</sub>) fossile Energieträger (siehe Kapitel 5.4.1, Abbildung 83). Die globalen Einflüsse zeigen sich auch beim CO<sub>2</sub>-Fußabdruck: Im Jahr 2020 entstanden 37,5 % des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der deutschen Digitalisierung in China. Ca. 13,4 % des CO<sub>2</sub>-Fußabdrucks der Digitalisierung in Deutschland sind auf inländische Emissionen zurückzuführen, ca. 13,6 % entfielen auf sonstige Mitgliedsstaaten der EU (siehe Kapitel 5.4.2).

### 7.4.3 Gestaltungsmöglichkeiten

#### 7.4.3.1 Politische Maßnahmen

Das Lieferkettengesetz von Januar 2023 beschreibt unternehmerische Sorgfaltspflichten in Bezug auf Menschenrechte und Umweltschutz in den globalen Lieferketten (LkSG, 2021). Es soll Landraub und umweltrechtliche Verstöße verhindern und für ein faires und resilientes Lieferkettenmanagement auch bei IKT-Geräten sorgen. Gemäß Lieferkettengesetz sollen die internationalen Handelsabkommen angepasst und entsprechende Richtlinien und Siegel eingeführt bzw. angepasst werden. Für die Rückverfolgbarkeit von Rohstoffen in IKT-Geräten bieten sich digitale Produktpässe an. Dabei handelt es sich um Datensätze, die Komponenten, Materialien und Substanzen, aber auch Informationen zu Reparierbarkeit, Ersatzteilen und fachgerechter Entsorgung für ein Produkt zusammenfassen. Ein Beispiel hierfür ist der in Arbeit befindliche Batteriepass (Rat der Europäischen Union, 2023).

Im Rahmen bestehender oder neu zu etablierender Entwicklungskooperationen mit potenziellen Lieferländern können **Kriterien einer nachhaltigen Digitalisierung** auf internationaler Ebene festgeschrieben und berücksichtigt werden. Ergebnisse dieses Forschungsvorhabens könnten dazu beitragen. Eine internationale Datenbank zu Bestandteilen, Produktion und Lieferketten von IKT-Geräten könnte dieses weiter unterstützen.

#### 7.4.3.2 Verbraucher\*innen

Da die Herstellungsprozesse von IKT-Geräten wenig transparent und schlecht dokumentiert sind, können die Verbraucher\*innen die Ressourcenintensität nur schwer nachvollziehen. Daher sind bewusster Konsum („Ist eine Neuanschaffung wirklich notwendig?“) und die Nutzung recycelter Geräte erstrebenswerte Umgangsweisen mit IKT-Geräten und können ressourcenintensive Lieferketten vermeiden.

#### 7.4.3.3 Unternehmen

Das Lieferkettengesetz sieht Sorgfalts- und Berichtspflichten für Unternehmen vor (LkSG 2021, §3, §10). Zur Implementierung dieser Pflichten in den Unternehmen ist ein *Green-Supply-Chain-Management* sinnvoll (Weiss *et al.*, 2017). Außerdem können Unternehmen die Lieferketten ihrer Geräte beeinflussen, indem sie diese nach den Grundsätzen des Ökodesigns gestalten. Dies bedeutet, dass Recycling möglich ist oder alternative Rohstoffe mit geringeren Umweltwirkungen verwendet werden können (Grüning *et al.*, 2023).

#### 7.4.3.4 Forschungsbedarfe

Zwar bieten globale Lieferketten wirtschaftliche Vorteile, aber in Bezug auf Nachhaltigkeit und Ressourcenbedarf sind sie kritisch zu betrachten. Unternehmen, Regierungen, Verbraucher\*innen und andere Akteure\*Akteurinnen müssen daher zusammenarbeiten, um nachhaltigere und verantwortungsvollere Lieferketten auszukundschaften und zu gestalten. Dies erfordert eine ganzheitliche Betrachtung der gesamten Wertschöpfungskette – von der Rohstoffgewinnung über die Produktion und den Transport bis hin zur Entsorgung. Im Folgenden werden beispielhaft einige Ansätze aufgezeigt.

**Energieeffizienz in der Logistik:** Die Erforschung von energieeffizienten Lösungen für den Transport von Waren innerhalb Deutschlands kann dazu beitragen, den Ressourcenbedarf zu reduzieren. Hier sind vor allem alternative Antriebstechnologien mit Strom, Wasserstoff oder Biogas zu nennen, aber auch intelligente Logistiksysteme zur Routenoptimierung und Ladekapazitätsplanung.

**Rückverfolgbarkeit:** In globalen Lieferketten sind die Herkunft der verwendeten Materialien und die Produktionsbedingungen häufig intransparent. Dies erschwert es Unternehmen und Verbraucher\*innen, den tatsächlichen Ressourcenaufwand digitaler Geräte zu bewerten und nachhaltige Entscheidungen zu treffen. Eine bessere Rückverfolgbarkeit entlang der gesamten Lieferkette könnte helfen, Umweltprobleme zu identifizieren und verantwortungsvolle Beschaffungspraktiken zu fördern. Forschungsbedarfe gibt es hier hinsichtlich der (Weiter-)Entwicklung und vor allem der Implementierung von digitalen Lösungen, die auf Basis von digitalen Zwillingen (bzw. digitalen Produktpässen) Informationen über den Ressourcenbedarf und die Nachhaltigkeit entlang der Lieferkette bereitstellen.

**Nachhaltige Beschaffung:** Die Integration von Nachhaltigkeitskriterien in die Beschaffung von digitalen Geräten könnte den ökologischen Fußabdruck der Produktion reduzieren und gepaart mit staatlicher Incentivierung/Sanktion auch den Produktionsstandort Deutschland attraktiver machen. Die Erforschung von Nachhaltigkeitskriterien und -bewertungen für digitale Geräte und Dienstleistungen könnte die Entwicklung von Richtlinien maßgeblich unterstützen und dazu beitragen, dass sich lokales Produzieren von (Teil-)Komponenten rentiert. Grundvoraussetzung dafür ist allerdings die Realisierbarkeit einer nachhaltigen nationalen Produktion, die aber ohne Subventionierung und entsprechende Maßnahmenpakete nur schwer umzusetzen ist.

## 7.5 Gestaltungsfeld „Rebound-Effekte“

### 7.5.1 Ausgangslage

Digitale Geräte und Dienstleistungen sowie die unterstützende Infrastruktur entwickeln sich weiter und unterliegen technischen Neuerungen. Dementsprechend werden sie zunehmend effizienter designt. Dies kann theoretisch den Ressourcenbedarfs der Digitalisierung reduzieren und negative Umweltwirkungen eingrenzen. Allerdings bewirken solche Effizienzgewinne häufig eine Steigerung des Konsums, sodass der Ressourcenbedarf gleichbleibt (Kompensation) oder sogar zunimmt (Überkompensation z. B. bei Verhaltensänderungen). Auf der individuellen Ebene sind bekannte Beispiele der Fernseher (der Energieverbrauch pro Bildschirmfläche sinkt, aber der neue Fernseher hat einen größeren Bildschirm) oder das Auto (das neue Auto ist sparsamer, also kann man mehr Kilometer fahren). Auf der gesamtgesellschaftlichen Ebene kann dieser als Rebound-Effekt bezeichnete Vorgang ebenfalls eintreten, z. B. wenn durch effizientere Autos weniger Kraftstoff nachgefragt wird und dies zu geringeren Preisen und damit zu höherem Verbrauch in anderen Bereichen führt. Die Ausprägung dieses Effekts hängt stark von etablierten Konsumgewohnheiten und -trends ab (Umweltbundesamt, 2019b). Es gilt, den Rebound-Effekt so weit wie möglich zu verhindern und bestimmte Voraussetzungen – etwa politische Maßnahmen oder nachhaltige technologische Innovationen – zu fördern, damit digitale Anwendungen auch reale Effizienz- und Nachhaltigkeitseffekte hervorbringen.

**Tabelle 36: Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Rebound-Effekte“**

Beschreibung des Gestaltungsfelds	Erkenntnisse aus den Fallstudien	Erkenntnisse aus der makroökonomischen Analyse
<p><b>Ausgangslage:</b> Umwelentlastungspotenziale eines digitalen Geräts oder einer Dienstleistung können nicht immer ausgeschöpft werden, da dadurch beispielsweise vermehrte Nachfrage/Nutzung</p>	<p>Verweise auf mögliche Rebound-Effekte durch gesteigerten Konsum („Digitales Lesen“, „Carsharing“, „C2C-Plattform“).</p>	<p>Gesamtwirtschaftliche Rebound-Effekte werden vom Modell erfasst, jedoch nicht explizit ausgewiesen.</p>

Beschreibung des Gestaltungsfelds	Erkenntnisse aus den Fallstudien	Erkenntnisse aus der makroökonomischen Analyse
<p>bewirkt wird und mögliche Einsparungen kompensiert werden.</p> <p><b>Zielsetzung:</b> Rebound-Effekte mitdenken und so weit wie möglich vermindern.</p>		

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

**Tabelle 37: Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Rebound-Effekte“**

Beispiele für Maßnahmen		
<p><b>Politisch – bereits angestoßen:</b>                      Koordinierung und Abstimmung von Maßnahmen, die die Digitalisierung nachhaltig und die Nachhaltigkeit digital machen                      Rebound-Effekt von IKT-Geräten von vornherein in Umwelt- und Digitalpolitik einpreisen</p> <p><b>Politisch – weitere:</b>                      Öffentliches Bewusstsein schärfen: Umweltabgaben, um Rebound-Effekt zu begegnen</p>	<p><b>Verbraucher*innen:</b>                      Ausnutzen von Effizienzmaßnahmen und nachhaltigen Alternativen                      Einsparungen in nachhaltige Geräte oder Anwendungen investieren                      Veränderungen im Nutzungsverhalten aufgrund neuer Trends hinterfragen                      Problembewusstsein schärfen                      Unternehmen:                      Festlegen anspruchsvoller Effizienzziele und Maßnahmen</p>	<p><b>Forschungsbedarfe:</b>                      Ursachen- und Auswirkungsanalyse                      Kontextspezifische Untersuchungen</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### Einblicke in die Ressourcenintensität der Digitalisierung: Ergebnisse aus dem Vorhaben

Mit dem Einsatz von digitalen Anwendungen sollen häufig Effizienzsteigerungen erreicht und Ressourcen geschont werden. Die in den Fallstudien betrachteten Anwendungen verweisen jedoch auf mögliche Rebound-Effekte, die durch gesteigerten Konsum auftreten („Digitales Lesen“, „Carsharing“). Ein Beispiel für einen solchen Rebound-Effekt ist der Handel mit Gebrauchsgütern über *Consumer-to-Consumer*-Plattformen. Durch den Kauf gebrauchter Produkte wird zwar der Ressourcenbedarf vermindert. Gleichzeitig führen aber der einfachere und schnellere Produktzugriff sowie kostengünstigere Produkte zu einem ansteigenden Konsum, der das Umweltentlastungspotenzial mindert („C2C-Plattformen“).

Rebound-Effekte wurden in diesem Vorhaben im Rahmen der Input-Output-Modellierungsarbeit berücksichtigt und sind implizit im Modell enthalten, werden jedoch nicht explizit ausgewiesen. Somit wurde keine gesamtwirtschaftliche Abschätzung von Rebound-Effekten vorgenommen. Zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollten darauf abzielen, den in Verweis auf Kapitel 6 vorgestellten Bewertungsansatz weiter in Richtung eines vollständigen makroökonomischen Simulationsmodells zu entwickeln.

## 7.5.2 Gestaltungsmöglichkeiten

### 7.5.2.1 Politische Maßnahmen

Zwar gibt es mittlerweile ein wachsendes Bewusstsein sowie eine zunehmende Anzahl staatlicher Regulierungs- und Fördermaßnahmen, die die Digitalisierung nachhaltig und die Nachhaltigkeit digital machen sollen. Dennoch bedarf es einer besseren Koordinierung und Abstimmung dieser Maßnahmen, um die Klimaziele zu erreichen und Rebound-Effekte zu vermeiden.

So ist zum Beispiel in der Umwelt- und Digitalpolitik von vornherein zu berücksichtigen, dass Rebound-Effekte die Ressourceneinsparungen schmälern. Politische Vorgaben für die Energieeffizienz sollten den Rebound-Effekt von IKT-Geräten von vornherein mitberücksichtigen.

Aus Effizienzgewinnen resultierende Kostensenkungen für IKT-Geräte könnten zum Beispiel über Umweltabgaben ausgeglichen werden, um Rebound-Effekten zu begegnen. Nicht zuletzt

muss das öffentliche Bewusstsein dafür geschärft werden, dass IKT-Geräte nicht nur persönliche Effizienzgewinne bringen, sondern gleichzeitig die Umwelt belasten.

#### 7.5.2.2 Verbraucher\*innen

Rebound-Effekte entstehen schnell, wenn sich das Nutzerverhalten durch digitale Anwendungen verändert, neue Geräte und neue Anwendungen vermehrt gekauft und genutzt werden und Effizienzmaßnahmen nicht zum Tragen kommen. Um Rebound-Effekte zu vermeiden, sollten die Verbraucher\*innen ihre Konsum- und Nutzungsgewohnheiten im Auge behalten. Die Themen Digitalisierung und ihre Umweltwirkungen, Konsum, Effizienz, Suffizienz und Rebound-Effekte sollten bereits in den Lehrplänen von **Schulen** verankert sein, um Kinder frühzeitig zu sensibilisieren. Ein bewusster Konsum von energie- und ressourcensparenden oder recycelten Produkten ist ein wichtiger Schritt, um Rebound-Effekte zu vermeiden. Als Beispiel kann das Carsharing dienen: Carsharing, das Fixkosten einspart, sollte nicht dazu führen, dass vermehrt längere Strecken gefahren werden und somit ein größerer Umwelteinfluss entsteht. Je präsenter das Problembewusstsein bei den Konsumierenden bleibt, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass ein Rebound-Effekt auftritt (Golde, 2016; Semmling *et al.*, 2016).

#### 7.5.2.3 Unternehmen

Unternehmen können Rebound-Effekten auf Unternehmensebene vorbeugen, indem sie herausfordernde Effizienzziele setzen, die bereits den Rebound-Effekt berücksichtigen, und darauf basierend entsprechende Maßnahmen ergreifen (Umweltbundesamt, 2019b). Wenn beispielsweise ein Unternehmen 100.000 kWh Strom einsparen möchte und ein Rebound-Effekt in der Größenordnung von 20.000 kWh zu erwarten ist, sind insgesamt Maßnahmen zum Einsparen von 120.000 kWh nötig.

#### 7.5.2.4 Forschungsbedarfe

Erst durch die intensive Erforschung von Rebound-Effekten (und die Umsetzung der gewonnenen Erkenntnisse) lässt sich ein tieferes Verständnis dafür entwickeln, wie Effizienzmaßnahmen tatsächlich zum Rückgang des Ressourcenbedarfs und der Umweltwirkungen beitragen können. Ziel sollte es sein, die Mechanismen und Auswirkungen von Rebound-Effekten besser zu verstehen und geeignete Maßnahmen zu entwickeln, um solche Effekte zu minimieren oder zu vermeiden.

**Ursachen- und Auswirkungsanalyse:** Die Ursachen, der Umfang und die Auswirkungen von Rebound-Effekten im Kontext digitaler Geräte bzw. Dienstleistungen sind bisher nur schwer zu quantifizieren und zu verifizieren. Grund dafür ist, dass die Zusammenhänge mitunter schwer vorhersehbar und komplex sind. Forschungsvorhaben sollten sich daher verstärkt mit Analysen von Verhaltensänderungen, Preiseffekten, sozialen Normen und anderen Faktoren auseinandersetzen, die das Nutzungsverhalten und damit mögliche Rebound-Effekte digitaler Angebote beeinflussen. Grundsätzlich sollten auf Basis gesammelter Erfahrungen und Erkenntnisse Ansätze zur Messung und Bewertung von Rebound-Effekten entwickelt werden. So kann deren Bedeutung besser verstanden werden und stärker in den Kontext einer Nachhaltigkeitsbewertung einfließen.

**Kontextspezifische Untersuchungen:** Um die Rolle von Rebound-Effekten in verschiedenen Bereichen der Digitalisierung besser verstehen und Lösungsansätze entwickeln zu können, ist eine (granulare) kontextspezifische Untersuchung zielführend. Dies könnte z. B. die Analyse von spezifischen Anwendungsfällen wie E-Commerce, digitale Mobilität, Cloud-Computing oder Smart-Homes umfassen. Durch die Fokussierung auf spezifische Sektoren, Bereiche oder Produktgruppen sollte es möglich sein, relevante Faktoren und Wechselwirkungen zu identifizieren und damit Strategien und Maßnahmen zu entwickeln.

## 7.6 Gestaltungsfeld „Energiebedarf“

### 7.6.1 Ausgangslage

Die Digitalisierung kann in vielen Fällen die Energieeffizienz verschiedener Wirtschaftsbereiche verbessern („**Industrie 4.0**“). Allerdings verursacht auch die Digitalisierung an sich im deutschen Energiesektor einen zunehmenden Bedarf, der durch die vermehrte Nutzung von IKT-Geräten und die wachsende Abhängigkeit von digitalen Diensten und Infrastrukturen bedingt ist (EFI, 2020).

Insbesondere IKT-Geräte, Rechenzentren und Datenübertragung sind die Treiber des Energiebedarfs. Häufig kommt dafür Strom aus fossilen Energiequellen zum Einsatz, der große Mengen an Treibhausgasemissionen verursacht (Hintemann *et al.*, 2022). Die Datenlage zum Energiebedarf der einzelnen Komponenten (IKT-Geräte, Rechenzentren, Datenübertragung) ist jedoch nicht einheitlich (EFI, 2020). Ein Grund dafür ist die schlechte Informationslage in Bezug auf die Energiebereitstellung, besonders bei digitalen Dienstleistungen aus dem Ausland. Der Mangel an einheitlichen Umweltmanagementsystemen (zu denen das europäische EMAS-System gehört) hindert Unternehmen daran, die Energie- und Materialeffizienz ihrer Produkte zu verbessern (Neumann, 2020).

Damit die Digitalisierung zukünftig nachhaltiger verläuft, muss der Energiebedarf von Geräten, Dienstleistungen und begleitender Infrastruktur sinken und eine gesellschaftsübergreifende Reduktion des Energiebedarfs angestrebt werden. Zudem sind Lösungen für eine nachhaltige Art der Energiebereitstellung notwendig, damit der entsprechende THG-Ausstoß sinkt.

**Tabelle 38: Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Energiebedarf“**

Beschreibung des Gestaltungsfelds	Erkenntnisse aus den Fallstudien	Erkenntnisse aus der makroökonomischen Analyse
<p><b>Ausgangslage:</b>                      Digitalisierung als energieintensiver Trend (IKT-Geräte, Rechenzentren und Datenübertragung)                      Wenig Informationen über verwendeten Strommix (v. a. im Ausland) und verbundene THG-Emissionen                      Steigender Energiebedarf durch neue Technologien (KI, Cloud-Computing)                      Steigender Energiebedarf durch mehr digitale Geräte</p> <p><b>Zielsetzung:</b>                      Reduktion des Energiebedarfs                      Nachhaltige Art der Energiebereitstellung                      Reduktion des THG-Ausstoßes</p>	<p>Energiebedarf bei der Nutzung als Haupttreiber („Kryptowährung“, „Smart-Home“, „E-Health“, „E-Sports“)                      Einfluss des Strommixes auf THG-Emissionen („Smart-Home“)                      Energiebedarf der Rechenzentren je nach Szenario unterschiedlich („C2C-Plattform“)                      Hauptanteil des Strombedarfs infolge der Nutzung von IKT und des Betriebs von Rechenzentren (alle Fallstudien)                      Art der Datenübertragung entscheidend für Energieintensität (Recherchearbeit zu „Videokonferenz“)</p>	<p>IKT-Ausgaben verlagern sich immer mehr von Hardware zu Software und Dienstleistungen.</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023



**Tabelle 39: Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Energiebedarf“**

Beispiele für Maßnahmen		
<p><b>Politisch – bereits angestoßen:</b> Energieeffizienzgesetz mit Abwärmegewinnung aus Rechenzentren „Blauer Engel“ als Siegel für Software und Rechenzentren Green Coding bereits in der Ausbildung fördern</p> <p><b>Politisch – weitere:</b> Nachhaltige Software in nachhaltige Produktpolitik einbeziehen: Forschung und Entwicklung zu „Green ICT“ fördern</p>	<p><b>Verbraucher*innen:</b> Energieeffiziente Softwarenutzung (Blauer Engel) Download statt Streaming Einstellen von geringerer Videoqualität Nutzung von Ökostrom Energiespareinstellungen am Smartphone</p> <p><b>Unternehmen:</b> Energieeffiziente Softwarenutzung (Blauer Engel) Softwareaudits zu Energieeinsparungen (z. B. EMAS)</p>	<p><b>Forschungsbedarfe:</b> Energieeffiziente Hardwarekomponenten Intelligente Kühlungssysteme Rechenzentrumsarchitektur</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### Einblicke in die Ressourcenintensität der Digitalisierung: Ergebnisse aus dem Vorhaben

Die Fallstudien untersuchen die Energieeffizienz der Herstellungs- und Nutzungsphase verschiedener Anwendungen. Die Ergebnisse zeigen, dass der Hauptanteil des Energiebedarfs durch die Nutzung von IKT-Geräten und durch den Betrieb von Rechenzentren entsteht („Kryptowährung“, „Smart-Home-System“, „E-Health“, „E-Sports“). Besonders der Energiebedarf für Datenübertragung und -speicherung in den Rechenzentren wirkt sich auf alle berechneten Rohstoffbedarfs- und Umweltwirkkategorien aus („Consumer-to-Consumer-Plattform“). Zudem verursacht die Zusammensetzung des lokal vorherrschenden Strommixes starke Schwankungen in den Angaben zu den THG-Emissionen eines Anwendungsfalls. Wird ein System mit einem grünen Strommix betrieben, entstehen entsprechend weniger Treibhausgase. Dies kann letztlich über das Umweltentlastungspotenzial eines Anwendungsfalls entscheiden („Smart-Home-System“).

Aus den makroökonomischen Berechnungen abzuleiten, dass sich in Deutschland die Ausgaben für die Digitalisierung weg von Hardware hin zu Dienstleistungen verschieben, was zu einem größeren Energiebedarf führen kann. Am Beispiel Cloud-Computing wird deutlich, dass die genaue Ausgestaltung eines Angebots deutlichen Einfluss auf den Energieverbrauch hat (Gröger *et al.*, 2020).

## 7.6.2 Gestaltungsmöglichkeiten

### 7.6.2.1 Politische Maßnahmen

Als Basis für eine nachhaltige Digitalisierung müssen die ambitionierten Ausbauziele für erneuerbare Energien unbedingt weiterverfolgt werden, damit sich möglichst wenig emissionsintensive fossile Energien im Energiemix befinden und gleichzeitig die Stromversorgung stabil bleibt.

Das Energieeffizienzgesetz 2023 (Bundesregierung, 2023) dient dabei als gesetzlicher Rahmen für den Bau und Betrieb nachhaltiger Rechenzentren und gibt konkrete Vorgaben zu Energieeinsparungen. Außerdem soll Abwärme genutzt werden, wenn dies möglich und wirtschaftlich ist.

Mit dem „Blauen Engel“ steht für Software und Rechenzentren ein Umweltsiegel zur Verfügung, das nach klaren Kriterien vergeben wird. Mit höheren Mindestanforderungen ließen sich hier zum Beispiel Anreize für effizientere Rechenzentren setzen. Zudem sollte der Anreiz für die praktische Anwendung von Zertifizierungen wie dem Blauen Engel erhöht werden.

Darüber hinaus sollte nachhaltige Software in eine nachhaltige Produktpolitik in Deutschland und Europa einbezogen werden. Eine verstärkte politische Förderung der Forschungs- und Entwicklungsaktivitäten im Bereich grüner IKT-Geräte („*Green ICT*“) sollte zum Ziel haben, energieeffiziente und ressourcenschonende digitale Lösungen voranzubringen. Die Entwicklung umweltfreundlicher Softwaresysteme („*Green Coding*“) sollte bereits in der Ausbildung als Grundlage gefördert werden, um angehende Fachkräfte frühzeitig für Nachhaltigkeit zu sensibilisieren.

#### 7.6.2.2 Verbraucher\*innen

Verbraucher\*innen können darauf achten, ressourcen- und energieeffiziente Software zu nutzen. Diese trägt das Umweltzeichen „Blauer Engel“, das ein Bewusstsein für die Umweltwirkungen schafft, die Software verursacht (Naumann *et al.*, 2021).

Auch beim alltäglichen Gebrauch von digitalen Anwendungen, wie beispielsweise beim Streaming, kann durch Voreinstellung der Energiebedarf reduziert werden. Dafür sollte man zum Beispiel nicht die höchste Videoauflösung auswählen oder häufiger konsumierte Musik und Videos direkt herunterladen, anstatt sie zu streamen (Verbraucherzentrale, 2022).

Der Energiebedarf für die Nutzung von IKT-Geräten und für die Anwendung von digitalen Dienstleistungen ist stark vom verwendeten Strommix abhängig. Somit kann Ökostrom zu THG-Einsparungen beitragen (Grünwald & Caviezel, 2022). Diese Maßnahme betrifft nicht nur private Haushalte, sondern ist auch in Unternehmen umsetzbar (Neumann, 2020).

#### 7.6.2.3 Unternehmen

Die Nutzung energieeffizienter und mit dem „Blauen Engel“ zertifizierter Software spart auch in Unternehmen Energie ein. Zusätzlich kann das europäische EMAS-System implementiert werden. Es ist ein effektives Instrument des Umweltmanagements und kann die Energie- und Materialeffizienz innerhalb von Unternehmen verbessern (EMAS, 2012). So sparte beispielsweise Volkswagen Sachsen durch die Implementierung des EMAS-Systems etwa 15 % Energie ein (EMAS, 2012).

#### 7.6.2.4 Forschungsbedarfe

Der zunehmende Einsatz von digitalen Technologien und die steigende Datenmenge führen zwangsläufig auch zu einem kontinuierlichen Anstieg des Energieverbrauchs von Rechenzentren und Servern. Um den ökologischen Fußabdruck der Digitalisierung zu reduzieren und einen nachhaltigen Umgang mit Energie zu gewährleisten, sollte insbesondere die Energieeffizienz im Mittelpunkt weiterer Forschungsinitiativen stehen. Dies umfasst die Entwicklung und Implementierung von Technologien, die den Energieverbrauch reduzieren. Hier wurden exemplarisch folgende Forschungsbedarfe identifiziert:

**Energieeffiziente Hardwarekomponenten:** Die Forschung sollte sich auf die Entwicklung neuer Materialien und Designs konzentrieren, die den Energieverbrauch von Hardwarekomponenten wie Prozessoren, Speichermodulen und Netzwerkschnittstellen reduzieren. Hierzu gehören beispielsweise fortschrittliche Halbleitermaterialien, die einen geringeren Energiebedarf haben, sowie innovative Schaltungs- und Architekturkonzepte, die eine effizientere Datenverarbeitung ermöglichen. Ein weiterer Bedarf besteht darin, Hardwarekomponenten so zu gestalten, dass sie auch bei niedriger Last energieeffizient

arbeiten. Hier sollten beispielsweise Komponenten entwickelt werden, die ihre Leistung dynamisch an die aktuelle Auslastung anpassen. Darüber hinaus könnte auch der Einsatz von künstlicher Intelligenz helfen, den Energieverbrauch zu optimieren.

**Intelligente Kühlsysteme:** Zukünftige Forschungsprojekte sollten sich darauf konzentrieren, neue Methoden und Strategien für effizientere Kühlungsleistung zu entwickeln, ohne dabei die Betriebssicherheit zu beeinträchtigen. Dazu könnten zum Beispiel adaptive Kühlungsstrategien gehören, bei denen die Kühlleistung dynamisch an die tatsächlichen Anforderungen und die Auslastung der Server angepasst wird.

**Rechenzentrumsarchitektur:** Die Architekturen von Rechenzentren sollten skalierbar und flexibel sein, um den sich ständig ändernden Anforderungen gerecht zu werden. Forschungsprojekte könnten sich auf die Entwicklung von modularen und anpassungsfähigen Architekturen konzentrieren, die eine einfache Erweiterung oder Anpassung der Rechenzentrumsinfrastruktur ermöglichen. Dies könnte dazu beitragen, Ressourcenverschwendung zu minimieren und die Effizienz des Betriebs zu verbessern. Darüber hinaus sollte untersucht werden, wie Rechenzentren und ihre Infrastruktur optimal an die dezentralen Anforderungen des *Edge-Computings* angepasst werden können und welche Potenziale hier in Bezug auf Energieeinsparungen existieren.

## 7.7 Gestaltungsfeld „Relevante Sektoren“

Dieses Gestaltungsfeld greift vorrangig auf spezifische Ergebnisse der makroökonomischen Simulationen (siehe Kapitel 5 und Kapitel 6) im Forschungsvorhaben DigitalRessourcen zurück. Die Beschreibung der Inhalte weicht daher in der Struktur von den anderen Gestaltungsfeldern ab.

Die makroökonomischen Simulationen betrachten den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck sowie zwei umweltökonomische Indikatoren für den Rohstoffbedarf: den RMC (*Raw Material Consumption*) und den RMI (*Raw Material Input*) – jeweils auf makroökonomischer Ebene. Der RMC auf der Makroebene bezeichnet die Primärrohstoffanspruchnahme, die durch die inländische Endnachfrage nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen in Deutschland verursacht wird. Diese Nachfrage entspricht den Konsumausgaben privater Haushalte, den Konsumausgaben des Staates und den Bruttoinvestitionen der Wirtschaft. Der RMI auf Makroebene hingegen umfasst zusätzlich den Rohstoffbedarf durch Güter und Dienstleistungen, die aus Deutschland exportiert werden.

Mit den makroökonomischen Input-Output-Modellen lässt sich der Beitrag bestimmter Wirtschaftsbereiche zum Umwelteinfluss der Digitalisierung aus zwei Perspektiven analysieren: zum einen aufgeschlüsselt nach den erzeugten IKT-Gütern und -Dienstleistungen, zum anderen aufgeschlüsselt nach den Sektoren, die diese IKT-Produkte und -Dienstleistungen nachfragen.

### Analyse der Produktgruppen

Das Forschungsvorhaben unterscheidet bei den produzierten IKT-Gütern und -Dienstleistungen fünf Produktgruppen:

Hardware (Herstellung von elektronischen Bauelementen und Leiterplatten, Datenverarbeitungsgeräten und peripheren Geräten, Geräten und Einrichtungen der Telekommunikationstechnik, Geräten der Unterhaltungselektronik und magnetischen und optischen Datenträgern).

Telekommunikation.

Informationsdienste (Verlegen von Software, Erbringung von Dienstleistungen der Informationstechnologie).

Großhandel (mit Geräten der Informations- und Kommunikationstechnik).

Sonstige IKT-Dienstleistungen (Reparatur von Datenverarbeitungs- und Telekommunikationsgeräten).

Die Ergebnisse der Simulationen (siehe Kapitel 6) zeigen, dass der **Bereich Hardware** den mit Abstand größten Beitrag zu den ressourcenökonomischen Indikatoren liefert (über 80 % des  $RMC_{Dig}$ , sowie des  $RMI_{Dig}$  und 78,4 % des  $CO_{2, Dig}$ -Fußabdrucks im Jahr 2020). Die Produktgruppe Hardware umfasst sehr unterschiedliche Bereiche. Um sinnvoll Maßnahmen zur Reduktion von  $RMC_{Dig}$ ,  $RMI_{Dig}$  und  $CO_{2, Dig}$ -Fußabdruck durch die Herstellung von Hardware abzuleiten, wäre eine detailliertere Unterteilung der Produktgruppe erforderlich. In zukünftigen Projekten könnte daher die explizite Nutzung der Hardware pro Sektor erfasst werden, um daraus mögliche nachhaltigere Entwicklungsoptionen abzuleiten.

Die Produktgruppe **Telekommunikation** weist den nächsthöchsten  $RMC_{Dig}$ ,  $RMI_{Dig}$  und  $CO_{2, Dig}$ -Fußabdruck auf (11,2 % bezogen auf den  $RMC_{Dig}$  und  $RMI_{Dig}$  des Jahres 2020, 12,1 % des  $CO_{2, Dig}$ -Fußabdrucks). Der Bereich der Telekommunikation umfasst leitungsgebundene, drahtlose, satellitengestützte und sonstige Telekommunikation. Für eine gezielte Ansprache der relevanten Akteure\*Akteurinnen dieser Gruppe wäre auch hier eine weitere Aufschlüsselung ratsam.

Die anderen beschriebenen Produktgruppen machen nur einen relativ geringen Teil des  $RMC_{Dig}$  aus. Eine Fokussierung auf die Bereiche Hardware und Telekommunikation erscheint daher sinnvoll.

### Analyse der nachfragenden Sektoren

Makroökonomische Fußabdruck-Indikatoren berichten über Umweltinanspruchnahmen zur Herstellung der im Inland genutzten Endprodukte. Gemäß dieser „klassischen“ Konzeption würde der RMC der Digitalisierung über die Masse sämtlicher zur Bereitstellung der im Inland final nachgefragten Hardwareprodukte, Telekommunikationsdienstleistungen, Informationsdienstleistungen, dem Großhandel mit Geräten der Informations- und Kommunikationstechnik sowie sonstigen IKT-Dienstleistungen global eingesetzten Primärrohstoffe berichten. Unberücksichtigt bliebe dabei, dass IKT-Güter und Dienstleistungen (im zunehmenden Umfang) auch von „**Nicht-IKT**“-**Wirtschaftsbereichen** in der Vorleistung verwendet werden.<sup>63</sup> Um sämtliche volkswirtschaftliche Verwendungen von IKT-Gütern und Dienstleistungen zu erfassen,

---

<sup>63</sup> Um hierfür ein konkretes Beispiel zu benennen, kann bspw. auf den Kraftfahrzeugbau verwiesen werden: Moderne PKW werden heute üblicherweise mit umfassenden Entertainment- und Navigationssystemen ausgestattet, welche noch vor einer Dekade allenfalls für Luxuslimousinen verfügbar waren. Die hierfür benötigten Primärrohstoffe würden bei einer klassischen Fußabdruck-Betrachtung der Endnachfrage nach Produkten der Kraftfahrzeugbranche zugerechnet.

wurde daher das klassische Fußabdruck-Konzept in diesem Forschungsvorhaben zusätzlich um sämtliche übrige Vorleistungsnachfragen von „Nicht-IKT“-Wirtschaftsbereichen nach IKT-Gütern und Dienstleistungen erweitert. Um die Analyseergebnisse übersichtlich zu präsentieren, wurden die „Nicht-IKT“-Wirtschaftsbereiche in fünf Bereiche zusammengefasst (Tabelle 40).

**Tabelle 40: Nachfragende des Vorleistungsbereichs in der makroökonomischen Simulation**

Nachfragender Wirtschaftsbereich (Buchstabenkürzel laut NACE rev. 2 <sup>a</sup> )	Sub-Bereiche laut NACE rev. 2 <sup>a</sup>	Aggregation in den Ergebnissen der makroökonomischen Simulation
Landwirtschaft (A)	Landwirtschaft Forstwirtschaft Fischerei und Aquakultur	Andere Wirtschaftszweige
Verarb. v. Mineralöl u. Steinen u. Erden; Chemie (CD–CG)	Kokerei und Mineralölverarbeitung Herstellung von chemischen Erzeugnissen Herstellung von Gummi- und Kunststoffwaren sowie von Glas und Glaswaren, Keramik, Verarbeitung von Steinen und Erden	Andere Wirtschaftszweige
Datenverarbeitungsgeräte (CI (nicht-IKT); CJ–CK)	Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen – ohne IKT Herstellung von elektrischen Ausrüstungen Maschinenbau	Datenverarbeitungsgeräte
Fahrzeuge (CL)	Fahrzeugbau	Fahrzeuge
Waren anderweitig nicht genannt (CA–CC; CH; CM)	Herstellung von Nahrungs- und Genussmitteln, Getränken und Tabakerzeugnissen Herstellung von Textilien, Bekleidung, Leder, Lederwaren und Schuhen Herstellung von Holzwaren, Papier, Pappe und Waren daraus, Herstellung von Druckerzeugnissen Metallerzeugung und -bearbeitung, Herstellung von Metallerzeugnissen Sonstige Herstellung von Waren, Reparatur und Installation von Maschinen und Ausrüstungen	Andere Wirtschaftszweige
Bergbau, Energie und Baugewerbe (B; D–F)	Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden Energieversorgung Wasserversorgung; Abwasser- und Abfallentsorgung und Beseitigung von Umweltverschmutzungen Baugewerbe/Bau	Andere Wirtschaftszweige

IKT (JB; CI, G, JA, JC, S (IKT))	Telekommunikation Herstellung von Datenverarbeitungsgeräten, elektronischen und optischen Erzeugnissen Handel; Instandhaltung und Reparatur von Kraftfahrzeugen Verlagswesen, audiovisuelle Medien und Rundfunk Informationstechnologische und Informationsdienstleistungen Sonstige Dienstleistungen (IKT)	IKT
Handel (G (nicht-IKT))	Handel; Instandhaltung und Reparatur von Kraftfahrzeugen (ohne IKT)	Andere Wirtschaftszweige
Verkehr und Logistik (H)	Verkehr und Lagerei	Andere Wirtschaftszweige
Unternehmensnahe DL (I; J (nicht-IKT); K–N)	Gastgewerbe/Beherbergung und Gastronomie Verlagswesen, audiovisuelle Medien und Rundfunk (ohne IKT) Telekommunikation (ohne IKT) Informationstechnologische und Informationsdienstleistungen (ohne IKT)	Unternehmensnahe Dienstleistungen
Öffentliche DL (O–R; S (nicht-IKT); T)	Öffentliche Verwaltung, Verteidigung; Sozialversicherung Erziehung und Unterricht Gesundheitswesen Heime und Sozialwesen Kunst, Unterhaltung und Erholung Sonstige Dienstleistungen (ohne IKT) Private Haushalte mit Hauspersonal; Herstellung von Waren und Erbringung von Dienstleistungen durch private Haushalte für den Eigenbedarf ohne ausgeprägten Schwerpunkt	Öffentliche Dienstleistungen

<sup>a</sup> Statistische Systematik der Wirtschaftszweige in der Europäischen Gemeinschaft.

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Die Ergebnisse der gesamtwirtschaftlichen Berechnungen zeigen, dass der  $RMC_{Dig}$  im Jahr 2020 zu annähernd 31,1 % durch die Nachfrage privater Haushalte geprägt ist. Weitere 22,7 % entfallen auf die gesamtwirtschaftlichen Bruttoinvestitionen. Betrachtet man den  $RMI_{Dig}$ , der auch den Rohstoffgebrauch für Exporte enthält, erweist sich die Nachfrage nach aus Deutschland exportierten Gütern- und Dienstleistungen (13,6 %) für den gesamten Rohstoffaufwand der Digitalisierung als ähnlich bedeuten wie die Bruttoinvestitionen (13,8 %, Tabelle 41). Die Ergebnisse verdeutlichen einerseits die Bedeutung der privaten Haushalte als (bezogen auf den  $RMC_{Dig}$ ) größten nachfragenden Einzelsektor. Andererseits wird aber auch klar, dass der überwiegende Teil des Rohstoffgebrauchs durch die Digitalisierung auf wirtschaftliche Tätigkeiten inklusive Vorleistungen zurückgeht. Die nachfragenden Wirtschaftsbereiche müssen in der Analyse genau aufgliedert werden. Die klassische Betrachtung nach dem RMC-Konzept (eine Auswertung von „privaten Haushalten + Investitionen + Staatskonsum“) erklärt also nur 54,7 % des gesamten RMC der Digitalisierung in Deutschland. Somit entfallen 45,3 % auf den Vorleistungsbereich der Wirtschaft (Tabelle 41). Diese Zahlen verdeutlichen, wie essenziell es

ist, diesen Vorleistungsbereich zu untersuchen, wenn die Umwelteinflüsse der Digitalisierung betrachtet werden.

**Tabelle 41: Prozentuale Verteilung von RMI und RMC auf die nachfragenden Wirtschaftsbereiche und Vorleistungsbereiche im Jahr 2020**

Nachfragender Wirtschaftsbereich (aggregiert) / Endnachfragekomponente	Anteil am RMI <sup>1</sup> (%)	Anteil am RMC <sup>2</sup> (%)
Vorleistungsnachfrage der Branche Datenverarbeitungsgeräte	24,9	21,2
Konsum der privaten Haushalte	18,9	31,1
Gesamtwirtschaftliche Bruttoinvestitionen	13,8	22,7
Gesamtwirtschaftliche Ausfuhren	13,6	Nicht relevant
Vorleistungsnachfrage sämtlicher anderer Wirtschaftszweige	11,9	10,2
Vorleistungsnachfrage der Branche „Unternehmensnahe Dienstleistungen“	6,6	5,6
Vorleistungsnachfrage des IKT-Sektors	3,5	3,0
Vorleistungsnachfrage öffentlicher Dienstleister	3,4	2,9
Vorleistungsnachfrage des Fahrzeugbaus	2,8	2,4
Staatskonsum	5,3	0,9

Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“ in Anlehnung an OECD (2007), siehe Kapitel 5), 2023

<sup>1</sup> RMI = 157,09 Mt (Siehe Kapitel 5, Abbildung 91)

<sup>2</sup> RMC = 95,41 Mt (Siehe Kapitel 5, Abbildung 85)

In gesamtwirtschaftlichen Szenarien wurden verschiedene mögliche Entwicklungen der Nachfrage privater Haushalte berechnet (siehe Kapitel 6). Das Szenario „*Less and Softer*“ (LaS) nimmt eine Reduktion der Nachfrage privater Haushalte um 20 % an. Dann würde im Jahr 2050 ein Rückgang des RMC<sub>Dig.</sub> um 7,5 %, des RMI<sub>Dig.</sub> um 3,1 % und des CO<sub>2, Dig.</sub>-Fußabdrucks um 7,2 % im Vergleich zum Trendszenario erzielt. Diese Ergebnisse lassen den Rückschluss zu, dass es bei den privaten Haushalten ein Einsparpotenzial gibt.

Der Vorleistungssektor „**Datenverarbeitungsgeräte**“ generierte im Jahr 2020 den höchsten RMI. Unter dem Begriff „Datenverarbeitungsgeräte“ sind allerdings sehr unterschiedliche Wirtschaftsbereiche subsummiert – etwa die Herstellung von elektronischen Bauelementen wie Kondensatoren, von Computern, Telefonen und Fernsehern, aber auch von Radargeräten oder Computertomographen. Aufgrund der makroökonomischen Berechnungen im Forschungsvorhaben DigitalRessourcen ist es nicht möglich, den Beitrag dieser sehr unterschiedlichen Wirtschaftsbereiche trennscharf zu analysieren. Demnach kann auch keine Branche identifiziert werden, an die sich ein konkretes Gestaltungsfeld richtet. Eine weitere Aufschlüsselung des Wirtschaftszweigs „Datenverarbeitungsgeräte“ könnte helfen, besonders wichtige Bereiche zu identifizieren und mit den relevanten Akteuren\* Akteurinnen gezielte Maßnahmen zu entwickeln.

Die beiden nachfragenden Bereiche „Investitionen“ und „Ausfuhren“ verursachten im Jahr 2020 ebenfalls einen beträchtlichen Teil des RMI<sub>Dig.</sub> (Tabelle 41). Beide Bereiche beschreiben Beiträge

von allen anderen Wirtschaftsbereichen, sodass sich auch hier keine zu adressierende Branche identifizieren lässt. Wieder wäre eine höhere Granularität wünschenswert.

### 7.7.1 Gestaltungsmöglichkeiten

In Bezug auf die analysierten **Produktgruppen** lässt sich festhalten, dass speziell für die beiden Produktgruppen Hardware und Telekommunikation eine feinere Aufgliederung in Unterbereiche wünschenswert wäre. Mithilfe dieser höheren Granularität könnten innerhalb der Gruppen die Haupttreiber des Ressourcenbedarfs identifiziert und gezielt angesprochen werden.

Die Nachfrage der privaten Haushalte ist ein wichtiger Treiber für den Ressourcenbedarf der Digitalisierung. Endverbraucher\*innen können den Ressourcenbedarf reduzieren, indem sie ressourcenschonende Geräte nachfragen. Hierzu müssen den Verbraucher\*innen aber Informationen zum Ressourcenbedarf der IKT-Güter und -Dienstleistungen zu Verfügung stehen. Dieses Thema wird im Querschnittsfeld „Datenlage und Transparenz“ vertieft (Kapitel 7.9). Darüber hinaus könnten Verbraucher\*innen weniger IKT-Geräte und -Dienstleistungen konsumieren. Hierauf nimmt das Gestaltungsfeld „Suffizienz“ Bezug (Kapitel 7.8).

Für die Nachfrage, die aus **Vorleistungen** von wirtschaftlichen Tätigkeiten entsteht, können auf Basis der bisherigen Arbeiten keine Gestaltungsmöglichkeiten abgeleitet werden, da die hierfür notwendige Granularität fehlt. Eine weitere Erforschung und Verfeinerung des makroökonomischen Modellsystems, das im Forschungsvorhaben Digital Ressourcen zum Einsatz kommt, könnte hier einen vertieften Einblick und damit die Ableitung von Gestaltungsfeldern ermöglichen. Generell könnte der Ressourcenbedarf jedoch durch den Einsatz von ressourcenschonenden Geräten reduziert werden.

## 7.8 Gestaltungsfeld „Suffizienz“

### 7.8.1 Ausgangslage

Im Zusammenhang mit der Digitalisierung bedeutet Suffizienz, die Nachfrage nach IKT-Gütern und -Dienstleistungen zu reduzieren, gleichzeitig aber weiterhin den Bedarf der Nutzenden zu erfüllen. Zum einen werden dafür Konsumentenscheidungen kritisch hinterfragt („Ist die Anschaffung eines neuen Geräts wirklich notwendig?“). Zum anderen können IKT-Geräte auch dazu dienen, grundsätzlich einen an Suffizienz orientierten Lebensstil zu fördern (Santarius *et al.*, 2022).

Laut Statistischem Bundesamt waren im Jahr 2022 98 % der Haushalte mit einem Mobiltelefon, 92 % mit einem PC und 96 % mit einem Internetzugang ausgestattet (Statistisches Bundesamt, 2022d). Im selben Jahr gab es in jedem zehnten Haushalt ein smartes Energiemanagementsystem und 59 % der Haushalte verfügten über ein Smart-TV (Statistisches Bundesamt, 2022b). Diese hohe Durchdringung der Haushalte mit digitalen Technologien deutet bereits darauf hin, welche wichtige Rolle die privaten Haushalte beim Konsum von IKT-Geräten spielen. Aber auch in Unternehmen ist die Nachfrage nach IKT-Geräten hoch, unter anderem wegen der geringen Nutzungsdauer. So hat das Bundesministerium für Finanzen im Jahr 2022 in einem Schreiben „eine betriebsgewöhnliche Nutzungsdauer von einem Jahr“ für Computerhardware und Software genannt (Bundesministerium für Finanzen, 2022).

Laut einer Umfrage sind Smartphones keine Geräte, die Verbraucher\*innen „spontan mit Nachhaltigkeitsfragen assoziieren“ (Fischer *et al.*, 2019). Dieselbe Studie identifiziert jedoch Kriterien wie längere Nutzungsdauer, Reparaturfähigkeit und faire Produktion als teilweise wichtig für die Kaufentscheidung. Hauptkriterien beim Kauf von IKT-Geräten waren im Jahr



2022 der Preis sowie die Kapazität von Festplatte, Speicher und Prozessor. Für lediglich ein Fünftel der Befragten war Energieeffizienz ein Kriterium und weniger als ein Zehntel betrachtete das Ökodesign als relevant (Statistisches Bundesamt, 2022a). In einer Studie zu den Auswirkungen von IKT auf umweltpolitische Ziele wurde an zwei Beispielsystemen aus dem Verkehrsbereich untersucht, welche Kriterien Unternehmen bei der Auswahl von IKT-Systemen zugrunde legen. Die Autoren\*Autorinnen kommen zu dem Schluss, dass Nachhaltigkeitsaspekte bei der Systemauswahl kaum eine Rolle spielen (Baischew *et al.*, 2022).

Aus diesen Beispielen geht hervor, dass sowohl bei privaten Nutzenden als auch bei Unternehmen der Aspekt Nachhaltigkeit die Konsum- und Kaufentscheidungen nicht maßgeblich beeinflusst. Um Nachhaltigkeit im Sinne der Effizienz, Konsistenz und Suffizienz als Kriterium zu etablieren, benötigen Nutzende einerseits Informationen – hierzu sind Anregungen im Querschnittsfeld Datenlage zusammengefasst – und andererseits Aufklärung – hierauf liegt der Schwerpunkt dieses Gestaltungsfelds.

**Tabelle 42: Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Suffizienz“**

Beschreibung des Gestaltungsfelds	Erkenntnisse aus den Fallstudien	Erkenntnisse aus der makroökonomischen Analyse
<p><b>Ausgangslage:</b> Suffizienz als Teil einer Strategie zur nachhaltigen Nutzung von IKT-Gütern und -Dienstleistungen ist nicht im Fokus. Umweltfolgen sind nicht im Bewusstsein der Nutzenden. Es gibt zu wenig Informationen und Aufklärung für nachhaltige Konsum-, Kauf- und Nutzungsentscheidungen.</p> <p><b>Zielsetzung:</b> Bereitstellung von Informationen Aufklärung für Nutzende</p>	<p>Allgemeine Recherche: IKT-Geräte haben kurze Nutzungsdauern. Kleine und multifunktionale Geräte verringern den Ressourcenbedarf („digitale Medien“). Digitale Anwendungen ermöglichen eine gemeinsame Nutzung oder die Weiterverwendung von Produkten; hier liegt ein hohes Potenzial für Ressourceneinsparungen im Sinne von Suffizienz („Carsharing“, „C2C-Plattform“).</p>	<p>Der Sektor „private Haushalte“ ist der wichtigste Einzelsektor mit Bezug auf den Rohstoffbedarf. Makroökonomisches Simulationsszenario „Less and Softer“ zeigt Abnahme von RMC und CO2-Fußabdruck.</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

**Tabelle 43: Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Suffizienz“**

Beispiele für Maßnahmen		
<p><b>Politisch – weitere:</b> Verbrauchenden-Dialog für umweltfreundlichen Alltag Nachhaltigkeitsbildung in den Lehrplänen von Schulen verankern</p>	<p><b>Verbraucher*innen:</b> Konsum- und Kaufentscheidungen kritisch hinterfragen Möglichkeiten der Digitalisierung zur Umsetzung eines nachhaltigen Lebensstils nutzen</p> <p><b>Unternehmen:</b> Konsum- und Kaufentscheidungen im Unternehmen kritisch hinterfragen Reparierbare Geräte (Ökodesign) und Reparaturservices anbieten und nutzen Vermehrt Geräte und Verträge anbieten, die nachhaltigere Nutzung (beispielsweise geringere Datennutzung, längere Nutzungsdauer) incentivieren</p>	<p><b>Forschungsbedarfe:</b> Erforschung von Hindernissen und Lösungsansätzen für suffizientes Verhalten Neudefinition des Wohlstandsverständnisses und Gesellschaftsmodells Förderung durch Geschäftsmodelle und politische Rahmenbedingungen</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### Einblicke in die Ressourcenintensität der Digitalisierung: Ergebnisse aus dem Vorhaben

Bei der Analyse der Fallstudien zur Lebensdauer von IKT-Geräten ergaben sich Nutzungsdauern zwischen zwei und vier Jahren im privaten Bereich (siehe Kapitel 7.2.1). Diese Zahlen weisen auf die Möglichkeit von mehr Suffizienz durch längere Nutzung hin.

Die Anwendungsfälle „Carsharing“ und „C2C-Plattform“ ermöglichen den Verbraucher\*innen einen an Suffizienz ausgerichteten Lebensstil: indem diese auf ein eigenes Auto verzichten und gebrauchte Produkte kaufen. Allerdings besteht bei diesen Anwendungen die Gefahr eines Rebound-Effekts.

Der Vergleich verschiedener Endgeräte zur Nutzung für denselben Zweck ergab, dass der Einsatz kleiner, multifunktionaler IKT-Geräte den Ressourcenbedarf reduzieren kann („digitale Medien“). Im Sinne der Suffizienz kann also empfohlen werden, wenige IKT-Geräte zu vielen Zwecken zu nutzen.

Ein Ergebnis der gesamtwirtschaftlichen Berechnung im Rahmen des Forschungsvorhabens lautet: Der private Konsum machte im Jahr 2020 mehr als 30 % und die Gesamtheit der unternehmerischen Tätigkeiten annähernd 70 % des gesamten Rohstoffkonsums des IKT-Sektors aus (siehe Kapitel 5 und Kapitel 6). Somit haben private genau wie unternehmerische Kaufentscheidungen eine signifikante Bedeutung im Sinne der Nachhaltigkeit.

Eines der berechneten gesamtwirtschaftlichen Szenarien nimmt eine **20-prozentige Abnahme** der privaten Nachfrage nach IKT-Geräten und -Dienstleistungen an. Es kann somit als „privates Suffizienz-Szenario“ interpretiert werden. Die Berechnungen ergeben eine Abnahme des Rohstoffkonsums ( $RMC_{Dig.}$ ) um 7,5 % im Jahr 2050 im Vergleich zur Trendfortschreibung. Diese Ergebnisse weisen darauf hin, dass Suffizienz das Potenzial für Ressourceneinsparungen bietet.

## 7.8.2 Gestaltungsmöglichkeiten

### 7.8.2.1 Politische Maßnahmen

Ein Umdenken in Richtung eines nachhaltigen Konsums setzt einen von der Politik angestoßenen, breit angelegten Verbrauchenden-Dialog voraus, um das Bewusstsein für einfache Handlungsmöglichkeiten in einem umweltfreundlichen Alltag zu schaffen. Hierbei dient das im Jahr 2016 beschlossene Nationale Programm für nachhaltigen Konsum (NPNK) als Initiator. Das Programm umfasst sechs verschiedene Konsumbereiche und empfiehlt übergreifende Handlungsansätze in den Sektoren Bildung, Verbraucher\*innen Information und Forschung. Darüber hinaus wäre eine Verankerung des Themas Nachhaltigkeit inklusive der Strategien Effizienz, Konsistenz und Suffizienz in den Lehrplänen von Schulen wünschenswert.

### 7.8.2.2 Verbraucher\*innen

Suffizienz ist definiert als „eine Strategie zur relativen oder absoluten Senkung der Ressourceninanspruchnahme durch Verringerung der Nachfrage nach Gütern und Dienstleistungen“ (Kosmol *et al.*, 2012). In diesem Sinne sollten Verbraucher\*innen ihre Konsumententscheidungen kritisch hinterfragen. Beispiele für Fragen sind:

Erfüllt das neue Gerät einen Zweck, den ein bestehendes Gerät nicht erfüllen kann?

Ist das bestehende Gerät – eventuell durch Reparatur – noch länger nutzbar?

Kann ich das Gerät auch gebraucht kaufen?

Muss ich das anzuschaffende Gerät selbst besitzen oder kann ich es gemeinsam nutzen?

Die letzten beiden Fragen deuten bereits darauf hin, dass Verbraucher\*innen die Digitalisierung auch nutzen können, um einen an Suffizienz orientierten Lebensstil zu entwickeln. So können digitale Anwendungen den Zugriff auf gebrauchte oder geteilte Geräte erleichtern.

### 7.8.2.3 Unternehmen

Ebenso wie private Verbraucher\*innen sind auch Unternehmen gefordert, ihre Konsumententscheidungen zu hinterfragen. Darüber hinaus haben Unternehmen die Möglichkeit, von ihnen produzierte IKT-Geräte langlebiger und reparierbar zu gestalten oder solche Geräte selbst zu kaufen. Neue Geschäftsmodelle wie das Leasing anstelle des direkten Kaufs eines Autos und Product-Service-Systems fördern die Langlebigkeit von Produkten, verändern Konsumgewohnheiten und verringern durch Reparaturservices den Rohstoffgebrauch im Sinne der Suffizienz. Außerdem können Unternehmen vermehrt Geräte und Verträge anbieten, die eine nachhaltigere Nutzung incentivieren. So könnte beim Abschluss eines neuen Mobilfunkvertrags alternativ zum neuen Mobiltelefon ein gebrauchtes (*refurbished*) Gerät angeboten werden.

### 7.8.2.4 Forschungsbedarfe

**Erforschung von Hindernissen und Lösungsansätzen für suffizientes Verhalten:** Es bedarf weiterer Forschung, um die individuellen, gesellschaftlichen und politischen Hemmnisse zu identifizieren, die dem Übergang zu suffizientem Verhalten und einem Ressourcenbedarf im Einklang mit den natürlichen Grenzen entgegenwirken. Zukünftige Forschung sollte sich darauf konzentrieren, wirksame Methoden zu ermitteln, mit denen sich Erkenntnisse und Verhaltensweisen für Suffizienz breiten Bevölkerungsschichten vermitteln lassen. Soziale, kulturelle und psychologische Aspekte sind zu berücksichtigen, um Verhalten erfolgreich zu ändern.

**Neugestaltung des Wohlstandsverständnisses und Gesellschaftsmodells:** Notwendig sind Strategien dafür, das derzeitige Verständnis von Wohlstand zu transformieren, damit suffizientes Handeln und ein ressourcenschonender Lebensstil Wertschätzung erfahren. Diese Forschung sollte auch die ökonomischen und sozialen Konsequenzen von suffizientem Handeln in verschiedenen Kontexten vertieft untersuchen. Das Ziel wäre ein umfassendes Verständnis der Auswirkungen auf Wirtschaftsstrukturen, Arbeitsmärkte und das langfristige Wachstumspotenzial.

**Förderung durch Geschäftsmodelle und politische Rahmenbedingungen:** Zukünftige Forschungsvorhaben sollten Geschäftsmodelle identifizieren, die Unternehmen zur Entwicklung von Produkten und Dienstleistungen mit geringerem Ressourcenbedarf ermutigen. Diese Forschung sollte die Wirksamkeit solcher Modelle in Bezug auf Nachhaltigkeit und Rentabilität bewerten. Damit einhergehend sind politische Rahmenbedingungen notwendig, die ein nachhaltiges Leben und Wirtschaften fördern. Dies erfordert rechtliche, finanzielle und informationsbasierte Ansätze, mit denen sich Hindernisse für suffiziente Praktiken überwinden lassen und die deren Umsetzung erleichtern.

## 7.9 Querschnittsfeld „Datenlage und Transparenz“

### 7.9.1 Ausgangslage

Die Ressourcenintensität der Digitalisierung lässt sich bisher nur mit Unsicherheiten berechnen. Dies hängt unter anderem mit der mangelnden Verfügbarkeit aktueller Daten zum Ressourcengebrauch von IKT-Geräten und Dienstleistungen zusammen. So sind z. B. wenig Informationen zu ökologischen Fußabdrücken verfügbar – und die vorhandenen Informationen sind nicht standardisiert. Vor allem zur Ressourcenintensität von Rechenzentren und zum Stromverbrauch der Internetnutzung fehlen Daten. Daneben mangelt es an einem geeigneten Bewertungssystem zur Kritikalität von Rohstoffen, auch in Bezug auf Fragen der „sozialen und ökologischen Folgen der Rohstoffgewinnung“ (Dehoust *et al.*, 2020).

Der Fokus im Querschnittsfeld „Datenlage und Transparenz“ liegt auf der Vereinheitlichung von Berechnungs- und Bewertungsmethoden. Dazu gehören auch grundsätzlich die Verbesserung der Datenlage sowie die Veröffentlichung und Bereitstellung dieser Informationen. Dieses Gestaltungsfeld gilt als Querschnittsfeld, weil eine bessere Datenverfügbarkeit positive Auswirkungen auf alle Bereiche der Digitalisierung sowie auf alle bisher identifizierten Gestaltungsfelder hätte.

Um nachhaltige Kaufentscheidungen treffen zu können, müssen den Verbraucher\*innen aufbereitete Informationen z. B. zu Konfliktmineralien, zum ökologischen Fußabdruck von IKT-Geräten oder zum Energieverbrauch von Software zur Verfügung stehen. Doch aktuell geben nur vereinzelte Hersteller diese Informationen heraus. Eine informierte Kaufentscheidung zugunsten umweltfreundlicherer Geräte ist also gar nicht oder nur mit hohem Aufwand möglich. „Daher ist es für den Konsumenten mit hohen Transaktionskosten verbunden, seinen Konsum informiert und umweltverträglich zu gestalten“ (Kahlenborn *et al.*, 2018). Beim Einrichten und Nutzen von IKT-Geräten werden Verbraucher\*innen meist nicht an prominenter Stelle über energiesparende Einstellungen informiert. Mobilfunkverträge mit „Datenflat“ incentivieren mobiles Surfen, das deutlich mehr Energie verbraucht als das Surfen im LAN oder WLAN.

**Tabelle 44: Kurzbeschreibung des Querschnittsfelds „Datenlage und Transparenz“**

Beschreibung des Gestaltungsfelds	Erkenntnisse aus den Fallstudien	Erkenntnisse aus der makroökonomischen Analyse
<p><b>Ausgangslage:</b>                      Wenig Informationen zum ökologischen Fußabdruck                      Vorhandene Informationen nicht standardisiert                      Kein geeignetes Bewertungssystem zur Kritikalität von Rohstoffen                      Keine robusten und aktuellen Daten zu Rechenzentren                      Mangelhafte Datenlage zum Energiebedarf der Internetnutzung</p> <p><b>Zielsetzung:</b>                      Verbesserung der Datenlage                      Vereinheitlichung der Berechnungsmethoden</p>	<p>Datensätze zur Digitalisierung in LCI-Datenbanken sind schnell überholt und zum Teil lückenhaft. LCI-Datenbanken können mit technischem Fortschritt nicht immer mithalten.                      Modellierungen hängen stark von Angaben zu Stromquellen ab.                      Dokumentation der Stromquellen ist nicht standardisiert („Kryptowährung“).                      Datenlage für Rechenzentren ist nicht eindeutig.                      Große Varianz der Fußabdrücke nach Hersteller/Anbieter.                      Hersteller selbst geben meist keine Informationen heraus.</p>	<p>Berechnungsmethoden des Ressourcenbedarfs sind nicht einheitlich.                      Keine Festlegung und Definition von Indikatoren für Umwelteinflüsse (Fußabdruck-Indikatoren können nicht summiert werden).</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

**Tabelle 45: Maßnahmenbeispiele des Querschnittsfelds „Datenlage und Transparenz“**

Beispiele für Maßnahmen		
<p><b>Politisch – bereits angestoßen:</b>                      Dateninstitut (Datenstrategie der Bundesregierung) nutzen                      Förderung der Methodenentwicklung zur Messung und Evaluierung von Energie- und Ressourceneffizienz</p> <p><b>Politisch – weitere:</b>                      Standardisierte Schnittstellen einfordern, um Daten verfügbar zu machen                      Verbesserte Dateninfrastruktur erforschen (Daten-Reallabore)</p>	<p><b>Verbraucher*innen:</b>                      Private Daten von Endnutzenden und Unternehmen als Datengrundlage für eine wirksame Nachhaltigkeitspolitik</p> <p><b>Unternehmen:</b>                      Bereitstellung relevanter Daten zum ökologischen Fußabdruck von Geräten und Dienstleistungen                      Zertifizierung von Geräten über den „Blauen Engel“                      Informationen zu energiesparenden Einstellungen von IKT-Geräten gut sichtbar bereitstellen</p>	<p><b>Forschungsbedarfe:</b>                      Durchführung umfangreicher Datenrecherchen zu Identifizierung von Datenlücken                      Gewährleistung von Datenkonsistenz durch einheitliche Messgrößen und Methoden                      Durchführung von Langzeitstudien</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

**Einblicke in die Ressourcenintensität der Digitalisierung: Ergebnisse aus dem Vorhaben**

Bei der Analyse der Fallstudien waren umfangreiche Datenrecherchen notwendig, um den Ressourcengebrauch und die THG-Emissionen der Anwendungsfälle zu bilanzieren. In allen Bereichen wurden Datenlücken festgestellt. Die LCI-Datenbanken können häufig mit der schnellen Entwicklung der Digitalisierung **nicht mithalten** (z. B. fehlen Daten zu Mining-Rechnern – Fallstudie „Kryptowährung“). Die Mängel der genutzten LCI-Datenbank werden in einem separaten Dokument „Anhang: Digitalisierung und natürliche Ressourcen – Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023b) erörtert. Insbesondere zum Energiebedarf der Internetnutzung gibt es keine eindeutigen und häufig

veraltete Daten (Fallstudie „Videokonferenz“). Die Dokumentation von Stromquellen ist nicht standardisiert, sodass eine Berechnung des Fußabdrucks mit großen Unsicherheiten behaftet ist. Dies gilt vor allem, wenn im Ausland erbrachte Leistungen einbezogen werden müssen (Fallstudie „Kryptowährung“).

Um anhand von Daten zu Umweltindikatoren einzelner Güter und Dienstleistungen eine gesamtwirtschaftliche Aussage treffen zu können, müssten diese nach dem „*Bottom-up*“-Prinzip generierten Daten aufsummiert werden. Dies ist aber nicht möglich, da keine einheitlichen Indikatoren und Berechnungsmethoden für IKT-Güter und -Dienstleistungen definiert sind. Außerdem sind Unternehmen nicht verpflichtet, entsprechende Informationen herauszugeben. Demnach ist eine gesamtwirtschaftliche Betrachtung nach dem „*Bottom-up*“-Ansatz nicht möglich. Die nach dem „*Top-down*“-Prinzip durchgeführte gesamtwirtschaftliche Berechnung im Rahmen des Forschungsvorhabens stützt sich auf statistische Daten zur Volkswirtschaft, aggregiert in Wirtschaftssektoren. Für eine tiefergehende Analyse sind die Wirtschaftssektoren aber teilweise nicht genau genug aufgegliedert. Darüber hinaus sind auch die Rohstoffkategorien in der gesamtwirtschaftlichen Berechnung aggregiert. Eine direkte Aussage zu den als besonders digitalisierungsrelevant identifizierten Rohstoffen ist somit nicht möglich.

## 7.9.2 Gestaltungsmöglichkeiten

### 7.9.2.1 Politische Maßnahmen

Die Methodenentwicklung zur Messung und Evaluierung der Energie- und Ressourceneffizienz von Daten, Software und IKT-Geräten sollte gefördert werden (Umweltbundesamt, 2019a). Als Unterstützung für mehr Ressourceneffizienz im Bereich Daten sollte das in der Datenstrategie der Bundesregierung geplante neue Dateninstitut herangezogen werden (BMWK, 2023b). Das Dateninstitut wird dazu dienen, das Datenökosystem zu koordinieren und über Sektorengrenzen hinweg zu vernetzen. Es soll auf bereits existierenden Initiativen im Datenbereich aufsetzen und diese miteinander verbinden sowie neue, sektorübergreifende Projekte für mehr Innovationen initiieren.

Um eine verbesserte technische Dateninfrastruktur zu erforschen, sind standardisierte Schnittstellen nötig. Sie sollten von der Digitalpolitik eingefordert werden, um Interoperabilität zu sichern, Daten verfügbar zu machen und eine Steuerung zu ermöglichen. Dies könnte zum Beispiel durch das Errichten neuer Daten-Reallabore in der Praxis erprobt werden und für einen schnellen Transfer in den Markt sorgen.

### 7.9.2.2 Verbraucher\*innen

Es besteht ein Spannungsfeld zwischen Datenschutz und dem begründeten öffentlichen Interesse an der Nutzung privater und unternehmerischer Daten zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Hier ist die Mitarbeit von Verbraucher\*innen unerlässlich. In der Fallstudie „Smart-Home-Systeme“ (siehe Kapitel 4.3.2) beispielsweise werden Bewegungsdaten für nachhaltige Mobilitätskonzepte genutzt; „*Smart Meter*“ erheben aktuelle Daten zum Stromverbrauch, mit deren Hilfe Stromangebot und -nachfrage aufeinander abgestimmt werden. Diese Systeme fußen auf Daten aus privaten Haushalten, deren berechnete Datenschutzinteressen mit der Nutzung der Daten in Einklang zu bringen sind. „Zielgerichtete und zweckgebundene Pflichten zur Datenherausgabe sind vor dem Hintergrund der Bedeutung einer ausreichenden Datengrundlage für eine wirksame Nachhaltigkeitspolitik hingegen grundsätzlich gut begründbar“ (Franke & Gailhofer 2022).

### 7.9.2.3 Unternehmen

Unternehmen können deutlich zur Verbesserung der Datenlage beitragen, indem sie ökologische Fußabdrücke ihrer Geräte nach anerkannten Standards berechnen und diese bei der Markteinführung der Geräte veröffentlichen (Niemeyer *et al.*, 2022). Insbesondere die Betreiber\*innen von Rechenzentren können Daten aufbereiten und zur Verfügung stellen, um weitere Effizienzsteigerungen zu ermöglichen. Auch die Zertifizierung mit dem „Blauen Engel“, unter anderem für Software und Rechenzentren, trägt zur Transparenz bei. Darüber hinaus gibt es bereits Vorschläge für ein Kennzahlensystem zur Unterstützung nachhaltiger Konsumententscheidungen, z. B. für Smartphones (Beckmann *et al.*, 2019). Unternehmen können an der Weiterentwicklung solcher Systeme mitwirken und ihre Produkte entsprechend kennzeichnen.

### 7.9.2.4 Forschungsbedarfe

**Identifizierung von Datenlücken:** Zunächst sollten umfangreiche Datenrecherchen erfolgen, damit vorhandene Datenlücken identifiziert und geschlossen werden können. Eine detaillierte Analyse der Datenquellen und -methoden ist essenziell, um eine fundierte Datenerhebung zum Ressourcenbedarf digitaler Geräte durchführen zu können. Dies umfasst die Identifizierung von Bereichen, in denen Daten fehlen oder unvollständig sind. Dazu gehören ökologische Fußabdrücke und der Ressourcenbedarf von IKT-Gütern und -Dienstleistungen.

**Datenkonsistenz:** Darauf aufbauend sollten zukünftige Forschungsprojekte die Entwicklung einheitlicher Messgrößen, Indikatoren und Berechnungsmethoden vorantreiben. Dies kann die Vergleichbarkeit und Konsistenz der erhobenen Daten gewährleisten. Forschungsvorhaben sollten innovative Analysemethoden und Modelle entwickeln, um den Ressourcenaufwand digitaler Geräte besser verstehen und quantifizieren zu können. Dies könnte u. a. die Nutzung von „Big-Data-Analysen“ und „Machine Learning“ umfassen, damit Muster und Zusammenhänge in den Daten identifiziert werden. Auf dieser Basis ist die Entwicklung und Implementierung von einheitlichen Standards und Richtlinien von Datenquellen und -methoden zielführend. Normen und Standards könnten die Konsistenz der erhobenen Daten gewährleisten. Diesbezüglich ist die Zusammenarbeit zwischen relevanten Interessengruppen wie z. B. Regierungsbehörden, Industrieverbänden und Forschungseinrichtungen notwendig: für einen leichteren Zugang zu den Daten, mehr Informationsaustausch und eine umfassende(re) Datengrundlage.

**Langzeitstudien:** Es wäre gemeinhin ratsam, Langzeitstudien zu initiieren, die die Veränderungen im Ressourcenbedarf digitaler Geräte im Laufe der Zeit verfolgen. Dies würde eine kontinuierliche Überwachung und Bewertung der Fortschritte bei der Ressourceneffizienz ermöglichen und helfen, langfristige Trends und Herausforderungen aufzudecken.

## 7.10 Gestaltungsfeld „Folgenabschätzung“

### 7.10.1 Ausgangslage

Digitale Neuerfindungen und Trends werden häufig als „nachhaltig“ beworben. Teilweise haben sie jedoch selbst einen hohen ökologischen Fußabdruck, der das eigentliche Umweltentlastungspotenzial mindert.

Die Folgenabschätzung digitaler Trends ist ein wichtiger Schritt, der hilft, mögliche Auswirkungen auf den ökologischen Fußabdruck digitaler Anwendungen zu erkennen und zu verstehen. Durch die Analyse von Studien und Forschungsprojekten können potenzielle Umweltwirkungen identifiziert werden, was die Grundlage für Maßnahmen zur Reduzierung des ökologischen Fußabdrucks bildet.

Ein systematisches Monitoring durch Bundesministerien, Forschungseinrichtungen und statistische Ämter hilft dabei, den Fortschritt und die Auswirkungen der Digitalisierung in Deutschland zu verfolgen, um daraus Erkenntnisse zu gewinnen und gegebenenfalls Maßnahmen zur Verbesserung oder Steuerung der digitalen Transformation abzuleiten (BMDV, 2022). Ziel ist es, das Problembewusstsein zu schärfen und Handlungsoptionen zu identifizieren.

**Tabelle 46: Kurzbeschreibung des Gestaltungsfelds „Folgenabschätzung“**

Beschreibung des Gestaltungsfelds	Erkenntnisse aus den Fallstudien	Erkenntnisse aus der makroökonomischen Analyse
<p><b>Ausgangslage:</b> Digitale Neuerfindungen und Trends werden häufig als „nachhaltig“ beworben. Der hohe ökologische Fußabdruck wird nicht berücksichtigt.</p> <p><b>Zielsetzung:</b> Mitbetrachtung des ökologischen Fußabdrucks bei der Einführung von neuen digitalen Geräten und Technologien Systematisches Monitoring dieser Entwicklungen</p>	<p>Vermeintlich nachhaltige Trends mit wenig positiven Effekten zur Entlastung der Umwelt („Smart-Home-System“, „Kryptowährung“) Großes Potenzial für <i>E-Grocery</i> durch effektivere Lagerhaltung („<i>E-Grocery</i>“) Anwendungsfälle häufig nur Komfortsteigerung / Hobby ohne Umweltentlastung („Smart-Home-System“, „3D-Druck“, „E-Sports“, „E-Health“, „Kryptowährung“) <i>Foresight</i>-Studien: konkrete Aussagen zu Trends nur teilweise vorhanden</p>	<p>Verlagerung der IKT-Produktion in den asiatischen Raum Zunahme der deutschen Verwendung und Nachfrage von Dienstleistungen und von Hardware</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

**Tabelle 47: Maßnahmenbeispiele des Gestaltungsfelds „Folgenabschätzung“**

Beispiele für Maßnahmen		
<p><b>Politisch – bereits angestoßen:</b> Bewusstsein für offene und transparente Ausgestaltung von IT-Systemen, offene Schnittstellen, tragfähige Open-Data-Konzepte</p> <p><b>Politisch – weitere:</b> Digitales Nachhaltigkeitsgesetz einführen</p>	<p><b>Verbraucher*innen:</b> Konsum-, Kauf- und Nutzungsentscheidungen kritisch hinterfragen</p> <p><b>Unternehmen:</b> Nachhaltigkeitsstrategien implementieren Lebenszyklusanalyse Transparenz und Kommunikation Investition in nachhaltige Geräte</p>	<p><b>Forschungsbedarfe:</b> Entwicklung geeigneter Bewertungsmethoden Integration von Externalitäten Umweltentlastungspotenzial identifizieren</p>

Quelle: Eigene Darstellung (Fraunhofer IAIS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

### Einblicke in die Ressourcenintensität der Digitalisierung: Ergebnisse aus dem Vorhaben

Digitale Trends, etwa Smart-Home und Kryptowährung, versprechen unter anderem eine geringere Umweltbelastung. Allerdings zeigen die Ergebnisse der analysierten Fallstudien, dass diese vermeintlich nachhaltigen Trends die Umwelt kaum entlasten. Hohe Energieverbräuche und viel Elektroschrott sind die Nachteile der als fortschrittlich und teils nachhaltig vermarkteten Trends. Ein Umweltentlastungspotenzial ist lediglich den Fallstudien „Videokonferenz“, „digitale Medien“, „*E-Grocery*“, „Carsharing“ und „*Consumer-to-Consumer*-



Plattformen“ zuzuschreiben, wobei in den vier letzten der fünf Beispiele eine Rebound-Gefahr besteht. Mit Folgenabschätzungen könnten Rebound-Effekte digitaler Anwendungen frühzeitig identifiziert und verhindert werden. Einige Anwendungen, wie etwa in den Fallstudien „Smart-Home“, „3D-Druck“, „E-Sports“, „E-Health“ und „Kryptowährungen“, können dazu beitragen, Barrieren abzubauen und durch Alarmsysteme die Sicherheit zu erhöhen. Einige von ihnen dienen jedoch in vielen Fällen lediglich der Steigerung des Komforts, einem Hobby oder einer an sich neuen Anwendung bzw. Funktion. Insbesondere in diesen Fällen sollte mit dem Ziel von weniger Umweltbelastungen eine Folgenabschätzung vorgenommen werden. Mit der Nachfrage nach umweltfreundlichen Technologien könnten die Hersteller\*innen angeregt werden, ihre Produktion nachhaltiger und transparenter gestalten. Die fortschreitende Verlagerung der Produktion von IKT-Gütern ins Ausland stellt eine zusätzliche Herausforderung für Überwachung und Transparenz dar. Deshalb ist eine umfassende globale Folgenabschätzung erforderlich. Zwar sind IKT-Dienstleistungen oft ressourceneffizienter als die Produktion von Hardware. Dennoch kann die stetige Verlagerung der Nachfrage von IKT-Hardware auf IKT-Dienstleistungen dazu führen, dass Datenzentren stärker genutzt werden und die Energieintensität der digitalen Infrastruktur steigt, sodass auch negative Umweltwirkungen auftreten.

Zur Identifikation und Einordnung der Fallstudien wurden Recherchen und Analysen mit **Foresight-Studien** durchgeführt. Dabei waren klare, quantifizierbare Aussagen zur Trendentwicklung sehr selten. Umweltwirkungen der Trends wurden in der Regel nicht berücksichtigt. Mit dem Ziel klarerer Aussagen über zukünftige Entwicklungen wäre es sinnvoll, dedizierte Studien zu Umweltwirkungen von aufkommenden Trends durchzuführen.

Für die gesamtwirtschaftliche Berechnung waren die verfügbaren *Foresight*-Studien nicht nutzbar, da sie in der Regel auf einzelne Technologien abzielen und die gesamtwirtschaftliche Perspektive außer Acht lassen. Umfassendere *Foresight*-Studien in Zusammenarbeit mit makroökonomischen Experten\*Expertinnen sowie weiteren Fachleuten (Ingenieur\*innen, Betriebswirt\*innen etc.) wären wünschenswert. Sie könnten die für makroökonomische Simulationen benötigten Informationen bereitstellen. Dazu gehören z. B. Substitutionseffekte durch die Einführung neuer Technologien sowie durch die dafür benötigten Investitionen. Somit wäre eine umfassendere Abschätzung der Folgen von neuen Technologien und Anwendungen möglich.

## 7.10.2 Gestaltungsmöglichkeiten

### 7.10.2.1 Politische Maßnahmen

Die Digitalpolitik muss sich darüber im Klaren sein, wie wichtig eine offene und transparente Ausgestaltung von IT-Systemen, offene Schnittstellen sowie tragfähige *Open-Data*-Konzepte sind. Der Umsetzungsstand der im Koalitionsvertrag vereinbarten digitalpolitischen Vorhaben (Bundesregierung, 2021b) sollte daher fortlaufend kritisch bewertet und ggf. nachgebessert werden.

Zudem braucht es eine gesetzliche Grundlage, auf der Daten über den Energie- und Ressourcenbedarf der digitalen Infrastrukturen einheitlich erfasst werden. Das im Juni 2023 vorgeschlagene Klimaschutzgesetz sowie das Klimaschutzprogramm nennen den Klimaschutz durch Digitalisierung als zentrales Zukunftsthema (BMWK, 2023c). Auch hier sollte die ressourceneffiziente Digitalisierung in den Fokus rücken. Alternativ könnte die Entwicklung eines neuen digitalen Nachhaltigkeitsgesetzes dies leisten.

### 7.10.2.2 Verbraucher\*innen

Auch Verbraucher\*innen können die Folgen digitaler Trends abschätzen, indem sie den Nutzen und die Auswirkungen digitaler Anwendungen kritisch hinterfragen und sich über die aktuellen Trends und deren Umweltwirkungen informieren (Lell *et al.*, 2020). Wenn Verbraucher\*innen bewusste Entscheidungen treffen und ihre Gewohnheiten überdenken, können sie einen positiven Einfluss auf die Umweltwirkungen digitaler Trends nehmen und einen Beitrag zu einer nachhaltigen digitalen Entwicklung leisten. Allerdings brauchen Verbraucher\*innen aufbereitete Informationen zu IKT-Geräten und -Dienstleistungen, um bewusste Entscheidungen treffen zu können (vgl. Kapitel 7.8).

### 7.10.2.3 Unternehmen

Wenn Unternehmen Folgenabschätzungen für digitale Anwendungen in ihre Geschäftsstrategie integrieren, können sie aktiv zur Nachhaltigkeit und zur Reduzierung der Umweltwirkungen beitragen. Beispielsweise kann eine Nachhaltigkeitsstrategie die Umweltwirkungen digitaler Anwendungen berücksichtigen (RENN.west, 2021).

Unternehmen können transparent über die Folgen ihrer digitalen Anwendungen kommunizieren und den Verbraucher\*innen die Folgenabschätzung der IKT-Nutzung vereinfachen. Dazu müssten sie beispielsweise Informationen über den Energieverbrauch, den CO<sub>2</sub>-Fußabdruck und die verbauten Rohstoffe bereitstellen, etwa in Form eines Umweltzeichens wie der „Blaue Engel“ (Naumann *et al.*, 2021).

### 7.10.2.4 Forschungsbedarfe

**Entwicklung geeigneter Bewertungsmethoden:** Für die vollumfängliche Bewertung des tatsächlichen Ressourcenbedarfs digitaler Technologien sind zukünftig weitere geeignete Bewertungsmethoden zu entwickeln. Beispielsweise könnten traditionelle Methoden zur Lebenszyklusanalyse angepasst und um die spezifischen Merkmale digitaler Technologien erweitert werden. Dazu gehören etwa der Energiebedarf entlang der Wertschöpfungskette (Server, Rechenzentren usw.) und die Auswirkungen von Elektroschrott. Forschungsprojekte sollten die Entwicklung und Validierung solcher Methoden in den Blickpunkt nehmen.

**Integration von Externalitäten:** Die Folgenabschätzung des Ressourcenbedarfs digitaler Geräte und Dienstleistungen sollte über den reinen Energie- und Materialverbrauch hinausgehen. Sie sollte auch externe Effekte wie die Auswirkungen auf die Biodiversität, den Wasser- und Landverbrauch sowie soziale Aspekte berücksichtigen. Es ist erforderlich, ganzheitliche Bewertungsansätze zu entwickeln, die diese Externalitäten angemessen erfassen und in etwaige Entscheidungsfindungen integrieren.

**Umweltentlastungspotenzial identifizieren:** Wichtig ist die gezielte Suche nach digitalen Dienstleistungen und Anwendungen, die tatsächlich ein signifikantes Umweltentlastungspotenzial aufweisen. Dies erfordert dedizierte Studien, die einen Vergleich mit herkömmlichen nicht digitalen Alternativen durchführen, die positiven Effekte auf die Umwelt quantifizieren und damit auch Nutzungsanreize schaffen.

## 7.11 Zusammenfassung (Zwischenfazit)

In den vorangegangenen Abschnitten des Kapitels 7 wurden Gestaltungsfelder aufgezeigt, die Hebel zur nachhaltigeren Gestaltung der Digitalisierung bieten: durch die effizientere Nutzung von Ressourcen, die Senkung der Energiebedarfe und Treibhausgasemissionen sowie die Minderung von Umwelteinflüssen.

Die Umwelteinflüsse der Digitalisierung sind sehr umfangreich und betreffen die gesamte Gesellschaft. Deshalb müssen bei der dringend notwendigen nachhaltigen Ausgestaltung und Entwicklung der Digitalisierung alle relevanten Akteure\*Akteurinnen einbezogen werden und Beiträge leisten. Aus diesem Grund können die hier beispielhaft genannten Maßnahmen nur Anregungen sein. Ein **Stakeholder-Dialog** mit relevanten Akteuren\*Akteurinnen sollte die tatsächliche Ausgestaltung sowie die Bewertung von Effizienz und Umsetzbarkeit dieser und weiterer Maßnahmen diskutieren, erweitern, konkretisieren und auf ihre Wirksamkeit hin prüfen. Dies war nicht Aufgabe dieses Forschungsvorhabens und könnte ggf. in einem Folgevorhaben geschehen.

Zusammenfassend erscheinen die folgenden Punkte besonders relevant für eine nachhaltiger gestaltete Digitalisierung:

Die Lebenszeit von IKT-Geräten verlängern.

Das Recycling von IKT-Geräten verbessern.

Die Energiebedarfe von IKT-Geräten und Rechenzentren senken und durch erneuerbare Energieträger decken.

Das Design und die Produktion von Hardware und Software ressourcenschonender gestalten.

Standardisierte Informationen und mehr Transparenz über die Umwelteinflüsse von IKT-Produkten und Dienstleistungen schaffen, um effizientere Produkte und Prozesse sowie bewussteren Konsum- und Kaufentscheidungen zu ermöglichen.

Bewussteren und nachhaltigeren Konsum von IKT-Produkten und Dienstleistungen kultivieren.

Die Umweltfolgen neuer IKT-Geräte und Dienstleistungen besser abschätzen, um sie bei der Gestaltung von Anwendungen von Anfang an zu berücksichtigen.

Die Forschungsbedarfe, die sich daraus ergeben, sowie ein Ausblick auf mögliche weitere Aktivitäten sind in Kapitel 8 zusammengefasst.

## 8 Fazit, Ausblick, weiterer Forschungsbedarf

### Allgemeine Forschungsbedarfe

Digitale Geräte, Prozesse und Infrastrukturen verursachen teilweise einen signifikant hohen Ressourceneinsatz und -aufwand und haben daher ein entsprechend hohes Umweltbelastungspotenzial. Deshalb sollten Initiativen im Fokus stehen, die sich mit Effizienzsteigerungen und der Minimierung des Ressourcenbedarfs (**Dematerialisierung**) auseinandersetzen. Diese könnten beispielsweise die Entwicklung effizienter Hardwarekomponenten, die Identifizierung von Alternativen für kritische Rohstoffe, die Optimierung von Recycling- und Rückgewinnungsprozessen sowie die Gestaltung von energieeffizienten Rechenzentren und Logistiksystemen betreffen.

Die Bewertung des Ressourcenbedarfs digitaler Produkte steht vor dem Grundsatzproblem einer unvollständigen und uneinheitlichen **Datengrundlage**. Diese Datenlücken beeinflussen die ganzheitliche Beurteilung des Ressourcenbedarfs und somit die Qualität der Entscheidungsfindung. Ein zentraler Schritt zur Schließung von Datenlücken liegt in der systematischen Erfassung und Analyse vorhandener Datenquellen. Dies erfordert eine umfassende Bestandsaufnahme und Bewertung der verfügbaren Daten mit gezielter Identifikation von Defiziten. Hierbei spielen auch bisher weniger erforschte Bereiche eine Rolle, in denen Daten ganz fehlen oder unvollständig sind.

Für die Vergleichbarkeit der erhobenen Daten sind **einheitliche** Messgrößen, Indikatoren und Berechnungsmethoden wichtig. Innovative Ansätze wie *Big-Data-Analysen* und *Machine Learning* können dazu dienen, Muster und Zusammenhänge in den Daten zu erkennen. Die daraus resultierenden Erkenntnisse können dann die Grundlage von Normen und Standards bilden, die eine konsistente Datenerhebung sicherstellen. Die Schließung von Datenlücken erfordert darüber hinaus eine enge Kooperation verschiedener Akteure\*Akteurinnen, darunter Regierungsbehörden, Industrieverbände und Forschungsinstitute. Die Initiierung von gemeinsamen Forschungsprojekten, Datenaustausch und die Schaffung von Koordinationsplattformen wären sinnvolle Schritte hin zu einer umfassenderen Datengrundlage und zur Nutzung von Synergien.

Die Erforschung und Gestaltung **nachhaltiger Lieferketten** für digitale Geräte und Dienstleistungen spielen ebenfalls eine wichtige Rolle. Ansatzpunkte wären: die Optimierung von Transport- und Logistiklösungen, die Verbesserung der Rückverfolgbarkeit von Materialien, die Integration von Nachhaltigkeitskriterien in die Beschaffungsprozesse, die Identifizierung von Hindernissen und Anreizen sowie die Untersuchung der sozialen Auswirkungen.

Zentral wäre auch weiterführende wissenschaftliche Untersuchungen von **Rebound-Effekten** und von deren Ursachen. Auch Maßnahmen zur Minimierung oder Vermeidung dieser Effekte wären ein wichtiger Untersuchungsgegenstand. Besonders spannend wäre eine Analyse von Verhaltensänderungen, Preiseffekten, sozialen Normen sowie anderen Faktoren, die das Nutzungsverhalten in Bezug auf digitale Angebote beeinflussen. Die Entwicklung geeigneter Bewertungsmethoden und die Berücksichtigung von Externalitäten haben in diesem Kontext ebenfalls hohe Priorität.

Eine zentrale Rolle bei der Reduzierung des Ressourcenbedarfs in der digitalen Welt sollten **kreislaufwirtschaftliche Aspekte** spielen. Ein zirkuläres Design hätte vielfältige Effekte: eine effizientere Nutzung der Rohstoffe, die Reduzierung von Abfällen durch Rückbau oder Recycling sowie die Verlängerung der Lebensdauer digitaler Geräte. Die Kreislaufwirtschaft bietet das Potenzial, eine grüne Transformation voranzutreiben. Aber auch hier sind noch zahlreiche

weitere Forschungsanstrengungen für dedizierte Sektoren, Produktgruppen und Wiederverwertungsmöglichkeiten erforderlich.

Das Ziel einer „wirklich“ nachhaltigen Digitalisierung erfordert eine kontinuierliche Überwachung und Bewertung der **Implementierung** und Wirksamkeit von Maßnahmen. Langzeitstudien, die Veränderungen im Ressourcenbedarf im Laufe der Zeit verfolgen, sind erforderlich, um Trends und Herausforderungen aufzudecken. Es ist wichtig, den Fokus auf die Nachhaltigkeitsbewertung zu legen und geeignete Bewertungsmethoden zu entwickeln, die den tatsächlichen Ressourcenbedarf digitaler Technologien angemessen erheben. Hierbei könnte der digitale Produktpass als Instrument zur transparenten Erfassung und Bewertung der Umweltwirkungen von digitalen Geräten eine wichtige Rolle spielen.

Nur mit Langzeitstudien lässt sich der **dynamische Charakter des Ressourcenbedarfs** digitaler Produkte erfassen. Durch kontinuierliche Überwachung und Bewertung der Datengrundlage können langfristige Entwicklungen identifiziert und analysiert werden. Dies hat nicht nur eine umfassendere Datenerhebung zur Folge, sondern trägt auch zur frühzeitigen Erkennung von Trends und Problemen bei.

Während beispielsweise die Pandemie und der Angriffskrieg auf die Ukraine vermeintlich unvorhergesehene Ereignisse waren, gibt es bezogen auf wahrscheinlich eintretende Entwicklungen die sogenannten *Foresight*-Trends<sup>64</sup>. In Anbetracht der dynamischen und komplexen Entwicklungen im Bereich der „nachhaltigen Digitalisierung“ besteht ein Bedarf an proaktiven Ansätzen, damit sich zukünftige Herausforderungen und Chancen frühzeitig erkennen und angehen lassen. Mit *Foresight*-Trends sind eine vorausschauende Perspektive und eine Integration in die Planung von Forschungsaktivitäten möglich.

Grundsätzlich kann die Analyse relevanter Zukunftsthemen also dazu beitragen, Forschungsfragen und -schwerpunkte zu definieren, die auf zukünftige Herausforderungen und Chancen ausgerichtet sind. *Foresight*-Trends können eine Grundlage für die Entwicklung von Zukunftsszenarien bilden, verschiedene mögliche Entwicklungen und deren Auswirkungen aufzeigen und potenzielle Risiken bei zukünftigen Entwicklungen erkennbar machen.

Das vorliegende Forschungsvorhaben orientiert sich teilweise an Inhalten aus *Foresight*-Studien, die bei der Identifikation und Einordnung der Fallstudien in die Recherchen und Analysen einbezogen wurden. Konkrete Hilfsgrößen (insbesondere im Kontext von Umweltwirkungen) sind allerdings häufig nicht Teil dieser Trend-Studien. Die *Foresight*-Trends stellen eine Art „Vorhersage“ dar, liefern jedoch in der Regel keine präzisen Zahlen oder Parameter. Daher fanden sie bei der gewählten Input-Output-Modellierung in diesem Forschungsvorhaben keinen Niederschlag in den gesamtwirtschaftlichen Abschätzungen. Zukünftige Forschungs- und Entwicklungsarbeiten sollten aber darauf abzielen, den vorgestellten Bewertungsansatz weiter zu einem umfassenden makroökonomischen **Simulationsmodell auszubauen**. Für präzisere Aussagen über zukünftige Entwicklungen sind dedizierte Studien erforderlich, die sich auf bestimmte Bereiche konzentrieren. Gemeinsam mit Branchenfachleuten sollten spezifische Herausforderungen und Chancen gezielt untersucht werden. Empfehlenswert im Sinne einer fundierten Entscheidungsfindung wäre es, Branchenfachleute und Ökonom\*innen in die Entwicklung von Modellen und Simulationen zur Quantifizierung des Ressourcenbedarfs im Kontext digitaler Technologien einzubinden.

Ein Fokus sollte auf der Nachhaltigkeitsbewertung liegen. Dafür müssten geeignete **Bewertungsmethoden** entwickelt werden, die den tatsächlichen Ressourcenbedarf digitaler Technologien angemessen erfassen. Hierbei könnte der digitale Produktpass als Standard zur

---

<sup>64</sup> Für eine Beschreibung siehe <https://www.iso.org/foresight.html> (Stand: 23.09.2023).

transparenten Erfassung und Bewertung der Umweltwirkungen von digitalen Produkten eine wichtige Rolle spielen.

Hindernisse wie die mangelnde Datenverfügbarkeit und die Komplexität der Umsetzung müssen angegangen werden, um spürbare Fortschritte in Richtung einer nachhaltigen digitalen Zukunft zu erzielen. Eine langfristige Perspektive, die **Einbindung** von Branchenfachleuten und die Entwicklung von Standards tragen dazu bei, dass wissenschaftliche Erkenntnisse in die Praxis gelangen und nachhaltige Lösungen an Boden gewinnen. Gemeinsame Standards gewährleisten Vergleichbarkeit und Transparenz. Sie können helfen, nachhaltige Gestaltungsprinzipien zu etablieren und damit den Ressourcenbedarf digitaler Produkte zu minimieren. In Folgevorhaben wäre es zusätzlich zur eigentlichen Forschung also auch empfehlenswert, Standardisierungsworkshops unter der breiten Beteiligung relevanter Akteure\*Akteurinnen durchzuführen.

Bei der ressourcenschonenden und nachhaltigen Ausgestaltung der Digitalisierung handelt sich um einen **kontinuierlichen und multidisziplinären Prozess**, der weiterhin umfangreiche Forschungsanstrengungen, Zusammenarbeit und Engagement erfordert. Das Umweltbundesamt und weitere relevante Akteure\*Akteurinnen müssen ihre Rolle als Impulsgeber\*innen und Unterstützer\*innen bei Forschungsprojekten zur nachhaltigen Digitalisierung weiterhin wahrnehmen. So können sie einen positiven Wandel ermöglichen und den nachhaltigen Umgang mit digitalen Technologien fördern.

### Spezifische anknüpfende Forschungsbedarfe

Neben den genannten allgemeinen Forschungsbedarfen bestehen folgende konkrete Forschungsbedarfe für dieses Vorhaben:

1. In bisherigen Studien lag der Fokus hauptsächlich auf dem Konsumsektor im Kontext der Digitalisierung. **Andere Sektoren** wie Mobilität und Gesundheit wurden ebenfalls in Fallstudien behandelt, wobei diese relevante digitale Anwendungsfälle für Endverbraucher\*innen umfassten. Industrielle Anwendungen waren bereits Gegenstand anderer Forschungsvorhaben, insbesondere im Rahmen von „Industrie 4.0“. Allerdings fielen andere Sektoren – etwa **Landwirtschaft, Dienstleistungen und Bildung** – nicht in den Betrachtungshorizont der Fallstudien dieses Vorhabens. Sie wären spannende Bereiche für zukünftige Forschungsvorhaben. So wird im Dienstleistungssektor die Nutzung von **künstlicher Intelligenz** voraussichtlich eine zunehmend wichtige Rolle spielen. Fallstudien zur Nutzung von Technologien wie z. B. *ChatGPT* würden dabei relevante Einblicke bieten. Im Bereich der öffentlichen Verwaltung wäre die Untersuchung der Ressourcen- und Treibhausgasintensität der **E-Akte** ein interessantes Forschungsfeld. Des Weiteren eröffnet die Digitalisierung auch in der **Landwirtschaft** neue Perspektiven. Hier könnte insbesondere die Ressourcen- und Treibhausgasintensität im Bereich Präzisionslandwirtschaft (*Precision Farming*) genauer betrachtet werden, bei den digitalen Verfahrenstechniken die Bodenbewirtschaftung unterstützen.
2. Ebenfalls interessant zu untersuchen wäre, welche Sektoren in Zukunft einen erhöhten Bedarf an digitalen Rohstoffen aufweisen werden und wie etwa ein Kreislaufwirtschaftssystem die hohe Nachfrage an (digitalisierungsrelevanten) Rohstoffen abpuffern kann. Die makroökonomischen Untersuchungen und Fallstudien zeigen einen hohen Bedarf an Rohstoffen wie Sand, Kies und Steinen, die auf fossile Energieträger in der Herstellung digitaler Produkte zurückzuführen sind. Es wäre daher wichtig zu analysieren, wie sich der Ressourcenbedarf ändert, wenn **erneuerbare Energien** verstärkt in den Strommix integriert sind. In weiteren Forschungsvorhaben sollte also untersucht werden,

wie sich der Ressourcenbedarf verändert, wenn erneuerbare Energieträger in Zukunft den Strommix zunehmend dominieren.

3. Auch in den bereits untersuchten Sektoren oder Bedarfsfeldern gibt es weitere Anwendungsfälle, die intensiver betrachtet werden sollten. Mit der Digitalisierung ergeben sich im Gesundheitswesen etwa durch **Gesundheits-Apps** weitere Anknüpfungspunkte für zukünftige Fallstudien. Ebenso könnten im Finanzsektor **Online-Banking** und Transaktionen intensiver beleuchtet werden.
4. Darüber hinaus sind nicht nur Ressourcen- und Treibhausgasintensität weiterer einzelner Anwendungsfälle in **anderen Zielsektoren** von Interesse. Vielmehr stellt sich die Frage, wie sich die Ressourcen- und Treibhausgasintensität der digitalen Anwendungen mit „konventionellen“ nicht digitalen Anwendungen vergleichen lässt. Zukünftige Forschungsarbeiten könnten die jeweilige Ressourcen- und Treibhausgasintensität gegenüberstellen und untersuchen, unter welchen Bedingungen (z. B. Nutzungsverhalten) die digitale Anwendung wieviel Ressourcen spart. Im Falle der E-Akte ließe sich beispielsweise betrachten, wie sich die Umstellung von Papierakte auf E-Akte über den Lebenszyklus auswirkt. Solche Vergleiche bieten sich auch in Bezug auf ausgewählte Fallstudien dieses Forschungsvorhabens an. So kann in zukünftigen Forschungsprojekten eine Videokonferenz einem Live-Meeting im Büro gegenübergestellt werden. Solche Vergleiche zeigen auf, inwiefern und unter welchen Bedingungen (z. B. Anreise zum Büro und Verkehrsmittelwahl) die digitalen Anwendungen tatsächlich Ressourcen einsparen oder ob der Ressourcenbedarf umverteilt wird. Darüber hinaus sollten Rebound-Effekte in zukünftigen Forschungsvorhaben näher betrachtet werden.
5. Es ist notwendig, konkrete Hebel zur Reduzierung des Ressourcenbedarfs in der Digitalisierung zu erforschen. Themen wären eine erhöhte Zirkularität und Faktoren wie Nutzungsverhalten, Hardware und Strommix. Unterschiedliche Szenarien innerhalb derselben Fallstudie könnten Variationen aufzeigen. So würde z. B. die aktuelle Videokonferenzfallstudie das *Baseline*-Szenario bilden. Dieses Szenario könnte anhand von verschiedenen Nutzungsprofilen variieren. Ein Szenario könnte abbilden, inwiefern eine Teilnahme ohne Kamera tatsächlich zu einer Ressourcenschonung führen kann. Teilweise finden sich für solche **Szenarien-basierten Untersuchungen** bereits Ansätze in den Fallstudien dieses Vorhabens. Die Carsharing-Fallstudie etwa untersucht einen Grünstrommix im Vergleich zum konventionellen Strommix. Die E-Sports-Fallstudie unterscheidet zwischen verschiedenen Technologiesystemen.
6. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte nicht umfassend evaluiert werden, ob (und ggf. in welchem Maße) empirische Defizite der Makro-**Datenbank GLORIA** zu den beobachteten Ergebnisabweichungen beitragen. Erste Gegenüberstellungen der Ergebnisse bei Anwendung einer MRIO-Datenbank im Vergleich zur Eurostat-Methode wurden vor zehn Jahren veröffentlicht (Schoer *et al.* 2013). Aktualisierte Analysen mit der neu verfügbaren Datenbank GLORIA bleiben eigenständigen zukünftigen Forschungsvorhaben vorbehalten.
7. Die derzeit für gesamtwirtschaftliche *Top-down*-Bewertungen anwendbaren MRIO-Datenbanken (GLORIA, EXIOBASE ...) berichten generell nicht über Preisentwicklungen. In zukünftigen Weiterentwicklungen des Bewertungsansatzes sollte geprüft werden, ob ergänzende Preisinformationen in den Berechnungen mitberücksichtigt werden können. Beispielsweise veröffentlicht der Datensatz PREDICT für die dort analysierten IKT-Teilektoren *Deflatoren* der Wertschöpfung. Im Rahmen des Forschungsvorhabens konnte nicht geprüft werden, ob damit bereits hinreichende Ansatzmöglichkeiten zur zusätzlichen Abbildung von **Preiseffekten** gegeben sind. Es wäre wünschenswert, wenn in Folgeprojekten entsprechende Ansatzmöglichkeiten zumindest konzeptionell geprüft würden.

8. Als zentrale Berichtsgrößen des Vorhabens dienten im Makrobereich der CO<sub>2</sub>-Fußabdruck sowie der Rohstoffkonsum (RMI und RMC). Die verwendete Datenbasis sowie der angewandte Bewertungsansatz erlauben darüber hinaus eine Berechnung weiterer **Fußabdruck-Indikatoren** anhand weiterer umweltrelevanter Intensitäten aus GLORIA (etwa Wasser und Land, analog zu den bereits in diesem Vorhaben behandelten Fallstudien im Mikro-Bereich). Doch auch eigenständige Weiterentwicklungen könnten angestrebt werden. So wurde während der Bearbeitungszeit des Vorhabens die Verwundbarkeit digitalisierungsrelevanter multinationaler Lieferketten öffentlich diskutiert. Es wäre also unter anderem denkbar, in einem Folgevorhaben entsprechende Kennzahlen für die Kritikalität zu entwickeln und auszuweisen.
9. Der Bericht dokumentiert die Simulationseigenschaften des entwickelten gesamtwirtschaftlichen Bewertungsansatzes. Allerdings konzentrierte sich das Vorhaben nicht auf umfassende Entwicklungsprozesse für Szenarien. Daher kommen die Simulationseigenschaften bislang lediglich durch Variation ausgewählter „Stellschrauben“ (wie der allgemeinen Nachfragentwicklung oder möglicher Effizienzsteigerungen in der Produktion) zum Tragen. In möglichen Folgeprojekten könnten die **Simulationseigenschaften für die Parametrisierung** wesentlich umfangreicherer Szenario-Projektionen genutzt werden. Zielführend wäre dabei ein geleiteter Entwicklungsprozess für die Szenarien, der zunächst relevante Vorarbeiten und Konzepte strukturiert erfasst.<sup>65</sup> Darauf aufbauend könnten dann (unter umfassender Einbindung relevanter Stakeholder-Expertise) detailliertere Szenario-Parametrisierungen erarbeitet werden.
10. Die Bewertung von Effizienz und Umsetzbarkeit der identifizierten Maßnahmenbeispiele war nicht Teil des Vorhabens. Daher sollten diese und weitere Maßnahmen in einem Folgevorhaben mit relevanten Akteuren\* Akteurinnen diskutiert, erweitert, konkretisiert und auf ihre Wirksamkeit geprüft werden. Ein geeignetes Mittel wäre der **Stakeholder-Dialog**.

---

<sup>65</sup> Die Identifikation thematisch relevanter Vorarbeiten für die Szenarientwicklung wäre ein erster zentraler Meilenstein eines entsprechenden Arbeitspakets. An dieser Stelle sei nur beispielhaft darauf hingewiesen, dass die globale Entwicklung der Digital Economy auch international als relevantes Zukunftsthema angesehen wird, das umfassende Möglichkeiten für wirtschaftliche, ökologische und soziale Strukturveränderungen, aber auch nie dagewesene ökologische und soziale Risiken mit sich bringt. Siehe hierzu beispielsweise laufende Aktivitäten der „Expert Group Digital Technologies“ (<https://www.oneplanetnetwork.org/news-and-events/news/new-one-planet-network-initiative-harnessing-digital-technologies-circular>) (Stand: 10.11.2023).



## Digitalisierung und natürliche Ressourcen auf die politische Agenda setzen: Stakeholder-Dialog etablieren

Die Synergien zwischen den Politikfeldern Digitalisierung und Ressourcenschonung werden von der Politik bisher wenig adressiert. Damit werden auch die Potenziale zur Steigerung der Ressourceneffizienz nur unzureichend genutzt. Erste entsprechende politische Handlungsoptionen wurden im Rahmen der oben identifizierten Gestaltungsfelder jeweils exemplarisch herausgearbeitet.

Um das Thema „Digitalisierung und natürliche Ressourcen“ noch stärker auf die politische Agenda zu setzen und strategisch besser zu verankern, bedarf es einer intensiven Diskussion unter Stakeholder-Einbindung. Ein solcher offener und breit angelegter Dialog schafft die Grundlage dafür, ein gemeinsames Verständnis von Handlungsbedarfen und Handlungsoptionen zu erreichen. Hierzu sollte die Politik wesentliche Stakeholder aus Wirtschaft, Wissenschaft, Industrie, Umwelt- und Verbraucherschutz sowie nicht zuletzt aus der Qualitätsinfrastruktur (Normung, Standardisierung und Zertifizierung) einbinden.

Im gemeinsamen Dialog erhielten verschiedene Akteure\*Akteurinnen eine breite Sichtweise auf die Herausforderungen, die mit dem Ressourcenbedarf digitaler Produkte verbunden sind. Die **vielfältigen Kompetenzen** würden fundierte und innovative Lösungsansätze ermöglichen. Ein solcher Dialog könnte dabei helfen, die unterschiedlichen Prioritäten und Bedenken der beteiligten Parteien zu identifizieren. Während die Industrie möglicherweise den Fokus auf technologische Innovationen legt, können Umweltorganisationen stärker auf ökologische Nachhaltigkeit achten. Diese Erkenntnisse ermöglichen es, gemeinsame Ziele zu definieren und mögliche Konflikte frühzeitig anzugehen.

Neben der Identifikation von Prioritäten bietet der Stakeholder-Dialog Raum für die Entwicklung gemeinsamer Lösungsansätze. Der Austausch von Wissen und Erfahrungen trägt dazu bei, innovative Wege zur Reduzierung des Ressourcenbedarfs zu finden. Dies kann die Ausarbeitung von Richtlinien, Standards und bewährten Verfahren umfassen, die die nachhaltige Entwicklung digitaler Produkte fördern. Ein weiterer Vorteil dieses Dialogs liegt in der Förderung von Transparenz und Verantwortlichkeit. Durch den Austausch von Informationen und Daten können Verbraucher\*innen fundierte Entscheidungen treffen, während Unternehmen Anreize erhalten, ihre Praktiken zu verbessern. Öffentliche Diskussionen tragen dazu bei, die Verantwortlichkeit der Akteure\*Akteurinnen zu stärken.

Zudem eröffnet der Dialog die Möglichkeit zur **Zusammenarbeit** zwischen Regierungen und Interessengruppen. Dies ist essenziell für politische Maßnahmen, die den Übergang zu einer ressourceneffizienten digitalen Wirtschaft fördern. Der Dialog bietet Raum für die Diskussion von regulatorischen Ansätzen, die einen nachhaltigen Wandel unterstützen. Er sollte als kontinuierlicher Prozess verstanden werden, der sich den neuesten Erkenntnissen und Entwicklungen anpasst. Dies ermöglicht den Stakeholdern, auf sich ändernde Bedingungen und Herausforderungen flexibel zu reagieren.

Daraus ließe sich in einem zweiten Schritt ressortübergreifend ein ganzheitlicher strategischer Ansatz zur Hebung der **Synergien und Potenziale** zwischen den beiden Politikfeldern Digitalisierung und Ressourcenschonung erarbeiten. Eine solche „**Roadmap**“ sollte einen klaren Aktionsplan mit Maßnahmen beinhalten, die mit Zeitplänen und Zuständigkeiten hinterlegt sind. Die Implementierung der Maßnahmen sowie deren Wirkung sollten im Anschluss über ein Monitoring-Verfahren überwacht werden, damit sich auf dieser Basis die *Roadmap* fortschreiben lässt.

Bereits das Ressourceneffizienzprogramm ProgRess III (BMUV, 2020b) betont, dass für die Bundesregierung das Zusammenspiel mit anderen Politikfeldern wichtig ist, damit Synergien

ausgeschöpft und Zielkonflikte vermieden bzw. verringert werden. Für den IKT-Bereich identifiziert das Programm verschiedene Maßnahmen, wie unter anderem die Kennzeichnung ressourceneffizienter Software und Geräte, austauschfähige IKT-Komponenten sowie eine bessere Energie- und Ressourceneffizienz von Rechenzentren. ProgRes III weist auch darauf hin, dass es stark von der Umsetzung der Maßnahmen abhängt, ob die Digitalisierung zur Ressourcenschonung beitragen kann. Ein Stakeholder-Dialog ist dafür ein wirksames strategisches Instrument, denn er bringt die Beteiligten dazu, Position zu beziehen, an einer Konsensfindung zu notwendigen Maßnahmen mitzuarbeiten und die gemeinsam definierten Schritte und Ziele nach ihren Möglichkeiten zu unterstützen.

Weitere wichtige Impulse sind von der Nationalen Kreislaufwirtschaftsstrategie (NKWS) zu erwarten, die sich zum Zeitpunkt dieses Forschungsvorhabens in der Entwicklung befand und für 2024 erwartet wird.

Darüber hinaus empfiehlt sich grundsätzlich eine noch stärkere ressortübergreifende Zusammenarbeit zwischen den Bundesressorts: Die grüne und digitale Transformation der Wirtschaft und Gesellschaft sowie der Klima- und Ressourcenschutz betreffen nahezu alle Ministerien gleichermaßen. Dementsprechend sollte der Stakeholder-Dialog auch die Synergien zum Klimaschutz aufgreifen sowie den Beitrag einer ressourceneffizienten Digitalisierung zu den *Sustainable Development Goals der United Nations* adressieren.

Die Corona-Pandemie hat darüber hinaus sowohl Stärken als auch Schwächen der Digitalisierung aufgezeigt. Einerseits haben digitale Technologien zum Beispiel eine Kommunikation „auf Distanz“ – wie das Arbeiten von zu Hause – ermöglicht und damit auch zu einer effizienten Krisenbewältigung beigetragen. Andererseits zeigte sich, dass gerade in Deutschland noch Nachholbedarf bei der Digitalisierung – beispielsweise beim Netzausbau – besteht. Das weitere Fortschreiten der Digitalisierung sollte daher schnellstmöglich auch unter besonderer Berücksichtigung der Inanspruchnahme natürlicher Ressourcen erfolgen. Auch hier könnte ein der Stakeholder-Dialog hilfreich sein.

Es ist offensichtlich, dass die Potenziale der Digitalisierung im Hinblick auf eine nachhaltige, ressourcenschonende und umweltfreundlichere Zukunft noch lange nicht ausgeschöpft sind. Dieses Forschungsvorhaben hat einen wichtigen Beitrag geleistet und kann als Ausgangspunkt für die weitere Forschungsarbeit, Initiativen und Dialoge verstanden werden.

## Quellenverzeichnis

- Abraham, V., Kirchdorfer, R., Albus, N., Aigner, J., Wirges, N., Milde, K., Klose, A., Böbel, M., Lückerath, 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. [www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen](http://www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen) (in Erscheinung).
- Abraham, V., Kirchdorfer, R., Albus, N., Aigner, J., Wirges, N., Milde, K., Klose, A., Böbel, M., Lückerath, D., Meyer, M., Distelkamp, M., Banning, M., Philippi, A., Haack, D., Risch, L. & Elsesser, P.-V. (2023b). *Anhang zum Schlussbericht: Digitalisierung und natürliche Ressourcen. Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. [www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen](http://www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen) (in Erscheinung).
- Aichberger, C. & Jungmeier, G. (2020). Environmental Life Cycle Impacts of Automotive Batteries Based on a Literature Review. *Energies*, 13(23), 6345. <https://doi.org/10.3390/en13236345>
- Aigner, J. F. (2018). *Environmental Implications of Media Consumption embedded in Digital Ecosystems - A bottom-up systems approach to the perennial case of paperless reading in Germany* [Degree Project Environmental Engineering, Second cycle. KTH Royal Institute of Technology.
- Andrae, A. & Edler, T. (2015). On Global Electricity Usage of Communication Technology: Trends to 2030. *Challenges*, 6(1), 117–157. <https://doi.org/10.3390/challe6010117>
- Arnold, D., Steffes, S. & Wolter, S. (2015). *Mobiles und entgrenztes Arbeiten*. (Forschungsbericht / Bundesministerium für Arbeit und Soziales, FB460). Nürnberg: Bundesministerium für Arbeit und Soziales; Institut für Arbeitsmarkt- und Berufsforschung der Bundesagentur für Arbeit (IAB); Zentrum für Europäische Wirtschaftsforschung (ZEW) GmbH; Universität Köln. <https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0168-ssoar-47129-5>
- Arushanyan, Y., Ekener-Petersen, E. & Finnveden, G. (2014). Lessons learned - Review of LCAs for ICT products and services. *Computers in Industry*, 65(2), 211–234. <https://doi.org/10.1016/j.compind.2013.10.003>
- Ax, C., Reichwein, A. & Poppe, E. (2018). *Softwareobsoleszenz als Herausforderung für die Reparatur*. Runder Tisch Reparatur Diskussionspapier. <https://www.germanwatch.org/de/14923>
- Baischew, D., Schrade-Grytsenko, L., Sörries, B., Stronzik, M. & Wissner, M. (2022). Ausgewählte Informations- und Kommunikationstechnologien und ihre Auswirkungen auf umweltpolitische Ziele. *WIK Diskussionsbeitrag No. 492*. <http://hdl.handle.net/10419/267677>
- Bayindir, N. & Paisley, E. (2019). *Digital vs Traditional Media Consumption Summary*. Global Web Index. [https://www.amic.media/media/files/file\\_352\\_2142.pdf](https://www.amic.media/media/files/file_352_2142.pdf)
- Beckmann, S., Asswad, J., Hake, G. & Gómez, J. M. (2019). Ein erweitertes Kennzahlensystem für Smartphones zur Förderung nachhaltigen Konsums von IKT. In *Springer eBooks* (S. 477–492). [https://doi.org/10.1007/978-3-658-25210-6\\_37](https://doi.org/10.1007/978-3-658-25210-6_37)
- Behringer, J. (2022). Effizienz für Nachhaltigkeit – notwendig, jedoch nicht hinreichend. *Conexus*, 7–28. <https://doi.org/10.24445/conexus.2022.05.003>
- Belkhir, L. & Elmeligi, A. (2018). Assessing ICT global emissions footprint: Trends to 2040 & recommendations. *Journal of Cleaner Production*, 177, 448–463. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2017.12.239>
- Bendel, O. (2021, 13. Juli). *Smartwatch - Definition: Was ist „Smartwatch“?* Gabler Wirtschaftslexikon. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/smartwatch-54075#:~:text=Eine%20Smartwatch%20ist%20eine%20digitale,und%20vermittelt%20Informationen%20aller%20Art>

- Bieser, J. C. T. & Hilty, L. M. (2018). Assessing indirect environmental effects of information and communication technology (ICT): A systematic literature review. *Sustainability*, 10(8), 1–19.  
<https://doi.org/10.3390/su10082662>
- Bieser, J., Hintemann, R., Beucker, S., Schramm, S. & Hilty L. (2020). *Klimaschutz durch digitale Technologien – Chancen und Risiken. Kurzstudie*. Bitkom. [https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05\\_bitkom\\_klimastudie\\_digitalisierung.pdf](https://www.bitkom.org/sites/default/files/2020-05/2020-05_bitkom_klimastudie_digitalisierung.pdf)
- Bilsen, V., Gröger, J. & Devriendt, W. (2022). *Study on greening cloud computing and electronic communications services and networks: towards climate neutrality by 2050: executive summary*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2759/385014>
- Bitkom. (2020). *Klimaeffekte der Digitalisierung*. Bitkom. [https://www.bitkom.org/sites/default/files/2021-10/20211010\\_bitkom\\_studie\\_klimaeffekte\\_der\\_digitalisierung.pdf](https://www.bitkom.org/sites/default/files/2021-10/20211010_bitkom_studie_klimaeffekte_der_digitalisierung.pdf)
- Bitkom (2022). *Smartphones, Tablets, Laptops: Fast 300 Mio. Alt-Geräte in deutschen Haushalten*. Bitkom. [https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Smartphones-Tablets-Laptops-300-Mio-Alt-Geraete-deutschen-Haushalten#\\_](https://www.bitkom.org/Presse/Presseinformation/Smartphones-Tablets-Laptops-300-Mio-Alt-Geraete-deutschen-Haushalten#_)
- BMBF. (2015). *Sozial-ökologische Forschung: Förderkonzept für eine gesellschaftsbezogene Nachhaltigkeitsforschung*. Bundesministerium für Bildung und Forschung. [https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/31075\\_Sozial-oekologische\\_Forschung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/7/31075_Sozial-oekologische_Forschung.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
- BMBF (2022a, 27. Juli). *r4 – Innovative Technologien für Ressourceneffizienz – Forschung zur Bereitstellung wirtschaftsstrategischer Rohstoffe*. FONA. <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/archiv/r4-innovative-technologien-fuer-ressourceneffizienz-forschung-zur-bereitstellung-wirtschaftsstrategischer-rohstoffe.php>
- BMBF. (2022b). *VORAUS:schau!, I – III. Runde: 112 Themen*. Bundesministerium für Bildung und Forschung. [https://www.vorausschau.de/SharedDocs/Downloads/vorausschau/de/112\\_Themenbl%C3%A4tter.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=3](https://www.vorausschau.de/SharedDocs/Downloads/vorausschau/de/112_Themenbl%C3%A4tter.pdf?__blob=publicationFile&v=3)
- BMBF. (2022c). *Wirksame Effizienzpolitik und Rebound-Effekte in Unternehmen*. adelphi. <https://rebound-effekte-in-unternehmen.de/de>
- BMBF. (2023a, 24. Oktober). *Digital GreenTech - Umwelttechnik trifft Digitalisierung*. FONA. <https://www.fona.de/de/massnahmen/foerdermassnahmen/DigitalGreenTech.php>
- BMBF. (2023b). *Zukunftsstrategie Forschung und Innovation*. Bundesministerium für Bildung und Forschung. [https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/1/730650\\_Zukunftsstrategie\\_Forschung\\_und\\_Innovation.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=4](https://www.bmbf.de/SharedDocs/Publikationen/de/bmbf/1/730650_Zukunftsstrategie_Forschung_und_Innovation.pdf?__blob=publicationFile&v=4)
- BMDV. (2022). *Digitalstrategie Deutschland*. Digitalstrategie Deutschland. <https://www.digitalstrategie-deutschland.de/>
- BMI. (2023). *Onlinezugangsgesetz*. Bundesministerium des Inneren und für Heimat. <https://www.bmi.bund.de/DE/themen/moderne-verwaltung/verwaltungsmodernisierung/onlinezugangsgesetz/onlinezugangsgesetz-node.html>
- BMUV. (2020a). *Berichtspflicht gemäß Art. 16 Absatz 4 der Richtlinie 2012/19/EU über Elektro- und Elektronikaltgeräte (WEEE-Richtlinie) – Berichtsjahr 2020*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. [https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Abfallwirtschaft/elektronikgeraete\\_daten\\_2020\\_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/elektronikgeraete_daten_2020_bf.pdf)

- BMUV. (2020b). *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. <https://www.bmuv.de/publikation/deutsches-ressourceneffizienzprogramm-iii-2020-bis-2023>
- BMUV. (2020c). *Umweltpolitische Digitalagenda*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. <https://www.bmuv.de/umweltpolitische-digitalagenda>
- BMUV. (2021). *Klimaschutz in Zahlen - Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik Ausgabe 2021*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. [https://klima.proplat.de/wp-content/uploads/2022/08/klimaschutz\\_zahlen\\_2021\\_bf.pdf](https://klima.proplat.de/wp-content/uploads/2022/08/klimaschutz_zahlen_2021_bf.pdf)
- BMUV. (2023). *Die Nationale Kreislaufwirtschaftsstrategie. Grundlagen für einen Prozess zur Transformation hin zu einer zirkulären Wirtschaft*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. [https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Download\\_PDF/Abfallwirtschaft/nkws\\_grundlagen\\_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Download_PDF/Abfallwirtschaft/nkws_grundlagen_bf.pdf)
- BMWK. (2010). *Rohstoffstrategie der Bundesregierung Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nicht-energetischen mineralischen Rohstoffen*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. [www.bmwi.de](http://www.bmwi.de)
- BMWK. (2019). *Energieeffizienzstrategie 2050*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Energie/energieeffizienzstrategie-2050.html>
- BMWK. (2020). *Rohstoffstrategie der Bundesregierung: Sicherung einer nachhaltigen Rohstoffversorgung Deutschlands mit nichtenergetischen mineralischen Rohstoffen*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Publikationen/Industrie/rohstoffstrategie-der-bundesregierung.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- BMWK. (2022). *Eröffnungsbilanz Klimaschutz*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111\\_eroeffnungsbilanz\\_klimaschutz.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=22](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/Energie/220111_eroeffnungsbilanz_klimaschutz.pdf?__blob=publicationFile&v=22)
- BMWK. (2023a). *Eckpunktepapier: Wege zu einer nachhaltigen und resilienten Rohstoffstrategie*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. <https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/eckpunktepapier-nachhaltige-und-resiliente-rohstoffversorgung.html>
- BMWK. (2023b). *Konzept zum Aufbau des Dateninstituts*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/C-D/230510-konzeptpapier-dateninstitut.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=10](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/C-D/230510-konzeptpapier-dateninstitut.pdf?__blob=publicationFile&v=10)
- BMWK. (2023c). *Überblickspapier: Das Klimaschutz-Programm 2023*. Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz. [https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/U/ueberblickspapier-klimaschutzprogramm.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/U/ueberblickspapier-klimaschutzprogramm.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
- Bobba, S., Carrara, S., Huisman, J., Mathieux, F. & Pavel, C. (2020). *Critical Raw Materials for Strategic Technologies and Sectors in the EU - a Foresight Study*. Publications Office. <https://doi.org/10.2873/58081>
- 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: 11. August 2022).
- Brenke, K. (2016). *DIW Berlin: Home Office: Möglichkeiten werden bei weitem nicht ausgeschöpft*. Deutsches Institut für Wirtschaftsforschung e.V. [https://www.diw.de/de/diw\\_01.c.525999.de/wochenberichte/home\\_office\\_moeglichkeiten\\_werden\\_bei\\_weitem\\_nicht\\_ausgeschoepft.html](https://www.diw.de/de/diw_01.c.525999.de/wochenberichte/home_office_moeglichkeiten_werden_bei_weitem_nicht_ausgeschoepft.html)

- Bringezu, S., Kaiser, S., Turnau, S. & Mostert, C. (2019). *Bestimmung des Materialfußabdrucks mit ökobilanziellen Methoden und Softwarelösungen*. Center for Environmental Systems Research (CESR). <https://kobra.uni-kassel.de/handle/123456789/11497>
- Brümmerhoff, D. & Grömling, M. (2015). *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen* (10. Aufl.). Oldenbourg Wissenschaftsverlag 2011.
- Büchel, J., Demary, V., Goecke, H. & Rusche, C. (2021). *Digitalisierung der Wirtschaft in Deutschland: Digitalisierungsindex 2020 - Langfassung eines Ergebnispapiers im Projekt 'Entwicklung und Messung der Digitalisierung der Wirtschaft am Standort Deutschland' im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie*. [https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Digitalisierungsindex/Publikationen/publikation-download-Langfassung-digitalisierungsindex-2020.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.de.digital/DIGITAL/Redaktion/DE/Digitalisierungsindex/Publikationen/publikation-download-Langfassung-digitalisierungsindex-2020.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- Büchel, J. & Engels, B. (2022). *Digitalisierungsindex 2021. Digitalisierung der Wirtschaft in Deutschland, Gutachten im Rahmen des Projekts „Entwicklung und Messung der Digitalisierung der Wirtschaft am Standort Deutschland“ im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Klimaschutz (BMWK)*. Institut der deutschen Wirtschaft. <https://www.iwkoeln.de/studien/jan-buechel-barbara-engels-digitalisierung-der-wirtschaft-in-deutschland-2021.html>
- Bundesministerium für Finanzen. (2022). Nutzungsdauer von Computerhardware und Software zur Dateneingabe und -verarbeitung. <https://files.vogel.de/infodienste/smfiledata/1/7/9/0/4/9/227695.pdf>
- Bundesnetzagentur. (2021). *Die Blockchain-Technologie Grundlagen, Potenziale und Herausforderungen*. Bundesnetzagentur. [https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Technologien/Blockchain/Links\\_Dokumente/einfuehrung\\_bc.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bundesnetzagentur.de/DE/Fachthemen/Digitalisierung/Technologien/Blockchain/Links_Dokumente/einfuehrung_bc.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- Bundesregierung. (2021a). *Fünf-Punkte-Programm „Künstliche Intelligenz für Umwelt und Klima“*. Bundesministerium für Umwelt und Klima. <https://www.bmuv.de/download/fuenf-punkte-programm-kuenstliche-intelligenz-fuer-umwelt-und-klima/>
- Bundesregierung. (2021b). *Koalitionsvertrag 2021 - 2025 "Mehr Fortschritt wagen."* SPD. [https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag\\_2021-2025.pdf](https://www.spd.de/fileadmin/Dokumente/Koalitionsvertrag/Koalitionsvertrag_2021-2025.pdf)
- Bundesregierung. (2023, 23. November). *Energieeffizienzgesetz. Öffentliche Hand wird Vorbild beim Energiesparen*. <https://www.bundesregierung.de/breg-de/aktuelles/energieeffizienzgesetz-2184812>
- Bündnis 90/Die Grünen. (2023, 10. März). *Digitalkonferenz „Nachhaltig by design – für eine klimaneutrale digitale Zukunft“*. Die Grünen. <https://www.gruene-bundestag.de/digitalkonferenz>
- Büttner, L. & Breitkreuz, A. (2020). *Arbeiten nach Corona - Warum Homeoffice gut fürs Klima ist*. Greenpeace. <https://www.greenpeace.de/presse/publikationen/arbeiten-nach-corona>
- BVDW. (2016). *Smartwatch-Studie*. Bundesverband Digitale Wirtschaft e. V., DAYONE GmbH und defacto digital research GmbH. [https://www.bvdw.org/presserver/SmartwatchStudie/Smartwatch-Studie\\_2016.pdf](https://www.bvdw.org/presserver/SmartwatchStudie/Smartwatch-Studie_2016.pdf)
- BVDW. (2018). *Digitale Nutzung in Deutschland 2018*. Bundesverband Digitale Wirtschaft (BVDW) e.V. [https://lsb-bremen.vibss.de/fileadmin/user\\_upload/SOCIAL\\_4.PDF](https://lsb-bremen.vibss.de/fileadmin/user_upload/SOCIAL_4.PDF)
- 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 (ETH Zürich). <https://doi.org/10.5446/36510>
- Cook, G. (2017). *Clicking Clean - Who is Winning the Race to Build a Green Internet?* Greenpeace. [https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/20170110\\_greenpeace\\_clicking\\_clean.pdf](https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/20170110_greenpeace_clicking_clean.pdf)

- Criddle, C. (2021, 10. Februar). *Bitcoin consumes „more electricity than Argentina“*. BBC News. <https://www.bbc.com/news/technology-56012952>
- Dai, Q., Kelly, J. C., Gaines, L. & Wang, M. (2019). Life Cycle Analysis of Lithium-Ion Batteries for Automotive Applications. *Batteries*, 5(2), 48. <https://doi.org/10.3390/batteries5020048>
- Deutsches Institut für Normung. (2021a). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen* (DIN EN ISO 14044). Berlin. Beuth.
- Deutsches Institut für Normung. (2021b). *Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen* (DIN EN ISO 14040). Berlin. Beuth.
- de Vries, A. (2019). Renewable energy will not solve Bitcoin’s sustainability problem. *Joule*, 3(4), 893–898. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2019.02.007>
- de Vries, A., Gällersdörfer, U., Klaaßen, L. & Stoll, C. (2022). Revisiting Bitcoin’s carbon footprint. *Joule*, 6(3), 498–502. <https://doi.org/10.1016/j.joule.2022.02.005>
- de Vries, A. & Stoll, C. (2021). Bitcoin’s growing e-waste problem. *Resources, Conservation And Recycling*, 175, 105901. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105901>
- Dehoust, G., Jepsen, D., Knappe, F. & Wilts, H. (2013). *Inhaltliche Umsetzung von Art. 29 der Richtlinie 2008/98/EG: wissenschaftlich-technische Grundlagen für ein bundesweites Abfallvermeidungsprogramm*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/texte\\_38\\_2013\\_abfallvermeidungsprogramm\\_krause\\_bf\\_0\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/texte_38_2013_abfallvermeidungsprogramm_krause_bf_0_0.pdf)
- Dehoust, G., Manhart, A., Dolega, P., Vogt, R., Auberger, A., Kämper, C., von Ackern, P., Rüttinger, L., Rechlin, A. & Priester, M. (2020). *Weiterentwicklung von Handlungsoptionen einer ökologischen Rohstoffpolitik - ÖkoRess II. Abschlussbericht*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-17\\_texte\\_79-2020\\_oeoressii\\_abschlussbericht.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2020-06-17_texte_79-2020_oeoressii_abschlussbericht.pdf)
- Digiconomist. (2022). *Bitcoin Energy Consumption Index*. Digiconomist. <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>
- DIN, DKE & VDI. (2023). *Normungsroadmap Circular Economy*. Deutsches Institut für Normung e. V. <https://www.din.de/de/forschung-und-innovation/themen/circular-economy/normungsroadmap-circular-economy/normungsroadmap-circular-economy-801630>
- Distelkamp, M. & Meyer, M. (2018). *Langfristszenarien und Potenziale zur Ressourceneffizienz in Deutschland im globalen Kontext – quantitative Abschätzungen mit dem Modell GINFORS*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/langfristszenarien-potenziale-zur-0>
- Distelkamp, M. & Meyer, M. (2019). Pathways to a Resource-Efficient and Low-Carbon Europe. *Ecological Economics*, 155, 88–104. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2017.07.014>
- Dittrich, M., Dünnebeil, F., Köppen, S., von Oehsen, A., Vogt, R., Biemann, K., Fehrenbach, H., Ewers, B., Limberger, S., Gerhardt, N., Becker, S., Böttger, D., Frischmuth, F. & Schoer, K. (2020). *Transformationsprozess zum treibhausgasneutralen und ressourcenschonenden Deutschland – GreenEe. Abschlussbericht*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/transaktionsprozess-treibhausgasneutrales-ressourcenschonendes-deutschland-greenee>
- Dubielzig, F. & Schaltegger, S. (2004). *Methoden transdisziplinärer Forschung und Lehre. Ein zusammenfassender Überblick*. Leuphana Universität Lüneburg. [http://fox.leuphana.de/portal/files/1174825/Dubielzig\\_Schaltegger\\_Methoden\\_transdisziplinärer\\_Forschung.pdf](http://fox.leuphana.de/portal/files/1174825/Dubielzig_Schaltegger_Methoden_transdisziplinärer_Forschung.pdf)

- Dunn, J. B., Gaines, L., Barnes, M., Wang, M. & Sullivan, J. (2012). *Material and energy flows in the materials production, assembly, and end-of-life stages of the automotive lithium-ion battery life cycle*.  
<https://doi.org/10.2172/1044525>
- Ellingsen, L. A., Singh, B. & Strømman, A. H. (2016). The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles. *Environmental Research Letters*, 11(5), 054010. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/5/054010>
- EMAS. (2012). *Mit EMAS zu verbesserter Ressourceneffizienz*. Geschäftsstelle des Umweltgutachterausschusses [https://www.emas.de/fileadmin/user\\_upload/4-pub/UGA\\_Infoblatt-Ressourceneffizienz.pdf](https://www.emas.de/fileadmin/user_upload/4-pub/UGA_Infoblatt-Ressourceneffizienz.pdf)
- Emilsson, E. & Dahllöf, L. (2019). Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status 2019 on Energy Use, CO<sub>2</sub> Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling. *IVL Swedish Environmental Research Institute*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29735.70562>
- eSport-Bund Deutschland e. V. (2018, 26. Oktober). *Was ist eSport?* eSport-Bund Deutschland e. V. <https://esportbund.de/themen/>
- Europäische Kommission. (2018). *A circular economy approach for lifecycles of products and services*. *CORDIS | European Commission*. <https://cordis.europa.eu/project/id/776503>
- Europäische Kommission. (2019). *Factsheets zum europäischen Grünen Deal*. Europäische Kommission. [https://commission.europa.eu/publications/factsheets-european-green-deal\\_de](https://commission.europa.eu/publications/factsheets-european-green-deal_de)
- Europäische Kommission. (2020a). Life-cycle optimization of industrial energy efficiency by a distributed control and decision-making automation platform. <https://cordis.europa.eu/project/id/958410>
- Europäische Kommission. (2020b). *Mitteilung COM(2020) 67 final: Gestaltung der digitalen Zukunft Europas*. Europäische Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0067&from=EN>
- Europäische Kommission. (2020c). *Mitteilung COM(2020) 474 final: Widerstandsfähigkeit der EU bei kritischen Rohstoffen: Einen Pfad hin zu größerer Sicherheit und Nachhaltigkeit abstecken*. Europäische Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/PDF/?uri=CELEX:52020DC0474>
- Europäische Kommission. (2021a). Europäische Industriestrategie. [https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy\\_de](https://commission.europa.eu/strategy-and-policy/priorities-2019-2024/europe-fit-digital-age/european-industrial-strategy_de)
- Europäische Kommission. (2021b). *Europäische Kommission – Pressemitteilung: Europas digitale Dekade: Kommission setzt Kurs auf ein digital gestärktes Europa bis 2030*. Europäische Kommission. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/ip\\_21\\_983/IP\\_21\\_983\\_DE.pdf](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/api/files/document/print/de/ip_21_983/IP_21_983_DE.pdf)
- Europäische Kommission. (2022a). Der Grüne Deal: Neue Vorschläge, um nachhaltige Produkte zur Norm zu machen und Europas Ressourcenunabhängigkeit zu stärken. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip\\_22\\_2013](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/ip_22_2013)
- Europäische Kommission. (2022b). Einheitliche Ladegeräte: EU-Ministerrunde erteilt endgültige Zustimmung für einheitliche Ladegeräte. <https://www.consilium.europa.eu/en/press/press-releases/2022/10/24/common-charger-eu-ministers-give-final-approval-to-one-size-fits-all-charging-port/>
- Europäische Kommission. (2023a). *Der Industrieplan für den Grünen Deal: Für Europas CO<sub>2</sub>-neutrale Industrie die Führungsrolle sichern*. Europäische Kommission. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_510](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_510)
- Europäische Kommission. (2023b). *Netto-Null-Industrie-Verordnung: EU soll Hochburg für Cleantech-Fertigung und grüne Arbeitsplätze werden*. Europäische Kommission. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP\\_23\\_1665](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/IP_23_1665)



Europäische Kommission. (2023c). *Recht auf Reparatur: Kommission führt neue Verbraucherrechte für einfache und attraktive Reparaturen ein*. Europäische Kommission.

[https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip\\_23\\_1794](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/ip_23_1794)

Europäische Kommission. (2023d). *RICHTLINIE (EU) 2022/2464 DES EUROPÄISCHEN PARLAMENTS UND DES RATES vom 14. Dezember 2022 zur Änderung der Verordnung (EU) Nr. 537/2014 und der Richtlinien 2004/109/EG, 2006/43/EG und 2013/34/EU hinsichtlich der Nachhaltigkeitsberichterstattung von Unternehmen*. Europäische Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:32022L2464>

Europäische Kommission. (2023e). *Rolling Plan for ICT Standardisation 2023*. Europäische Kommission.

<https://joinup.ec.europa.eu/collection/rolling-plan-ict-standardisation/rolling-plan-2023>

Europäische Kommission. (2023f). *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*. Europäische Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52023PC0160>

Europäisches Parlament & Rat der Europäischen Union. (2009). Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte. <https://eur-lex.europa.eu/LexUriServ/LexUriServ.do?uri=OJ:L:2009:285:0010:0035:de:PDF>

Europäischer Rat. (2023). Rat und Parlament erzielen Einigung über Energieeffizienz-Richtlinie. Europäischer Rat der Europäischen Union. Pressemitteilungen. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/03/10/council-and-parliament-strike-deal-on-energy-efficiency-directive/>

European Environment Agency. (2018). *Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives*. EEA Report No 13/2018. <https://www.eea.europa.eu/publications/electric-vehicles-from-life-cycle>

eurostat. (2022). *Material Fußabdrücke - detaillierte Ergebnisse nach letzter Verwendung von Gütern*. Eurostat. [https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env\\_ac\\_rmefd/default/table?lang=de](https://ec.europa.eu/eurostat/databrowser/view/env_ac_rmefd/default/table?lang=de)

Fischer, C., Moch, K., Prakash, S., Teufel, J., Stieß, I., Kresse, S. & Birzle-Harder, B. (2019). *Nachhaltige Produkte – attraktiv für Verbraucherinnen und Verbraucher? Eine Untersuchung am Beispiel von elektronischen Kleingeräten, Funktionsbekleidung, Möbeln und Waschmitteln*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19\\_texte\\_11-2019\\_nachhaltige-produkte.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2019-02-19_texte_11-2019_nachhaltige-produkte.pdf)

Flach, L., Gröschl, J. K., Steininger, M. G., Teti, F. & Baur, A. (2021). *Internationale Wertschöpfungsketten - Reformbedarf und Möglichkeiten*. Studie im Auftrag der Konrad-Adenauer-Stiftung e.V. <https://www.ifo.de/DocDL/ifoStudie-2021-KAS-Wertschoepfungsketten.pdf>

Flachmann, C., Junglewitz, G., Maier, L., Mayer, H. & Schuh, M.-D. (2020). *Umweltökonomische Gesamtrechnungen. Methode der Berechnungen zur globalen Umweltinanspruchnahme durch Produktion, Konsum und Importe*. Statistisches Bundesamt. [https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/ueberblick/Publicationen/Downloads/ugr-globale-umweltinanspruchnahme-methode-5851102209004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/ueberblick/Publicationen/Downloads/ugr-globale-umweltinanspruchnahme-methode-5851102209004.pdf?__blob=publicationFile)

Fluchs, S. & Neligan, A. (2023). *Urban Mining für eine zirkuläre Wirtschaft: Wie hoch sind die Rohstoffpotenziale durch Urban Mining?* IW-Report, Nr. 2/2023.

<https://www.econstor.eu/bitstream/10419/268408/1/1831561263.pdf>

- Franke, J. & Gailhofer, P. (2022). *Analyse der Zusammenhänge zwischen Datensouveränität und Nachhaltigkeit*. CO:DINA Forschungslinie Digitale Souveränität und Nachhaltigkeit. [https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/CODINA\\_Kurzstudie\\_Datensouveraenitaet-und-Nachhaltigkeit.pdf](https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/CODINA_Kurzstudie_Datensouveraenitaet-und-Nachhaltigkeit.pdf)
- Freitag, C., Berners-Lee, M., Widdicks, K., Knowles, B., Blair, G. S. & Friday, A. (2021). The real climate and transformative impact of ICT: A critique of estimates, trends, and regulations. *Patterns*, 2(9), 100340. <https://doi.org/10.1016/j.patter.2021.100340>
- Frenkel, M., John, K. D. & Fendel, R. (2022). *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnung* (9. Auflage). Vahlen.
- Gallersdörfer, U., Klaaßen, L. & Stoll, C. (2020). Energy Consumption of Cryptocurrencies Beyond Bitcoin. *Joule*, 4(9), 1843–1846. <https://doi.org/10.1016/J.JOULE.2020.07.013>
- Game. (2019). *Fokus eSports*. Verband der deutschen Games-Branche e.V. [https://www.game.de/wp-content/uploads/2019/08/2019-08-16\\_Gesamtdokument\\_game-Fokus-eSports.pdf](https://www.game.de/wp-content/uploads/2019/08/2019-08-16_Gesamtdokument_game-Fokus-eSports.pdf)
- Global e-Sustainability Initiative. (2010). *Evaluating the carbon- reducing impacts of ICT An assessment methodology*. Global e-Sustainability Initiative (GeSI). <https://www.gesi.org/research/evaluating-the-carbon-reducing-impacts-of-ict-an-assessment-methodology>
- Global e-Sustainability Initiative. (2012). *GeSI SMARTer 2020: The Role of ICT in Driving a Sustainable Future*. Global e-Sustainability Initiative (GeSI). <https://smartnet.niua.org/sites/default/files/resources/SMARTer%202020%20-%20The%20Role%20of%20ICT%20in%20Driving%20a%20Sustainable%20Future.pdf>
- Global e-Sustainability Initiative. (2015). *#SMARTer2030-ICT Solutions for 21st Century Challenges*. Global e-Sustainability Initiative (GeSI). [https://smarter2030.gesi.org/downloads/Full\\_report.pdf](https://smarter2030.gesi.org/downloads/Full_report.pdf)
- Global Gaming. (2022, 1. September). *All about bandwidth usage per hour in League of Legends*. Global Gaming. <https://theglobalgaming.com/lol/bandwidth-usage>
- Golde, M. (2016). *Rebound-Effekte Empirische Ergebnisse und Handlungsstrategien*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rebound-effekte\\_empirische\\_ergebnisse\\_und\\_handlungsstrategien\\_hintergrundpapier.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rebound-effekte_empirische_ergebnisse_und_handlungsstrategien_hintergrundpapier.pdf)
- Gossen, M., Pentzien, J. & Peuckert, J. (2019). What use is it really for sustainability? Potentials and impacts of peer-to-peer sharing in the domains of accommodation and mobility. *Sustainability Management Forum | Nachhaltigkeitsmanagementforum*, 27(2), 125–138. <https://doi.org/10.1007/s00550-019-00488-8>
- Gray, A. (2018, 13. Juli). *The explosive growth of eSports | World Economic Forum*. World Economic Forum. <https://www.weforum.org/agenda/2018/07/the-explosive-growth-of-esports/>
- Green Electronics Council. (2020). *State of Sustainability Research: Health and Wellness Wearable Electronic Devices*. GEC. <https://globalelectronicscouncil.org/wp-content/uploads/WearablesSOSRFinalDraftForPublicComment16Dec2020withDataPrivacy-1.pdf>
- Gröger, J. (2020). *Digitaler CO<sub>2</sub>-Fußabdruck - Datensammlung zur Abschätzung von Herstellungsaufwand, Energieverbrauch und Nutzung digitaler Endgeräte und Dienste*. Öko Institut e.V. <https://www.oeko.de/publikation/digitaler-co2-fussabdruck/>
- Gröger, J., Liu, R., Stobbe, L., Druschke, J. & Richter, N. (2021). *Green cloud computing - Lebenszyklusbasierte Datenerhebung zu Umweltwirkungen des Cloud Computing*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/green-cloud-computing>
- Grüning, C., García, B., van Ackern, P., Kriege, K., Weiss, D., Jentsch, T., Jungmichel, N. & Veneziano, S. (2023). *Umweltrisiken und -auswirkungen in globalen Lieferketten deutscher Unternehmen Branchenstudie Maschinenbau*. Umweltbundesamt.

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023-04-14\\_texte\\_55-2023\\_umweltrisiken-lieferketten\\_maschinenbau.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2023-04-14_texte_55-2023_umweltrisiken-lieferketten_maschinenbau.pdf)

Grünwald, R. & Caviezel, C. (2022). Energieverbrauch der IKT-Infrastruktur. Endbericht zum TA-Projekt. TAB-Arbeitsbericht Nr. 198. <https://publikationen.bibliothek.kit.edu/1000151164>

Günther, J., Lehmann, H., Lorenz, U. & Purr, K. (2019). *Den Weg zu einem treibhausgasneutralen Deutschland ressourcenschonend gestalten*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/den-weg-zu-einem-treibhausgasneutralen-deutschland>

Hardi, L. & Wagner, U. (2019). Grocery Delivery or Customer Pickup—Influences on Energy Consumption and CO2 Emissions in Munich. *Sustainability*, 11(3), 641. <https://doi.org/10.3390/su11030641>

Hauschild, M. Z. (2017). Introduction to LCA Methodology. *Springer eBooks* (S. 59–66). [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3\\_6](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_6)

Helmholtz-Zentrum für Umweltforschung GmbH - UFZ. (2022). *About the GoST Project*. Governance of Sociotechnical Transformations (GoST). <https://www.ufz.de/gost/index.php?en=46184>

Hern, A. (2021, 17. September). *Waste from one bitcoin transaction 'like binning two iPhones'*. The Guardian. <https://www.theguardian.com/technology/2021/sep/17/waste-from-one-bitcoin-transaction-like-binning-two-iphones>

Hilty, L. M., Arnfalk, P., Erdmann, L., Goodman, J., Lehmann, M. & Wäger, P. A. (2006). The relevance of information and communication technologies for environmental sustainability - A prospective simulation study. *Environmental Modelling and Software*, 21(11), 1618–1629. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2006.05.007>

Hilty, L. & Aebischer, B. (2015). ICT Innovations for Sustainability. *Advances in intelligent systems and computing*. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-09228-7>

Hilty, L., Lohmann, W., Behrendt, S., Evers-Wölk, M., Fichter, K. & Hintemann, R. (2015). *Grüne Software. Ermittlung und Erschließung von Umweltschutzpotenzialen der Informations- und Kommunikationstechnik (Green IT). TV 3: Potenzialanalyse zur Ressourcenschonung optimierter Softwareentwicklung und -einsatz*. Umweltbundesamt. <http://www.umweltbundesamt.de/publikationen/gruene-software>

Hintemann, R. (2018). *Boom führt zu deutlich steigendem Energiebedarf der Rechenzentren in Deutschland im Jahr 2017*. Borderstep Institut. [https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2018/12/Borderstep-Rechenzentren-2017-final-Stand-Dez\\_2018n.pdf](https://www.borderstep.de/wp-content/uploads/2018/12/Borderstep-Rechenzentren-2017-final-Stand-Dez_2018n.pdf)

Hintemann, R. & Fichter, K. (2010). *Materialbestand der Rechenzentren in Deutschland - Eine Bestandsaufnahme zur Ermittlung von Ressourcen- und Energieeinsatz*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4037.pdf>

Hintemann, R., Hinterholzer, S., Graß, M. & Grothey, T. (2022). Rechenzentren in Deutschland 2021. Aktuelle Marktentwicklungen, Stand 2022. Bitkom. <https://www.bitkom.org/sites/main/files/2022-02/10.02.22-studie-rechenzentren.pdf>

Hollasch, K. & Sahl, N. (2021). *German Watch Study 2021: Einstellungen und Präferenzen deutscher Uhrenkonsumenten*. Deloitte. <https://www2.deloitte.com/de/de/pages/consumer-business/articles/german-watch-study-2021.html>

Hülsmann, F., Wiepking, J., Zimmer, W., Sunderer, G., Götz, K. & Sprinke, Y. (2018). *share – Wissenschaftliche Begleitforschung zu car2go mit batterieelektrischen und konventionellen Fahrzeugen. Abschlussbericht*. Öko-Institut e.V. <https://www.oeko.de/fileadmin/oekodoc/share-Wissenschaftliche-Begleitforschung-zu-car2go-mit-batterieelektrischen-und-konventionellen-Fahrzeugen.pdf>

- Informationszentrum Mobilfunk.de. (2022). *Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz bei Mobiltelefonen – Factsheet*. Informationszentrum Mobilfunk.de. <https://www.informationszentrum-mobilfunk.de/download/factsheet-nachhaltigkeit-und-ressourceneffizienz-bei-mobiltelefonen/>
- Itten, R., Hirschier, R., Andrae, A. S. G., Bieser, J. C. T., Cabernard, L., Falke, A., Ferreboeuf, H., Hilty, L. M., Keller, R. L., Lees-Perasso, E., Preist, C. & Stucki, M. (2020). Digital transformation—life cycle assessment of digital services, multifunctional devices and cloud computing. *International Journal of Life Cycle Assessment*, 25(10), 2093–2098. <https://doi.org/10.1007/s11367-020-01801-0>
- ITU. (2019). *Turning digital innovation into climate action*. International Telecommunication Union. <https://www.itu.int/en/publications/Documents/tsb/2019-Turning-digital-technology-innovation-into-climate-action/mobile/index.html#p=1>
- Jacob, K., Werland, S., Graaf, L., Hirschnitz-Garbers, M., Langsdorf, S., Hinzmann, M., Bergmann, D., Lehr, T., Meyer, M., Scholl, G., Schulze, F., Hermann, A., Keimeyer, F., Bringezu, S., Bahn-Walkowiak, B. & Wilts, H. (2015). *PolRes – Endbericht. Innovationsorientierte Ressourcenpolitik in planetaren Grenzen*. [https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6310/file/6310\\_PolRes.pdf](https://epub.wupperinst.org/frontdoor/deliver/index/docId/6310/file/6310_PolRes.pdf)
- Jacob, K., Postpischil, R., Graaf, L. Keimeyer, F. & Hirschnitz-Garbers, M. (2019). *PolRes 2 – Abschlussbericht. Governance einer effizienten und nachhaltigen Ressourcennutzung*. <https://refubium.fu-berlin.de/bitstream/handle/fub188/25791/Jacob%20Postpischil%20et%20al.%202019%20Abschlussbericht%20PolRes%20II.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Kahlenborn, W., Keppner, B., Uhle, C., Richter, S. & Jetzke, T. (2018). *Die Zukunft im Blick: Konsum 4.0: Wie Digitalisierung den Konsum verändert Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/fachbroschuere\\_konsum\\_4.0\\_barrierefrei\\_190322.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/fachbroschuere_konsum_4.0_barrierefrei_190322.pdf)
- Kassenböhmer, C., Graf, L., Postpischil, R. & Jacob, K. (2019). *Digitalisierung und Ressourcenpolitik: Analyse des Diskurses zu Potenzialen und Risiken der Digitalisierung für die Ressourcenpolitik. Debattenanalyse im Projekt Ressourcenpolitik 2 (PolRes 2)*. Ressourcenpolitik. [https://www.ressourcenwende.net/wp-content/uploads/2020/02/Debattenanalyse-Digitalisierung-Ressourcenpolitik\\_fin.pdf](https://www.ressourcenwende.net/wp-content/uploads/2020/02/Debattenanalyse-Digitalisierung-Ressourcenpolitik_fin.pdf)
- Kaumanns, S. C. & Lauber, U. (2016). *Rohstoffe für Deutschland - Bedarfsanalyse für Konsum, Investition und Export auf Makro- und Mesoebene*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/rohstoffe\\_fur\\_deutschland.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1968/publikationen/rohstoffe_fur_deutschland.pdf)
- Kelly, J. G., Dai, Q. & Wang, M. (2020). Globally regional life cycle analysis of automotive lithium-ion nickel manganese cobalt batteries. *Mitigation And Adaptation Strategies For Global Change*, 25(3), 371–396. <https://doi.org/10.1007/s11027-019-09869-2>
- Keppner, B., Kahlenborn, W., Richter, S., Jetzke, T., Lessmann, A. & Bovenschulte, M. (2018). *Die Zukunft im Blick: 3D-Druck - Trendbericht zur Abschätzung der Umweltwirkungen*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/fachbroschuere\\_3d\\_barrierefrei\\_180619.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/fachbroschuere_3d_barrierefrei_180619.pdf)
- Köhler, A. R., Gröger, J. & Liu, R. (2018). *Energie- und Ressourcenverbräuche der Digitalisierung*. Ökoinstitut. [https://www.wbgu.de/fileadmin/user\\_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2019/pdf/Expertise\\_Oekoinstitut.pdf](https://www.wbgu.de/fileadmin/user_upload/wbgu/publikationen/hauptgutachten/hg2019/pdf/Expertise_Oekoinstitut.pdf)
- Köhn, M., Gröger, J. & Stobbe, L. (2020). *Energie- und Ressourceneffizienz digitaler Infrastrukturen: Ergebnisse des Forschungsprojektes „Green Cloud-Computing“*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/energie-ressourceneffizienz-digitaler>

- Kosmol, J., Kanthak, J., Herrmann, F., Golde, M., Alsleben, C., Penn-Bressler, G., Schmitz, S. & Gromke, U. (2012). *Glossar zum Ressourcenschutz*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4242.pdf>
- Kristof, K. & Hennicke, P. (2010). „*Materialeffizienz und Ressourcenschonung*“ – *Kernergebnisse des Projekts MaRes*. Wuppertal Institut für Klima, Umwelt, Energie. <https://epub.wupperinst.org/frontdoor/index/index/docid/4468>
- Kurzweil, A., Raimund, W., Wedler, M., Ansbacher, P., Katona, J., Krautscheid, T. & Schober, A. (2023). *Ökologische Wirkungsanalyse kommunaler, nicht-investiver Maßnahmen im Verkehr*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-wirkungsanalyse-kommunaler-nicht>
- LeagueFeed. (2023, 25. Dezember). *How Many People Play League of Legends? – League of Legends Player Count in 2023 (September)*. LeagueFeed. <https://leaguefeed.net/did-you-know-total-league-of-legends-player-count-updated/>
- Lehr, U., Edler, D., Ulrich, P., Blazejczak, J. & Lutz, C. (2019). *Beschäftigungschancen auf dem Weg zu einer Green Economy – szenarienbasierte Analyse von (Netto-) Beschäftigungswirkungen*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/beschaefigungschancen-auf-dem-weg-zu-einer-green>
- Lehr, U., Mönnig, A., Wolter, M. I., Lutz, C., Schade, W. & Krail, M. (2011). Die Modelle ASTRA und PANTA RHEI zur Abschätzung gesamtwirtschaftlicher Wirkungen umweltpolitischer Instrumente - ein Vergleich. *RePEc: Research Papers in Economics*. <https://www.econstor.eu/bitstream/10419/94435/1/gws-paper11-4.pdf>
- Lell, O., Muster, V., Thorun, C. & Gossen, M. (2020). *Förderung des nachhaltigen Konsums durch digitale Produktinformationen: Bestandsaufnahme und Handlungsempfehlungen*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/foerderung-des-nachhaltigen-konsums-durch-digitale>
- Lenzen, M., Geschke, A., Rahman, M. D. A., Xiao, Y., Fry, J., Reyes, R. C., Dietzenbacher, E., Inomata, S., Kanemoto, K., Los, B., Moran, D., Bäumen, H. S. I. D., 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. <https://doi.org/10.1080/09535314.2017.1301887>
- Lenzen, M., Geschke, A., West, J., Fry, J., Malik, A., Giljum, S., Canals, L. M. I., Piñero, P., Lutter, S., Wiedmann, T., Li, M., Sevenster, M. N., 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. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00811-6>
- Lenzen, M., Pade, L. & Munksgaard, J. (2004). CO<sub>2</sub>Multipliers in multi-region Input-Output models. *Economic Systems Research*, 16(4), 391–412. <https://doi.org/10.1080/0953531042000304272>
- 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”*. Öko-Institut. [https://www.researchgate.net/profile/Franziska-Wolff-2/publication/342039732\\_Impacts\\_of\\_the\\_digital\\_transformation\\_on\\_the\\_environment\\_and\\_sustainability/links/602819c7299bf1cc26c4154a/Impacts-of-the-digital-transformation-on-the-environment-and-sustainability.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Franziska-Wolff-2/publication/342039732_Impacts_of_the_digital_transformation_on_the_environment_and_sustainability/links/602819c7299bf1cc26c4154a/Impacts-of-the-digital-transformation-on-the-environment-and-sustainability.pdf)
- LkSG - Lieferkettensorgfaltspflichtengesetz. (2021). <https://www.gesetze-im-internet.de/lksg/LkSG.pdf>
- L’Observatoire Cetelem. (2022). *Circular Economy: The rise of the consumer entrepreneur*. L’Observatoire Cetelem. [https://observatoirecetelem.com/app/uploads/sites/2/2022/02/obs\\_conso\\_2022\\_210x210\\_gb-complete.pdf](https://observatoirecetelem.com/app/uploads/sites/2/2022/02/obs_conso_2022_210x210_gb-complete.pdf)
- Ludmann, S. (2018). *Ökologie des Teilens. Bilanzierung der Umweltwirkungen des Peer-to-Peer Sharing. PeerSharing Arbeitsbericht, 8*.

- Lutter, S., Giljum, S., Lieber, M. & Manstein, C. (2016). *Die Nutzung natürlicher Ressourcen: Bericht für Deutschland 2016*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/deuess16\\_bericht\\_de\\_we\\_b\\_f.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/3521/publikationen/deuess16_bericht_de_we_b_f.pdf)
- Lutter, S., Kreimel, J., Giljum, S., Dittrich, M., Limberger, S., Ewers, B. & Schoer, K. (2023). *Ressourcennutzung in Deutschland: Weiterentwicklung des deutschen Ressourcenberichts 2022 - Datengrundlagen*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ressourcennutzung-in-deutschland-weiterentwicklung>
- Lutter, S., Giljum, S., Gözet, B., Wieland, H. & Manstein, C. (2018). *Die Nutzung natürlicher Ressourcen: Bericht für Deutschland 2018*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/die-nutzung-natuerlicher-ressourcen-bericht-fuer>
- Lutter, S., Kreimel, J., Giljum, S., Dittrich, M., Limberger, S., Ewers, B., Schoer, K. & Manstein, C. (2022). *Die Nutzung natürlicher Ressourcen: Ressourcenbericht für Deutschland 2022. Spezial: Rohstoffnutzung der Zukunft*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/ressourcenbericht2022>
- Lutz, C., Meyer, B. & Wolter, M. I. (2010). The Global Multisector/Multicountry 3E-Model GINFORS. A Description of the Model and a Baseline Forecast for Global Energy Demand and CO<sub>2</sub>-Emissions. *International Journal of Global Environmental Issues*, 10(1–2), 25–45.
- Maier, L. (2018). Rohstoffe weltweit im Einsatz für Deutschland: Berechnung von Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten. *Statistisches Bundesamt - WISTA (2)*. pp. 23–36.
- Malmodin, J., Bergmark, P. & Matinfar, S. (2018). A high-level estimate of the material footprints of the ICT and the E&M sector. *EPIC Series in Computing*. <https://doi.org/10.29007/q5fw>
- Malmodin, J. & Lundén, D. (2018). The energy and carbon footprint of the global ICT and E & M sectors 2010-2015. *Sustainability*, 10(9), 3027. <https://doi.org/10.3390/su10093027>
- Malmodin, J., Lundén, D., Moberg, Å., Andersson, G. & Nilsson, M. (2014). Life Cycle Assessment of ICT. *Journal Of Industrial Ecology*, 18(6), 829–845. <https://doi.org/10.1111/jiec.12145>
- Manhart, A., Blepp, M., Fischer, C., Graulich, K., Prakash, S., Priess, R., Schleicher, T. & Tür, M. (2016). *Resource Efficiency in the ICT Sector*. Greenpeace. [https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/20161109\\_oeko\\_resource\\_efficiency\\_final\\_full-report.pdf](https://www.greenpeace.de/sites/www.greenpeace.de/files/publications/20161109_oeko_resource_efficiency_final_full-report.pdf)
- Meyer, M., Distelkamp, M. & Lutz, C. (2021). *Globale Fußabdrücke der Umweltinanspruchnahme: Aktuelle Methoden und Datensätze*. GWS Discussion Paper, No. 2021/3.
- Milde, K., Klose, A., Böbel, M., Lückcrath, D., Abraham, V., Kirchdorfer, R., Aigner, J., Albus, N., Meyer, M., Philippi, A., Haack, D. & Manstein, C. (2023). Digitalisierung und natürliche Ressourcen. Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland (DigitalRessourcen). Im Auftrag des Umweltbundesamtes. [www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen](http://www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen) (in Erscheinung).
- Moberg, A., Johansson, M., Finnveden, G. & Jonsson, A. (2007). Screening environmental life cycle assessment of printed, internet-based and tablet e-paper newspaper. *Advances in Printing and Media Technology, Vol Xxxiv*, 34, 419–429.
- 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. <https://doi.org/10.3390/resources8020061>
- Naumann, S., Kern, E., Guldner, A. & Gröger, J. (2021). *Umweltzeichen Blauer Engel für ressourcen- und energieeffiziente Softwareprodukte: Hintergrundbericht zur Entwicklung der Vergabekriterien DE-UZ 215*,

Ausgabe Januar 2020. Umweltbundesamt.

[https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte\\_119-2021\\_umweltzeichen\\_blauer\\_engel\\_fuer\\_ressourcenund\\_energieeffiziente\\_softwareprodukte.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/479/publikationen/texte_119-2021_umweltzeichen_blauer_engel_fuer_ressourcenund_energieeffiziente_softwareprodukte.pdf)

Neligan, A., Engels, B., Schaefer, T., Schleicher, C., Fritsch, M., Schmitz, E. & Wiegand, R. (2021). *Digitalisierung als Enabler für Ressourceneffizienz in Unternehmen*. Gutachten im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie. <https://www.iwkoeln.de/studien/adriana-neligan-digitalisierung-als-enabler-fuer-ressourceneffizienz-in-unternehmen.html>

Neumann, K. (2020). IKT - Szenarete - Bericht zur systemdynamischen Modellierung der Entwicklung des Energiebedarfs und der Ressourcen-Inanspruchnahme des IKT Bereichs (AP 4 des RTD Projekts, unveröffentlicht).

Newman, N., Fletcher, R., Robertson, C. T., Eddy, K. & Kleis Nielsen, R. (2022). *Reuters Institute Digital News Report 2022*. Reuters Institute for the Study of Journalism. <https://reutersinstitute.politics.ox.ac.uk/digital-news-report/2022>

Niemeyer, F., Ehrhardt, M. & Mennenga, M. (2022). Ökobilanzierung in KMU: Ein KMU-gerechter Wegweiser in Richtung Klimaneutralität. Mittelstand-Digital Magazin Wissenschaft Trifft Praxis, Sonderausgabe Nachhaltigkeit.

Oberle, B., Bringezu, S., Hatfield-Dodds, S., Hellweg, S., Schandl, H. & Clement, J. (2019). *Global Resources Outlook 2019: Natural Resources for the Future We Want*. International Resource Panel. <https://www.resourcepanel.org/reports/global-resources-outlook>

OECD. (2007). International Standard Industrial Classification of All Economic Activities Revision 4, Series M. *Miscellaneous Statistical Papers, No. 4 Rev. 4*. United Nations Statistics Division.

OECD. (2009) Information Economy Product Definitions Based on the Central Product Classification (version 2). *OECD Digital Economy Papers*. <https://doi.org/10.1787/222222056845>

OECD. (2011). OECD Guide to Measuring the Information Society 2011 In *OECD eBooks*. <https://doi.org/10.1787/9789264113541-en>

OECD. (2018). Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences. In *OECD Books*. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>

Ostertag, K., Bratan, T., Gandenberger, C., Hüsing, B. & Pfaff, M. (2021a). *Ressourcenschonung im Gesundheitssektor - Erschließung von Synergien zwischen den Politikfeldern Ressourcenschonung und Gesundheit*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/ressourcenschonung-im-gesundheitssektor>

Ostertag, K., Pfaff, M., Jacob, K., Postpischil, R., Zorzawy, F., Reuster, L. & Glöser-Chahoud, S. (2021b). Optionen für ökonomische Instrumente des Ressourcenschutzes. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/optionen-fuer-oekonomische-instrumente-des>

Pagano, D. & Krause, G. (2019). *Umweltmanagement und Digitalisierung-Praktische Ansätze zur Verbesserung der Umweltleistung*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/uba-broschuere\\_umweltmanagement\\_und\\_digitalisierung\\_final\\_bf.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/uba-broschuere_umweltmanagement_und_digitalisierung_final_bf.pdf)

Pauliuk, S. (2022). Characterization factors for material flow accounting (material footprint) for process-based LCA-Documentation for ecoinvent 3.7.1 and 3.8 in openLCA D. *Industrial Ecology Freiburg (IEF) Working Papers, Band 2022/3*. <https://doi.org/10.6094/UNIFR/226265>

Pfaff, M. & Walz, R. (2020). Analysis of the development and structural drivers of raw-material use in Germany. *Journal Of Industrial Ecology*, 25(4), 1063–1075. <https://doi.org/10.1111/jiec.13089>

- Pohl, J., Frick, V., Hoefner, A., Santarius, T. & Finkbeiner, M. (2021). Environmental saving potentials of a smart home system from a life cycle perspective: How green is the smart home? *Journal Of Cleaner Production*, 312, 127845. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.127845>
- Prakash, S., Baron, Y., Liu, R., Proske, M., Schlösser, A., Ran, L., Proske, M. & Schlösser, A. (2014). *Study on the practical application of the new framework methodology for measuring the environmental impact of ICT – cost/benefit analysis – Final report*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2759/51430>
- Prakash, S., Antony, F., Köhler, A. R. & Liu, R. (2016). *Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC)*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/oekologische-oekonomische-aspekte-beim-vergleich>
- Prakash, S., Gensch, C.-O., Dehoust, G., Antony, F., Stuber-Rousselle, K., Löw, C., Betz, J., Herbst, A., Loibl, A., Pfaff, M., Jacob, K. & Fiala, V. (2022). *Modell Deutschland Circular Economy: Machbarkeitsstudie im Auftrag des WWF Deutschland*. WWF Deutschland. <https://www.wwf.de/fileadmin/fm-wwf/Publikationen-PDF/Unternehmen/Machbarkeitsstudie-Modell-Deutschland-CE-Endbericht.pdf>
- Purr, K., Günther, J., Lehmann, H. & Nuss, P. (2019). *Wege in eine ressourcenschonende Treibhausgasneutralität – RESCUE-Studie*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/rescue>
- Ramesohl, S., Bauer, S., von Geibler, J., Gnanko, T., Gröne, K., Großklaus, M., Wirtz, J., Wulf, N. & Wurm, D. (2023). *CO:DINA „Transformationsroadmap Digitalisierung und Nachhaltigkeit“*. IZT und Wuppertal Institut. [https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/Ramesohl-et-al-2023\\_CODINA-Transformationsreport.pdf](https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/Ramesohl-et-al-2023_CODINA-Transformationsreport.pdf)
- Ramesohl, S. & Fritzsche, K. (2021). *Neues Ministerium oder neue Politik? Ein Digitalministerium muss Teil der sozial-ökologischen Transformationsagenda sein*. <https://codina-transformation.de/positionspapier-3-neues-ministerium-oder-neue-politik/>
- Rat der Europäischen Union. (2023, 10. Juli). *Batterien und Altbatterien: Rat nimmt neue Verordnung an*. Rat der EU und des Europäischen Rates. <https://www.consilium.europa.eu/de/press/press-releases/2023/07/10/council-adopts-new-regulation-on-batteries-and-waste-batteries/>
- RENN.west. (2021). *Was macht eine gute Nachhaltigkeitsstrategie aus?* RENN.west. [https://ziele-brauchen-taten.de/wp-content/uploads/2022/01/RW\\_Broschuere\\_Nachhaltigkeitsstrategien\\_210x210\\_WEB-PDF\\_Einzelseiten.pdf](https://ziele-brauchen-taten.de/wp-content/uploads/2022/01/RW_Broschuere_Nachhaltigkeitsstrategien_210x210_WEB-PDF_Einzelseiten.pdf)
- Rivera, M. B., Håkansson, C., Svenfelt, Å. & Finnveden, G. (2014). Including second order effects in environmental assessments of ICT. *Environmental Modelling And Software*, 56, 105–115. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2014.02.005>
- Rizos, V., Bryhn, J., Alessi, M., Campmas, A. & Zarra, A. (2019). Identifying the impact of the circular economy on the Fast-Moving Consumer Goods Industry: opportunities and challenges for businesses, workers and consumers – mobile phones as an example. In *European Economic and Social Committee*. <https://doi.org/10.2864/08334>
- Santarius, T., Bieser, J., Frick, V., Höjer, M., Gossen, M., Hilty, L. M., Kern, E., Pohl, J., Rohde, F. & Lange, S. (2022). Digital sufficiency: conceptual considerations for ICTs on a finite planet. *Annals Of Telecommunications*, 78(5–6), 277–295. <https://doi.org/10.1007/s12243-022-00914-x>
- Sattlegger, L., Deppisch, L. & Rudolphi, M. (2019) Methoden umweltsoziologischer Forschung. Tagungsband der 15. Tagung der Nachwuchsgruppe Umweltsoziologie. [https://www.isoe-publikationen.de/publikationen/publikation-detail/?tx\\_refman\\_pi1%5Brefman%5D=2035&cHash=e5167a2f4f4c1ac99f94b475a0d4d84e](https://www.isoe-publikationen.de/publikationen/publikation-detail/?tx_refman_pi1%5Brefman%5D=2035&cHash=e5167a2f4f4c1ac99f94b475a0d4d84e)



- Schandl, H., Fischer-Kowalski, M., West, J., Giljum, S., Dittrich, M., Eisenmenger, N., Geschke, A., Lieber, M., Wieland, H., Schaffartzik, A., Krausmann, F., Gierlinger, S., Hosking, K., Lenzen, M., Tanikawa, H., Miatto, A. & Fishman, T. (2017). Global Material Flows and Resource Productivity: Forty Years of Evidence. *Journal Of Industrial Ecology*, 22(4), 827–838. <https://doi.org/10.1111/jiec.12626>
- Scher, R. (2022). *As cryptocurrency becomes mainstream, its carbon footprint can't be ignored*. DownToEarth. <https://www.downtoearth.org.in/blog/environment/as-cryptocurrency-becomes-mainstream-its-carbon-footprint-can-t-be-ignored-81118>
- Schödwell, B. & Zarnekow, R. (2018). *Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-23\\_texte\\_19-2018\\_ressourceneffizienz-rechenzentren.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-23_texte_19-2018_ressourceneffizienz-rechenzentren.pdf)
- Schoer, K., Weinzettel, J., Kovanda, J., Giegrich, J. & Lauwigi, C. (2012). Raw Material Consumption of the European Union – Concept, Calculation Method, and Results. *Environmental Science & Technology*, 46(16), 8903–8909. <https://doi.org/10.1021/es300434c>
- Schoer, K., Wood, R., Arto, I. & Weinzettel, J. (2013). Estimating Raw Material Equivalents on a Macro-Level: Comparison of Multi-Regional Input–Output Analysis and Hybrid LCI-IO. *Environmental Science & Technology*, 47(24), 14282–14289. <https://doi.org/10.1021/es404166f>
- Schoer, K., Dittrich, M., Limberger, S., Ewers, B., Kovanda, J. & Weinzettel, J. (2021) *Disaggregating input-output tables for the calculation of raw material footprints: Minimum requirements, possible methods, data sources and a proposed method for Eurostat – 2021 edition*. Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2785/088421>
- Schoer, K., Dittrich, M., Kovanda, J., Weinzettel, J., Ewers, B., Limberger, S., Moll, S., Baptista, N. & Bouwmeester, M. (2022). *Documentation of the EU RME model*. Eurostat.
- Schütte, P. (2021). *Tantal. Informationen zur Nachhaltigkeit*. Bundesanstalt für Geowissenschaften und Rohstoffe. [https://www.geozentrum-hannover.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen\\_Nachhaltigkeit/tantal.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=2](https://www.geozentrum-hannover.de/DE/Gemeinsames/Produkte/Downloads/Informationen_Nachhaltigkeit/tantal.pdf?__blob=publicationFile&v=2)
- Semmling, E., Peters, A., Marth, H., Kahlenborn, W. & de Haan, P. (2016). *Rebound-Effekte: Wie können sie effektiv begrenzt werden?* Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rebound-effekte\\_wie\\_koennen\\_sie\\_effektiv\\_begrenzt\\_werden\\_handbuch.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/rebound-effekte_wie_koennen_sie_effektiv_begrenzt_werden_handbuch.pdf)
- Siragusa, C. & Tumino, A. (2021). E-grocery: comparing the environmental impacts of the online and offline purchasing processes. *International Journal Of Logistics: Research And Applications*, 25(8), 1164–1190. <https://doi.org/10.1080/13675567.2021.1892041>
- Speight, J. (2018, 02. August). *Germany to recognize eSports as an official sport*. Deutsche Welle. <https://www.dw.com/en/germany-to-recognize-esports-as-an-official-sport/a-42509285>
- Stadler, K., Wood, R., Bulavskaya, T., Södersten, C., Simas, M., Schmidt, S., Usubiaga, A., Acosta-Fernández, J., Kuenen, J., Brückner, M., Giljum, S., Lutter, S., Merciai, S., Schmidt, J. H., Theurl, M. C., Plutzar, C., Kastner, T., Eisenmenger, N., Erb, K., . . . Tukker, A. (2018). EXIOBASE 3: Developing a Time Series of Detailed Environmentally Extended Multi-Regional Input-Output Tables. *Journal Of Industrial Ecology*, 22(3), 502–515. <https://doi.org/10.1111/jiec.12715>
- Stadler, K., Wood, R., Bulavskaya, T., Södersten, C.-J., Simas, M., Schmidt, S., Usubiaga, A., Acosta-Fernández, J., Kuenen, J., Bruckner, M., Giljum, S., Lutter, S., Merciai, S., Schmidt, J. H., Theurl, M. C., Plutzar, C., Kastner, T.,

- Eisenmenger, N., Erb, K.-H., ... Tukker, A. (2020). EXIOBASE 3 (3.8) [Data set]. *Zenodo*.  
<https://doi.org/10.5281/zenodo.4277368>
- Statista. (2021a). *Auf welchen der folgenden Endgeräte nutzen Sie Video-Streaming?* Statista.  
<https://de.statista.com> (Stand: 10. November 2021).
- Statista. (2021b). *Umsatz mit Lebensmitteln im deutschen Online-Handel bis 2021*. Statista.  
<https://de.statista.com> (Stand: 10. November 2021).
- Statista. (2021c). *Videotelefonie - Nutzungsverhalten während der Corona-Pandemie*. Statista  
<https://de.statista.com> (Stand: 10. November 2021).
- Statista. (2022). *C2C-E-Commerce*. Statista. <https://de.statista.com> (Stand: 15. Dezember 2022).
- Statistisches Bundesamt. (2008). *Klassifikation der Wirtschaftszweige - (WZ 2008)*. Destatis.  
[https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Gueter-Wirtschaftsklassifikationen/Downloads/klassifikation-wz-2008-3100100089004-aktuell.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Methoden/Klassifikationen/Gueter-Wirtschaftsklassifikationen/Downloads/klassifikation-wz-2008-3100100089004-aktuell.pdf?__blob=publicationFile)
- Statistisches Bundesamt. (2021). *Umweltökonomische Gesamtrechnungen: Gesamtwirtschaftliches Materialkonto - Berichtszeitraum 1994 - 2019/2020*. Destatis.  
<https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Publikationen/Downloads/gesamtwirtschaftliches-materialkonto-pdf-5851315.html>
- Statistisches Bundesamt. (2022a). *20 % der Internetnutzenden achten beim Kauf digitaler Geräte auf Energieeffizienz*. Destatis.  
[https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/12/PD22\\_534\\_63.html](https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2022/12/PD22_534_63.html)
- Statistisches Bundesamt. (2022b). *Daten aus den Laufenden Wirtschaftsrechnungen (LWR) zur Ausstattung privater Haushalte mit Informationstechnik*. Destatis. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Tabellen/a-infotechnik-d-lwr.html>
- Statistisches Bundesamt. (2022c). *Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen: Input-Output-Rechnung - Fachserie 18 Reihe 2. 2018 (Revision 2019)*. Destatis.  
[https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Input-Output-Rechnung/input-output-rechnung-2180200187004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Wirtschaft/Volkswirtschaftliche-Gesamtrechnungen-Inlandsprodukt/Publikationen/Downloads-Input-Output-Rechnung/input-output-rechnung-2180200187004.pdf?__blob=publicationFile) (Stand: August 2021).
- Statistisches Bundesamt. (2022d). *Wirtschaftsrechnungen - Laufende Wirtschaftsrechnungen - Ausstattung privater Haushalte mit ausgewählten Gebrauchsgütern*. Destatis.  
[https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Publikationen/Downloads-Ausstattung/ausstattung-privater-haushalte-2150200227004.pdf?\\_\\_blob=publicationFile](https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Einkommen-Konsum-Lebensbedingungen/Ausstattung-Gebrauchsgueter/Publikationen/Downloads-Ausstattung/ausstattung-privater-haushalte-2150200227004.pdf?__blob=publicationFile)
- Steinmann, Z. J. N., Schipper, A. M., Hauck, M. & Huijbregts, M. A. J. (2016). How Many Environmental Impact Indicators Are Needed in the Evaluation of Product Life Cycles? *Environmental Science & Technology*, 50(7), 3913–3919. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b05179>
- Stobbe, L., Proske, M., Zedel, H., Hintemann, R., Clausen, J. & Beucker, S. (2015). *Entwicklung des IKT-bedingten Strombedarfs in Deutschland - Abschlussbericht*. BMWK.  
[https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.pdf?\\_\\_blob=publicationFile&v=1](https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=1)
- Tenzer, F. (2022). *Anteil der Smartwatch-Nutzer in Deutschland in den Jahren 2015 bis 2019*. Statista.  
<https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1047586/umfrage/anteil-der-smartwatch-nutzer-in-deutschland/> (Stand: 24. Januar 2022).

- The Shift Project. (2019). *Lean ICT - towards digital sobriety*. The Shift Project. [https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/03/Lean-ICT-Report\\_The-Shift-Project\\_2019.pdf](https://theshiftproject.org/wp-content/uploads/2019/03/Lean-ICT-Report_The-Shift-Project_2019.pdf)
- Thomond, P. (2013). *The enabling technologies of a low-carbon economy: a focus on cloud computing*. Global e-Sustainability Initiative (GeSI). <https://gesi.org/public/storage/files/ET%20Cloud%20Study%20-%20FINAL%20report.pdf>
- Timmer, M. P., Dietzenbacher, E., Los, B., Stehrer, R. & De Vries, G. J. (2015). An Illustrated User Guide to the World Input–Output Database: the Case of Global Automotive Production. *Review Of International Economics*, 23(3), 575–605. <https://doi.org/10.1111/roie.12178>
- Trapp, J. H., Arndt, W.-H., Libbe, J., Schneider, S., Verbücheln, M., Winkelhaus, J., Mottschall, M., Bauknecht, D., Bergmann, T. & Gröger, J. (2017). *Ressourcenleichte zukunftsfähige Infrastrukturen – umweltschonend, robust, demografiefest*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-15\\_texte\\_64\\_2017\\_infrastrukturen.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2017-08-15_texte_64_2017_infrastrukturen.pdf)
- Tröger, N., Wieser, H. & Hübner, R. (2017). Smartphones werden häufiger ersetzt als T-Shirts. Die Nutzungsmuster und Ersatzgründe von KonsumentInnen bei Gebrauchsgütern. In: C. Bala & C. Schuldzinski (Hrsg.), *Pack ein, schmeiß' weg? Wegwerfkultur und Wertschätzung von Konsumgütern. Beiträge Zur Verbraucherforschung, Band 6*. (1. Aufl., S. 79-102). Verbraucherzentrale NRW, Düsseldorf.
- Tukker, A., Bulavskaya, T., Giljum, S., de Koning, A., Lutter, S., Simas, M., Stadler, K. & Wood, R. (2014). The Global Resource Footprint of Nations: Carbon, water, land and materials embodied in trade and final consumption calculated with EXIOBASE 2.1. *CREEA*. [https://www.researchgate.net/publication/264080789\\_The\\_Global\\_Resource\\_Footprint\\_of\\_Nations\\_Carbon\\_water\\_land\\_and\\_materials\\_embodied\\_in\\_trade\\_and\\_final\\_consumption\\_calculated\\_with\\_EXIOBASE\\_21](https://www.researchgate.net/publication/264080789_The_Global_Resource_Footprint_of_Nations_Carbon_water_land_and_materials_embodied_in_trade_and_final_consumption_calculated_with_EXIOBASE_21)
- Tukker, A., De Koning, A., Owen, A., Lutter, S., Brückner, M., Giljum, S., Stadler, K., Wood, R. & Hoekstra, R. (2018). Towards robust, authoritative assessments of environmental impacts embodied in trade: current state and recommendations. *Journal Of Industrial Ecology*, 22(3), 585–598. <https://doi.org/10.1111/jiec.12716>
- Tukker, A., Wood, R. & Schmidt, S. (2020). Towards accepted procedures for calculating international consumption-based carbon accounts. *Climate Policy*, 20(sup1), S90–S106. <https://doi.org/10.1080/14693062.2020.1722605>
- TWI2050 - The World in 2050. (2019). *The Digital Revolution and Sustainable Development: Opportunities and Challenges. Report prepared by The World in 2050 initiative*. International Institute for Applied Systems Analysis (IIASA). <https://pure.iiasa.ac.at/id/eprint/15913/1/TWI2050-for-web.pdf>
- Twitch. (2023). *Twitch Streamers - Twitch Video Encoding and Bitrates*. <https://stream.twitch.tv/encoding/> (Stand: 20. Februar 2023).
- Umweltbundesamt. (2019a). *Digitalisierung nachhaltig gestalten. Ein Impulspapier des Umweltbundesamtes*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/uba\\_fachbroschuere\\_digitalisierung\\_nachhaltig\\_gestalten\\_0.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/uba_fachbroschuere_digitalisierung_nachhaltig_gestalten_0.pdf)
- Umweltbundesamt. (2019b). *Rebound-Effekte*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/oekonomische-rechtliche-aspekte-der/rebound-effekte>
- Umweltbundesamt. (2021). *Handlungsfelder zur Steigerung der Ressourceneffizienz. Potenziale, Hemmnisse und Maßnahmen*.

- Umweltbundesamt. (2022). *Car-Sharing*. Umweltbundesamt.  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/car-sharing#angebotsformen-des-car-sharin>
- Umweltbundesamt. (2023). *Emissionen des Verkehrs*. Umweltbundesamt.  
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#verkehr-belastet-luft-und-klimaminderungsziele-der-bundesregierung>
- UNEP (2022). *SCP-HAT database v2.0. UN Life Cycle Initiative*. UN One Planet Network, UN International Resource Panel. Paris.
- United Nations Department of Economic and Social Affairs, Population Division. (2022). *World Population Prospects 2022: Summary of Results*. UN DESA/POP/2022/TR/NO. 3.
- Van Vuuren, D., Edmonds, J., Kainuma, M., Riahi, K., Thomson, A. M., Hibbard, K., Hurtt, G. C., Kram, T., Krey, V., Lamarque, J. F., Masui, T., Meinshausen, M., Nakićenović, N., Smith, S. J. & Rose, S. K. (2011). The representative concentration pathways: an overview. *Climatic Change*, 109(1–2), 5–31.  
<https://doi.org/10.1007/s10584-011-0148-z>
- Verbraucherzentrale. (2022, 16. März). *Streamen – Energie sparen*. Verbraucherzentrale.  
<https://verbraucherzentrale-energieberatung.de/news-wissen/magazin/strom-sparen-beim-streamen/>
- WBGU – Wissenschaftlicher Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (2019). *Unsere gemeinsame digitale Zukunft*. WBGU.
- Weiss, D., Hajduk, T. & Knopf, J. (2017). *Step-by-Step Guide to Sustainable Supply Chain Management - a Practical Guide for Companies*. BMUV.  
[https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten\\_BMU/Pool/Broschueren/nachhaltige\\_lieferkette\\_en\\_bf.pdf](https://www.bmuv.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Broschueren/nachhaltige_lieferkette_en_bf.pdf)
- 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.
- Wiebe, K. S., Bjelle, E. L., Többen, J. & Wood, R. (2018). Implementing exogenous scenarios in a global MRIO model for the estimation of future environmental footprints. *Journal Of Economic Structures*, 7(1).  
<https://doi.org/10.1186/s40008-018-0118-y>
- Wiebe, K. S., Brückner, M., Giljum, S., Lutz, C. & Polzin, C. (2012). Carbon and Materials Embodied in the International Trade of Emerging Economies. *Journal Of Industrial Ecology*, 16(4), 636–646.  
<https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2012.00504.x>
- Wiebe, K. S., Harsdorff, M., Montt, G., Simas, M. & Wood, R. (2019). Global Circular Economy Scenario in a Multiregional Input–Output Framework. *Environmental Science & Technology*, 53(11), 6362–6373.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b01208>
- Wiebe, K. S., Lutz, C., Bruckner, M. & Giljum, S. (2013). The Global Resource Accounting Model (GRAM). In J. Murray & M. Lenzen (Hrsg.), *The Sustainability Practitioner’s Guide to Multi-Regional Input-Output Analysis* (79–88). Champaign: Common Ground Research Networks.
- Wiedmann, T. & Barrett, J. (2013). POLICY-RELEVANT APPLICATIONS OF ENVIRONMENTALLY EXTENDED MRIO DATABASES – EXPERIENCES FROM THE UK. *Economic Systems Research*, 25(1), 143–156.  
<https://doi.org/10.1080/09535314.2012.761596>
- Wiedmann, T., Schandl, H., Lenzen, M., Moran, D., Suh, S., West, J. & Kanemoto, K. (2013). The material footprint of nations. *Proceedings Of The National Academy Of Sciences Of The United States Of America*, 112(20), 6271–6276. <https://doi.org/10.1073/pnas.1220362110>
- Wood, R., Stadler, K., Bulavskaya, T., Lutter, S., Giljum, S., De Koning, A., Kuenen, J., Schütz, H., Acosta-Fernández, J., Usubiaga, A., Simas, M., Ivanova, O., Weinzettel, J., Schmidt, J. H., Merciai, S. & Tukker, A. (2014).

Global Sustainability Accounting—Developing EXIOBASE for Multi-Regional Footprint Analysis. *Sustainability*, 7(1), 138–163. <https://doi.org/10.3390/su7010138>

Yamano, N. & Guilhoto, J. (2020). CO<sub>2</sub> emissions embodied in international trade and domestic final demand: Methodology and results using the OECD Inter-Country Input-Output Database. *OECD Science, Technology And Industry Working Papers*. <https://doi.org/10.1787/8f2963b8-en>

Zhou, X., Shirakawa, H. & Lenzen, M. (2016). Aggregation Effects in Carbon Footprint Accounting Using Multi-Region Input–Output Analysis. In T. Yu, N. Chawla & S. Simoff (Hrsg.), *Computational Intelligent Data Analysis for Sustainable Development* (53-81). Chapman & Hall/CRC.

Zhu, X. & Liu, K. (2021). A systematic review and future directions of the sharing economy: business models, operational insights and environment-based utilities. *Journal Of Cleaner Production*, 290, 125209. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125209>

Zimmermann, T., Memelink, R., Rödig, L., Reitz, A., Pelke, N., John, R. & Eberle, U. (2020). *Die Ökologisierung des Onlinehandels: Neue Herausforderungen für die umweltpolitische Förderung eines nachhaltigen Konsums*. Umweltbundesamt. [https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020\\_12\\_03\\_texte\\_227-2020\\_online-handel.pdf](https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/5750/publikationen/2020_12_03_texte_227-2020_online-handel.pdf)