

TEXTE

114/2024

Anhang zum 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

Herausgeber:

Umweltbundesamt

TEXTE 114/2024

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

Forschungskennzahl 3720 31 101 0
FB001417

Anhang zum 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
Internet: 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 Autor*innen.

Kurzzusammenfassung: Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland

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 zu Verbraucher). 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 CO₂-Fußabdruck der Digitalisierung in Deutschland für die Jahre 2000-2020 rechnerisch bestimmt. Rohstoffeinsatz und der CO₂-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. CO₂) 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 für eine nachhaltige Gestaltung der Digitalisierung in Deutschland ab.

Dieser Anhang ergänzt den eigentlichen Abschlussbericht des Vorhabens (Abschlussbericht: Abraham *et al.* 2023a; Anhang: Abraham *et al.* 2023b¹). Insbesondere das Arbeitspaket „Fallstudien Lebenszyklusdaten“, welches im Abschlussbericht lediglich in Form einer Zusammenfassung dargestellt ist (vgl. Abraham *et al.*, 2023a) wird im Folgenden ausführlich behandelt. Eine Zusammenfassung der Forschungsergebnisse ist auch in einer Fachbroschüre veröffentlicht (Milde *et al.*, 2023).

¹ Vgl. www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen (Stand: 31.12.2023).

Short Abstract: Digitalisation and natural Resources - Analysis of the digital transformations resource intensity in Germany

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. CO₂) 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 appendix supplements the actual final report of the project (final report: Abraham *et al.* 2023a; appendix: Abraham *et al.* 2023b). In particular, the "Life cycle data case studies" work package, which is only presented in the form of a summary in the final report (see Abraham *et al.*, 2023a), is discussed in detail below.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis.....	15
Tabellenverzeichnis	22
Abkürzungsverzeichnis	33
A Bestandsaufnahme.....	34
A.1 Leitfragen zu den einzelnen Berichtskapiteln für die Analyse des Diskussionsstandes	34
A.2 Rechercheergebnisse Analyse des Diskussionsstandes (Standards und Normen)	35
A.3 Zusammenhang zwischen Projektergebnissen aus den einzelnen Kapiteln.....	37
A.4 Suchbegriffe für Recherche zu quantitativen Vorarbeiten auf Mikroebene	40
A.5 Wirtschaftszweige WZ 2008.....	41
B Fallstudien Lebenszyklusdaten.....	44
B.1 Auswahl der Fallstudien	44
B.2 Vorgehensweise bei der Berechnung der Ressourcenintensität und weiterer Indikatoren	48
B.2.1 Allgemeines Vorgehen	49
B.2.2 Datengrundlagen und Modellierungs-Software	51
B.2.2.1 Auswahl der Softwarelösung	51
B.2.2.2 Beschreibung und Auswahl der genutzten Datenbanken und -quellen	54
B.2.3 Indikatoren und weitere systematische Angaben zu den Fallstudien	57
B.2.3.1 Indikatoren zur Betrachtung von Rohstoff- und Ressourcenaufwänden	57
B.2.3.2 Treibhauspotenzial	59
B.2.3.3 Weitere systematische Angaben in den Fallstudien.....	60
B.2.3.3.1 Kritische Rohstoffe.....	60
B.2.3.3.2 Bedeutung des jeweiligen Anwendungsfalls für die Digitalisierung (gegenwärtig und zukünftig)	62
B.2.3.3.3 Beschreibung möglicher Umweltentlastungspotenziale	62
B.2.3.3.4 Sonstige Informationen in Abhängigkeit der Fallstudien	62
B.2.3.3.5 Festlegung der Indikatoren sowie weitere systematische Angaben zu den Fallstudien.....	63
B.2.4 Methodische Details zur Berechnung der Indikatoren in den Fallstudien	65
B.2.4.1 Gemeinsame Datenbasis für die Fallstudien und notwendige Annahmen	65
B.2.4.1.1 Ressourcenintensität von Rechenzentren und Übertragungsnetzen.....	65
B.2.4.1.2 Allokation von multifunktionalen Geräten	67
B.2.4.1.3 Fokus auf Herstellungs- und Nutzungsphase.....	67
B.2.4.2 Berechnung der Ressourcenintensität in den Fallstudien	68
B.2.4.2.1 Rohstoffintensität und ausgewählte Rohstoffe.....	68

B.2.4.3	Vorgehensweise bei der Auswahl der Fallstudien	73
B.2.4.3.1	Aufbau und Gestaltung der Fallstudien	74
B.3	Fallstudien	75
B.3.1	Fallstudie Videokonferenz im Homeoffice.....	75
B.3.1.1	Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung.....	75
B.3.1.2	Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie	76
B.3.1.3	Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie	77
B.3.1.3.1	Komponenten und betrachtete Videokonferenzsysteme	77
B.3.1.3.1.1	Rahmenbedingungen der Nutzungsphase	78
B.3.1.3.1.2	Weitere Sachbilanzen.....	80
B.3.1.4	Ressourcenintensität des Anwendungsfalls	81
B.3.1.4.1	Rohstoffintensität des Anwendungsfalls	81
B.3.1.4.1.1	Herstellungsphase	81
B.3.1.4.1.2	Nutzungsphase	86
B.3.1.4.2	Kumulierter Energieaufwand und CO ₂ -Fußabdruck	87
B.3.1.4.3	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial	88
B.3.1.4.4	Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial.....	88
B.3.1.5	Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie.....	90
B.3.2	Fallstudie Smart-Home-System	92
B.3.2.1	Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung.....	92
B.3.2.2	Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie	93
B.3.2.3	Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie	94
B.3.2.3.1	Komponenten und betrachtetes Smart-Home-System	94
B.3.2.4	Rahmenbedingungen der Nutzungsphase.....	97
B.3.2.5	Ergebnisse zur Ressourcenintensität	98
B.3.2.5.1	Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme.....	98
B.3.2.5.1.1	Herstellungsphase	98
B.3.2.5.1.2	Nutzungsphase	102
B.3.2.5.2	Kumulierter Energieaufwand und CO ₂ -Fußabdruck	103
B.3.2.5.2.1	Analyse verschiedener Szenarien im Hinblick auf den KEA.....	105
B.3.2.5.2.2	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial	110
B.3.2.5.2.3	Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial	110
B.3.2.6	Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie.....	111
B.3.3	Fallstudie digitale Medien.....	112
B.3.3.1	Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung.....	112

B.3.3.2	Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie	114
B.3.3.3	Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie	115
B.3.3.3.1	Untersuchungseinheit.....	115
B.3.3.3.1.1	Komponenten und betrachtete Systeme	115
B.3.3.4	Ergebnisse zur Ressourcenintensität	122
B.3.3.4.1	Rohstoffe und ungenutzt Materialentnahme.....	122
B.3.3.4.1.1	Herstellungsphase	122
B.3.3.4.1.2	Nutzungsphase	127
B.3.3.4.2	Kumulierter Energieaufwand und CO ₂ -Fußabdruck	129
B.3.3.4.3	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial	129
B.3.3.4.4	Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial.....	130
B.3.3.5	Schlussbetrachtungen und Fazit zur Fallstudie.....	130
B.3.4	Fallstudie <i>E-Grocery</i> : Online-Lebensmittelhandel	133
B.3.4.1	Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung	133
B.3.5	Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie	134
B.3.5.1	Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie	135
B.3.5.1.1	Untersuchungseinheit.....	135
B.3.5.1.2	Komponenten und betrachtete Systeme	136
B.3.5.2	Ergebnisse zur Ressourcenintensität	138
B.3.5.2.1	Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme.....	138
B.3.5.2.2	Kumulierter Energieaufwand und CO ₂ -Fußabdruck	145
B.3.5.2.3	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial	145
B.3.5.2.4	Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial.....	146
B.3.5.3	Schlussbetrachtungen und Fazit zur Fallstudie.....	147
B.3.6	Fallstudie Carsharing.....	151
B.3.6.1	Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung	151
B.3.6.2	Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie	152
B.3.6.3	Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie	153
B.3.6.3.1	Komponenten des betrachteten Carsharing-Systems.....	153
B.3.6.3.2	Rahmenbedingungen der Nutzungsphase.....	154
B.3.6.3.3	Weitere Sachbilanzen	155
B.3.6.4	Ergebnisse zur Ressourcenintensität	155
B.3.6.4.1	Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme.....	155
B.3.6.4.1.1	Herstellungsphase	155
B.3.6.4.1.2	Nutzungsphase	160

B.3.6.4.2	Kumulierter Energieaufwand und CO ₂ -Fußabdruck	162
B.3.6.4.3	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial	162
B.3.6.4.4	Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial.....	162
B.3.6.5	Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie.....	164
B.3.7	Fallstudie Kryptowährung.....	166
B.3.7.1	Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung	166
B.3.7.2	Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie	167
B.3.7.3	Blockchain-Technologie und ihre Anwendung in Kryptowährungen	168
B.3.7.4	Produktsystem und Betrachtungsgrenzen	168
B.3.7.5	Systematik der Fallstudie.....	169
B.3.7.6	Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie	170
B.3.7.6.1	Untersuchungseinheit.....	170
B.3.7.6.2	Komponenten und betrachtete Systeme	171
B.3.7.6.2.1	Strombedarf und -mix	171
B.3.7.6.2.2	Herstellung und Entsorgung der Mining-Hardware	174
B.3.7.6.3	Zusammenfassung der verwendeten Szenarien.....	174
B.3.7.7	Ergebnisse zur Ressourcenintensität	174
B.3.7.7.1	Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme.....	174
B.3.7.8	Kumulierter Energieaufwand und CO ₂ -Fußabdruck	180
B.3.7.8.1	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial	181
B.3.7.8.2	Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial.....	182
B.3.7.8.2.1	Nachteilige Effekte hinsichtlich Ressourcenbedarf und Treibhausgasemissionen.....	182
B.3.7.8.2.2	Reduktion der Umwelteffekte und mögliche Entlastungspotenziale	183
B.3.7.8.2.3	Umweltentlastungspotenziale auf Basis der Literaturrecherche und der Ergebnisse	184
B.3.7.9	Schlussbetrachtungen und Fazit zur Fallstudie.....	185
B.3.8	Fallstudie <i>Consumer-to-Consumer</i> -Plattform	187
B.3.8.1	Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung	187
B.3.8.2	Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie	187
B.3.8.3	Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie	188
B.3.8.3.1	Genutzte End- und Netzwerkszugangsgeräte.....	188
B.3.8.3.2	Übertragungsnetze und Rechenzentrum.....	190
B.3.8.3.3	Verpackung und Transport	191
B.3.8.3.4	Implementierte Szenarien	191

B.3.8.4	Ergebnisse zur Ressourcenintensität	192
B.3.8.4.1	Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme.....	192
B.3.8.4.2	Kumulierter Energieaufwand und CO ₂ -Fußabdruck	197
B.3.8.4.3	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial	198
B.3.8.4.4	Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial.....	198
B.3.8.5	Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie.....	200
B.3.9	Fallstudie E-Sport	203
B.3.9.1	Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung	203
B.3.9.2	Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie	204
B.3.9.3	Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie	206
B.3.9.3.1	Komponenten und betrachtete Gamingsysteme	206
B.3.9.3.2	Rahmenbedingungen der Nutzungsphase.....	207
B.3.9.3.3	Weitere Sachbilanzdaten	208
B.3.9.4	Ergebnisse zur Ressourcenintensität	209
B.3.9.4.1	Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme.....	209
B.3.9.4.1.1	Herstellungsphase	209
B.3.9.4.1.2	Nutzungsphase	213
B.3.9.4.2	Kumulierter Energieaufwand und CO ₂ -Fußabdruck	214
B.3.9.4.3	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial	215
B.3.9.4.4	Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial.....	216
B.3.9.5	Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie.....	217
B.3.10	Fallstudie privater 3D-Druck	220
B.3.10.1	Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung	220
B.3.10.2	Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie	220
B.3.10.3	Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie	221
B.3.10.3.1	Komponenten und betrachteter 3D Drucker.....	221
B.3.10.3.2	Rahmenbedingungen der Nutzungsphase.....	224
B.3.10.4	Ergebnisse zur Ressourcenintensität	224
B.3.10.4.1	Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme.....	224
B.3.10.4.1.1	Herstellungsphase	224
B.3.10.4.1.2	Nutzungsphase	229
B.3.10.4.2	Kumulierter Energieaufwand und CO ₂ -Fußabdruck	230
B.3.10.4.3	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial	232
B.3.10.4.4	Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial.....	232
B.3.10.5	Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie.....	233

B.3.11	Fallstudie E-Health: Smartwatch für digitale Fitness und Gesundheit	234
B.3.11.1	Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung	234
B.3.11.2	Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie	235
B.3.11.3	Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie	236
B.3.11.3.1	Sachbilanz der Smartwatch.....	236
B.3.11.3.2	Rahmenbedingungen der Nutzungsphase.....	237
B.3.11.3.3	Weitere Sachbilanzdaten	238
B.3.11.4	Ergebnisse zur Berechnung der Ressourcenintensität	239
B.3.11.4.1	Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme.....	239
B.3.11.4.1.1	Herstellungsphase	239
B.3.11.4.1.2	Nutzungsphase	242
B.3.11.4.2	Kumulierter Energieaufwand und CO ₂ -Fußabdruck	243
B.3.11.4.3	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial	244
B.3.11.4.4	Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial.....	244
B.3.11.5	Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie.....	246
B.3.12	Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse der Fallstudien	249
B.4	Life Cycle Inventories für die Fallstudien	253
B.4.1	Life Cycle Inventory der Fallstudie Videokonferenz (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“)	253
B.4.2	Life Cycle Inventory der Fallstudie Smart-Home (Werte für Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“).....	255
B.4.3	Life Cycle Inventory der Fallstudie digitale Medien (Werte für „30 Minuten Lesen digitaler Medien“).....	263
B.4.4	Life Cycle Inventory der Fallstudie <i>E-Grocery</i> (Werte für „Online- Lebensmittelhandel-Einkauf“)	266
B.4.5	Life Cycle Inventory der Fallstudie Carsharing (Werte für Untersuchungseinheit „Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“).....	267
B.4.6	Life Cycle Inventory der Fallstudie Kryptowährung (Werte für Untersuchungseinheit „Ein Jahr Betrieb“)	269
B.4.7	Life Cycle Inventory der Fallstudie Consumer-to-Consumer Plattform (Werte für Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“)	273
B.4.8	Life Cycle Inventory der Fallstudie E-Sport (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“)	276
B.4.9	Life Cycle Inventory der Fallstudie 3D Druck (Werte für Untersuchungseinheit „3D- Druck: 77 Stunden Nutzung“)	278
B.4.9.1	Life Cycle Inventory der Fallstudie E-Health (Werte für Untersuchungseinheit „E- Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“)	284

B.5	Contribution Analysis für die Fallstudien.....	287
B.5.1	Contribution Analysis für die Fallstudie Videokonferenz im Homeoffice.....	287
B.5.1.1	Herstellungsphase.....	287
B.5.1.2	Nutzungsphase.....	288
B.5.2	Contribution Analysis für die Fallstudie Smart-Home-System	289
B.5.2.1	Herstellungsphase.....	289
B.5.2.2	Nutzungsphase.....	290
B.5.3	Contribution Analysis für die Fallstudie digitale Medien.....	291
B.5.3.1	Mix Szenario.....	291
B.5.3.2	Laptop Szenario	292
B.5.3.3	Smartphone Szenario.....	293
B.5.3.4	Tablet Szenario.....	294
B.5.4	Contribution Analysis für die Fallstudie <i>E-Grocery</i> : Online-Lebensmittelhandel	295
B.5.4.1	Optimistisches Szenario	295
B.5.4.2	Konservatives Szenario	296
B.5.5	Contribution Analysis für die Fallstudie Carsharing.....	297
B.5.5.1	Herstellungsphase.....	297
B.5.5.2	Nutzungsphase.....	298
B.5.5.2.1	Szenario 1 - Grünstrom	298
B.5.5.2.2	Szenario 2 - Konventioneller Strommix	299
B.5.6	Contribution Analysis für die Fallstudie Kryptowährung.....	300
B.5.6.1	Szenario 1.....	300
B.5.6.2	Szenario 2.....	301
B.5.6.3	Szenario 3.....	302
B.5.7	Contribution Analysis für die Fallstudie Consumer-to-Consumer-Plattform	303
B.5.7.1	Szenario RZ _{effizient}	303
B.5.7.2	Szenario RZ ₂₀₁₁	304
B.5.7.3	Szenario Abholung	305
B.5.8	Contribution Analysis für die Fallstudie E-Sport	306
B.5.8.1	Herstellungsphase.....	306
B.5.8.2	Nutzungsphase.....	307
B.5.9	Contribution Analysis für die Fallstudie privater 3D-Druck	308
B.5.9.1	Herstellungsphase.....	308
B.5.9.2	Nutzungsphase.....	309

B.5.10	Contribution Analysis für die Fallstudie E-Health: Smartwatch für digitale Fitness und Gesundheit.....	310
B.5.10.1	Herstellungsphase.....	310
B.5.10.2	Nutzungsphase.....	311
C	Zur Konzeption von GRAMOD durchgeführte empirische MRIO-Evaluationen.....	312
C.1	Evaluation der Anpassungsgüte: EXIOBASE und GLORIA im Vergleich mit OECD-ICIO	312
C.2	Aggregation Bias bei Verwendung der Domestic Technology Assumption.....	314
D	Klassifikation der Produktionsbereiche in den MRIO-Datensätzen	317
E	Abgrenzung der in den Bewertungen mit GRAMOD berücksichtigten NACE-Gruppen.....	321
F	Datengrundlage ausgewählter Abbildungen.....	323
	Quellenverzeichnis	406

Abbildungsverzeichnis

Abbildung B-1:	Abgrenzung zwischen Anwendungsfällen, Technologien und digitalen Produkten bzw. Infrastrukturen (basierend auf konzeptioneller Perspektive auf das System Digitalisierung) ..45	
Abbildung B-2:	Übersicht über gängige LCA-Indikatoren anhand des Beispiels der ReCiPE Wirkungsabschätzungsmethodik	50
Abbildung B-3:	Gruppierung von Sachbilanzdaten gemäß Ökobilanz-Taxonomie	52
Abbildung B-4:	Ausschnitt aus Publikation zu Charakterisierungsfaktoren für Materialfußabdruck sowie Implementierung in Ökobilanzsoftware OpenLCA.....	53
Abbildung B-5:	Grundlegende Darstellung der Indikatoren RMI und TMR anhand der zugrundeliegenden Stoffströme und Systemgrenzen	58
Abbildung B-6:	Indikatorenset für die Analyse auf Mikroebene im Rahmen der Fallstudien*	64
Abbildung B-7:	Globale Trends beim Internetverkehr, bei der Auslastung von Rechenzentren und beim Energieverbrauch von Rechenzentren; 2015 = 100 (%)	66
Abbildung B-8:	Geschätzte Materialzusammensetzung eines Mobiltelefons in Prozent	69
Abbildung B-9:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Eine Stunde Videokonferenz“	80
Abbildung B-10:	Rohstoffintensität (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffgruppen zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ in Prozent*	82
Abbildung B-11:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Eine Stunde Videokonferenz“ in Gramm*	83
Abbildung B-12:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ in Prozent und Milligramm	85
Abbildung B-13:	Rohstoffintensität (RMI) der Nutzungsphase nach Rohstoffgruppen zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ in Prozent*	87
Abbildung B-14:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase*	91
Abbildung B-15:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“*	94

Abbildung B-16:	Komponenten des Smart-Home-Systems für die Fallstudie „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“	95
Abbildung B-17:	Anteile der Rohstoffgruppen am Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellung eines Smart-Home-Systems zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in Prozent*	98
Abbildung B-18:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in Kilogramm*	99
Abbildung B-19:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in Prozent und Gramm.....	100
Abbildung B-20:	Anteile Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase des Smart-Home-Systems zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ nach Rohstoffgruppen in Prozent	103
Abbildung B-21:	Kumulierter Energieaufwand des Smart-Home-Systems zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in der Herstellungsphase nach Komponenten in Megajoule	104
Abbildung B-22:	Vergleich des Energieeinsparpotenzials der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ mit Szenarien zur Energieeinsparung in Megajoule.....	106
Abbildung B-23:	Treibhausgasemissionen des Smart-Home-Systems zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in der Herstellungsphase in kg CO ₂ -Äq.	107
Abbildung B-24:	Vergleich der Treibhausgasemissionen der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ mit Szenarien zur Treibhausgaseinsparung in Tonnen CO ₂ -Äq	109
Abbildung B-25:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase*	111
Abbildung B-26:	Anteilige Nutzung von unterschiedlichen Quellen für Nachrichten in Deutschland in den Jahren 2013 und 2022 in Prozent	113

Abbildung B-27:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „30 Minuten Lesen digitaler Medien“	116
Abbildung B-28:	Nutzung von Endgeräten zum Abrufen von Online-Nachrichtenartikeln in Deutschland in den Jahren 2013 und 2022 in Prozent.....	117
Abbildung B-29:	Ergebnisse der Umfrage: „Wie lange haben Sie bereits das Smartphone, dass Sie derzeit privat nutzen?“ in Prozent.....	119
Abbildung B-30:	Tägliche Nutzung digitaler Endgeräte in Deutschland im Jahr 2017 in min/d	120
Abbildung B-31:	Anteile Primärrohstoffeinsatz der Herstellung der Endgeräte zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm	123
Abbildung B-32:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm	125
Abbildung B-33:	Anteile Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm.....	128
Abbildung B-34:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase*	131
Abbildung B-35:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“	135
Abbildung B-36:	Aufteilung des Primärrohstoffeinsatzes für das ressourcenschonende und -intensive Szenario zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Kilogramm.....	139
Abbildung B-37:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Kilogramm	141
Abbildung B-38:	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	144
Abbildung B-39:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ absolut und in Prozent nach Szenarien*	148

Abbildung B-40:	Vergleich ausgewählter Indikatoren der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ absolut und in Prozent nach Komponenten und Szenarien*149
Abbildung B-41:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“153
Abbildung B-42:	Anteile Primärrohstoffeinsatz der Herstellung Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ in Prozent156
Abbildung B-43	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ in Gramm 158
Abbildung B-44:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ in Prozent und Milligramm159
Abbildung B-45:	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)161
Abbildung B-46:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -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)*164
Abbildung B-47:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“171
Abbildung B-48:	Anteil verschiedener Stromquellen am Strommix des Bitcoin-Minings von Juni 2020 bis August 2021 in Prozent173
Abbildung B-49:	Vergleich des Primärrohstoffeinsatzes der drei Szenarien „Standard, hoher Strombedarf und Länder-Strommix“ für die Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Millionen Tonnen175
Abbildung B-50:	Anteile Primärrohstoffeinsatz des Bitcoin-Netzwerkbetriebs im Standardszenario zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Prozent*176
Abbildung B-51:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Megatonnen.....177

Abbildung B-52:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Prozent und Tonnen...180
Abbildung B-53:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ absolut und in Prozent nach Anteil des Strombedarfs und Mining-Hardware (Standardszenario)*185
Abbildung B-54:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“188
Abbildung B-55:	Aufteilung des Primärrohstoffeinsatzes für die untersuchten Szenarien „RZ _{effizient} , RZ ₂₀₁₁ und Abholung“ zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Kilogramm.....193
Abbildung B-56:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Kilogramm194
Abbildung B-57:	Verhältnis der Rohstoffintensitäten zwischen den drei Szenarien „RZ _{effizient} , RZ ₂₀₁₁ und Abholung“ für besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Prozent197
Abbildung B-58:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase in den drei Szenarien; S1 = RZ _{effizient} , S2 = RZ ₂₀₁₁ , S3 = Abholung*201
Abbildung B-59:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Eine Stunde E-Sport“205
Abbildung B-60:	Anteile Primärrohstoffeinsatz der Herstellung eines E-Sport-Systems in Prozent*210
Abbildung B-61:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Eine Stunde E-Sport“ in Gramm*211
Abbildung B-62:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ in Milligramm und Prozent.....212
Abbildung B-63:	Anteile Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase des E-Sport-Systems.....214
Abbildung B-64:	Anteile am CO ₂ -Fußabdruck der Nutzungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ in Prozent 215
Abbildung B-65:	Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks zur Bereitstellung der

	Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ absolut und in Prozent nach Herstellungs- und Nutzungsphase*	218
Abbildung B-66:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“	221
Abbildung B-67:	Komponenten des 3D Druckers.....	222
Abbildung B-68:	Anteile Primärrohstoffeinsatz der Herstellung eines 3D Druckers zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Prozent	225
Abbildung B-69:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Kilogramm*	226
Abbildung B-70:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Gramm und Prozent	227
Abbildung B-71:	Anteile Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Prozent*	230
Abbildung B-72:	Kumulierter Energieaufwand der Herstellung und Nutzungsphase (Strombedarf während der Verwendung einer Filamentspule) zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in MJ.....	231
Abbildung B-73:	Treibhausgasemissionen der Herstellung und Nutzungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in kg CO ₂ -Äq.	231
Abbildung B-74:	Aufteilung der Anteile zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase für die betrachteten Ressourcenintensitäts- und Umweltwirkkategorien zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Prozent*	233
Abbildung B-75:	Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“	236
Abbildung B-76:	Anteile Primärrohstoffeinsatz der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ in Prozent	239
Abbildung B-77:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ in Gramm.....	240
Abbildung B-78:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ in Mükrogramm und Prozent	241

Abbildung B-79: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase zur Bereitstellung Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ in Prozent	243
Abbildung B-80: Anteil der Lebenszyklusphasen auf die Treibhausgasemissionen der Applewatch Series 4 bis 8 in Prozent	245
Abbildung B-81: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ absolut und in Prozent nach Herstellungs- und Nutzungsphase*	247
Abbildung C-82: Anpassungsgüte der Daten zur Produktion in EXIOBASE und GLORIA	312
Abbildung C-83: Anpassungsgüte der Daten zur verwerteten inländischen Entnahme von Rohstoffen in EXIOBASE und GLORIA	313
Abbildung C-84: Anpassungsgüte der Daten zur inländischen Endnachfrage in EXIOBASE und GLORIA	313

Tabellenverzeichnis

Tabelle A-1:	Leitfragen zu den einzelnen Berichtskapiteln für die Analyse des Diskussionsstandes	34
Tabelle A-2:	Rechercheergebnisse zum Diskussionsstand (Standards und Normen)	35
Tabelle A-3:	Ergebnisbedarfe zwischen den einzelnen Forschungsvorhaben	37
Tabelle A-4:	Suchbegriffe für fokussierte Recherche quantitativer Ergebnisse auf Mikroebene	40
Tabelle A-5:	Wirtschaftsbereiche in den Input-Output-Tabellen des Statistischen Bundesamtes und deren Digital-Anteil im Jahr 2018	41
Tabelle B-6:	Liste kritischer Rohstoffe für die EU gemäß der Europäischen Kommission	61
Tabelle B-7:	Ausgewählte mehrfach genutzte Endgeräte und Komponenten in den Fallstudien	65
Tabelle B-8:	Benennung von digitalisierungsrelevanten Rohstoffen laut ausgewählter Literatur*	70
Tabelle B-9:	Aufteilung von Rohstoffen und Rohstoffgruppen mit Relevanz für die Digitalisierung in auswertbare und nicht auswertbare Rohstoffe nach der gewählten Methodik*	71
Tabelle B-10:	Komponenten für Videokonferenzen gemäß Literaturrecherche	77
Tabelle B-11:	Betrachtete Konferenzsysteme (Endproduktsysteme) und angenommene Nutzungsanteile in Prozent der Fallstudie „Eine Stunde Videokonferenz“	78
Tabelle B-12:	Leistungsaufnahme in kWh der betrachteten Geräte pro Stunde für die Fallstudie „Eine Stunde Videokonferenz“	79
Tabelle B-13:	Für Videokonferenzen benötigte Bandbreite des Anbieters „Zoom“ in Standardqualität für Einzel- und Gruppenanrufe ...	79
Tabelle B-14:	Erforderliche Menge digitalisierungsrelevanter Rohstoffe zur Bereitstellung für die Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ in Milligramm	84
Tabelle B-15:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ in Gramm und Prozent – Tabelle zu Abbildung B-12	86
Tabelle B-16:	Zusammenfassung der berechneten Ressourcenindikatoren und des CO ₂ -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase – Tabelle zu Abbildung B-14	91

Tabelle B-17:	Material- und Produktzusammensetzung der Smart-Home-Komponenten für die Fallstudie „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“96
Tabelle B-18:	Leistungsaufnahmen der Smart-Home-Komponenten für die Fallstudie „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ 97
Tabelle B-19:	Anteile ausgewählter digitalisierungsrelevanter Rohstoffe zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in Gramm nach Geräten – Tabelle zu Abbildung 19101
Tabelle B-20:	Kumulierter Energieaufwand des Smart-Home-Systems zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in der Herstellungsphase nach Komponenten in Megajoule – Tabelle zu Abbildung B-21105
Tabelle B-21:	Treibhausgasemissionen des Smart-Home-Systems zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in der Herstellungsphase in kg CO ₂ -Äq. – Tabelle zu Abbildung B-23.....108
Tabelle B-22:	Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ absolut nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase – Tabelle zu Abbildung B-25*112
Tabelle B-23:	Anteilige Nutzung von unterschiedlichen Quellen für Nachrichten in Deutschland in den Jahren 2013 und 2022 in Prozent – Tabelle zu Abbildung B-26.....113
Tabelle B-24:	Nutzung von Endgeräten zum Abrufen von Online-Nachrichtenartikeln in Deutschland in den Jahren 2013 und 2022 in Prozent – Tabelle zu Abbildung B-28.....117
Tabelle B-25:	Nutzungsanteile der betrachteten Produktsysteme in der Sachbilanz zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Prozent.....118
Tabelle B-26:	Ergebnisse der Umfrage: „Wie lange haben Sie bereits das Smartphone, das Sie derzeit privat nutzen?“ in Prozent – Tabelle zu Abbildung B-29119
Tabelle B-27:	Tägliche Nutzung digitaler Endgeräte in Deutschland im Jahr 2017 in min/d – Tabelle zu Abbildung B-30120
Tabelle B-28:	Leistungsaufnahme in Wattstunden der betrachteten Geräte zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ pro Stunde.....121
Tabelle B-29:	Überblick der Annahmen zu den End- und Netzwerkzugangsgeräten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“121

Tabelle B-30:	Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ unterschieden nach genutztem Endgerät in Gramm123
Tabelle B-31:	Anteile Primärrohstoffeinsatz der Herstellung der Endgeräte zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm – Tabelle zu Abbildung B-31124
Tabelle B-32:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm – Tabelle zu Abbildung B-32125
Tabelle B-33:	Erforderliche Menge digitalisierungsrelevanter Rohstoffgruppen zur Herstellung der Endgeräte zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Milligramm126
Tabelle B-34:	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 Geräten127
Tabelle B-35:	Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase je Szenario und Netzwerkkomponente zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm127
Tabelle B-36:	Anteile Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm – Tabelle zu Abbildung B-33.....128
Tabelle B-37:	Kumulierter Energieaufwand und CO ₂ -Fußabdruck zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in kg CO ₂ -Äq. und Megajoule129
Tabelle B-38:	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in cm ³ und cm ² a.....129
Tabelle B-39:	Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase – Tabelle zu Abbildung B-34132
Tabelle B-40:	Aus der Literatur entnommene Input-Werte, die zur Modellierung der Fallstudie „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ verwendet wurden136
Tabelle B-41:	Annahmen der Szenarien für relevante Inputs der Fallstudie „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“138

Tabelle B-42:	Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand des ressourcenschonenden und ressourcenintensiven Szenarios zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Kilogramm.....	139
Tabelle B-43:	Aufteilung des Primärrohstoffeinsatzes für das ressourcenschonende und -intensive Szenario zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Kilogramm – Tabelle zu Abbildung B-36	140
Tabelle B-44:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Kilogramm – Tabelle zu Abbildung B-37	141
Tabelle B-45:	Erforderliche Menge digitalisierungsrelevanter Rohstoffgruppen in dem ressourcenschonenden und -intensiven Szenario zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Milligramm.....	142
Tabelle B-46:	Ausgewählte digitalisierungsrelevante Rohstoffe und ihre eingesetzte Menge zur Bereitstellung zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in dem ressourcenschonenden und -intensiven Szenario in Milligramm.....	143
Tabelle B-47:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in dem ressourcenschonenden und -intensiven Szenario in Prozent – Tabelle zu Abbildung B-38	144
Tabelle B-48:	CO ₂ -Fußabdruck und kumulierter Energieaufwand des ressourcenschonenden und -intensiven Szenario zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“	145
Tabelle B-49:	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial des ressourcenschonenden und -intensiven Szenarios zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in m ³ und m ² a	146
Tabelle B-50:	Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Prozent nach Szenarien – Tabelle zu Abbildung B-39	148
Tabelle B-51:	Vergleich ausgewählter Indikatoren der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ absolut nach Komponenten und Szenarien – Tabelle zu Abbildung B-40 ...	149

Tabelle B-52:	Komponenten für die Nutzung und Bereitstellung von Carsharing.....	154
Tabelle B-53:	Leistungsaufnahme der betrachteten Geräte für Carsharing pro km in Wh.....	154
Tabelle B-54:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ in Milligramm und Prozent – Tabelle zu Abbildung B-44	159
Tabelle B-55:	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) – Tabelle zu Abbildung B-45	161
Tabelle B-56:	Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -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 B-46	165
Tabelle B-57:	Angaben zum jährlichen Stromverbrauch des Bitcoin-Netzwerks	171
Tabelle B-58:	Anteile verschiedener Länder am Globalen Bitcoin Mining (Stand August 2021) in Prozent.....	173
Tabelle B-59:	Szenarien der Modellierung für die Fallstudie „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“	174
Tabelle B-60:	Ergebnisse der berechneten Szenarien „Standard, hoher Strombedarf und Länder-Strommix“ für den Primärrohstoffeinsatz und den Gesamtprimärmaterialaufwand für die Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Megatonnen.....	175
Tabelle B-61:	Vergleich des Primärrohstoffeinsatzes der drei Szenarien „Standard, hoher Strombedarf und Länder-Strommix“ für die Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Megatonnen	176
Tabelle B-62:	Erforderliche Menge digitalisierungsrelevanter Rohstoffe zum einjährigen Betrieb des Bitcoin-Netzwerks für die drei Szenarien „Standard, hoher Stromverbrauch und Länder-Strommix“ zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Tonnen	178
Tabelle B-63:	Ausgewählte digitalisierungsrelevante Rohstoffe, ihre eingesetzte Menge zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ im Standardszenario und Anteil an der jährlichen Gesamtentnahme des Rohstoffs	179

Tabelle B-64:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Prozent und Tonnen – Tabelle zu Abbildung B-52180
Tabelle B-65:	CO ₂ -Fußabdruck und kumulierter Energieaufwand des einjährigen Betriebs des Bitcoin-Netzwerks für die Szenarien „Standard, hoher Strombedarf und Länder-Strommix“ zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Megatonnen181
Tabelle B-66:	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial des einjährigen Betriebs des Bitcoin-Netzwerks für die Szenarien „Standard, hoher Strombedarf und Länder-Strommix“ zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in km ³ und km ² a182
Tabelle B-67:	Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ absolut und in Prozent nach Anteil des Strombedarfs und Mining-Hardware (Standardszenario)* – Tabelle zu Abbildung B-53186
Tabelle B-68:	Leistungsaufnahme der betrachteten Endgeräte pro Stunde für die Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“190
Tabelle B-69:	Übersicht zu den betrachteten Szenarien und den Anpassungen gegenüber dem Standardszenario RZ _{effizient} für die Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“192
Tabelle B-70:	Rohstoffintensität für die untersuchten Szenarien „RZ _{effizient} , RZ ₂₀₁₁ und Abholung“ der Fallstudie „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Kilogramm192
Tabelle B-71:	Aufteilung des Primärrohstoffeinsatzes für die untersuchten Szenarien "RZ _{effizient} , RZ ₂₀₁₁ und Abholung“ zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Kilogramm – Tabelle zu Abbildung B-55193
Tabelle B-72:	Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Kilogramm – Tabelle zu Abbildung B-56195
Tabelle B-73:	Erforderliche Menge digitalisierungsrelevanter Rohstoffgruppen in den untersuchten Szenarien „RZ _{effizient} , RZ ₂₀₁₁ und Abholung“ zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Milligramm.....195
Tabelle B-74:	Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe und ihre eingesetzte Menge zur Bereitstellung der

	Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in den untersuchten Szenarien „RZ _{effizient} , RZ ₂₀₁₁ und Abholung“ in Milligramm196
Tabelle B-75:	CO ₂ -Fußabdruck und kumulierter Energieaufwand für die Szenarien „RZ _{effizient} , RZ ₂₀₁₁ und Abholung“ der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in kg CO ₂ -Äq. und MJ198
Tabelle B-76:	Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial CO ₂ -Fußabdruck und kumulierter Energieaufwand für die Szenarien „RZ _{effizient} , RZ ₂₀₁₁ und Abholung“ in m ³ und m ² a198
Tabelle B-77:	Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase in den drei Szenarien; S1 = RZeffizient, S2 = RZ2011, S3 = Abholung – Tabelle zu Abbildung B-58.....202
Tabelle B-78:	Komponenten für ein E-Sport-Spiel und Live-Streams.....206
Tabelle B-79:	Leistungsaufnahme der betrachteten Geräte pro Stunde208
Tabelle B-80:	Für Gaming und Streaming benötigte Bandbreite des Anbieters „Riot Games“ und „Twitch“ in Standardqualität208
Tabelle B-81:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe je Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ in Prozent und absolut – Tabelle zu Abbildung B-62212
Tabelle B-82:	Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO ₂ -Fußabdrucks zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ absolut und in Prozent nach Herstellungs- und Nutzungsphase“ – Tabelle zu Abbildung B-65.....218
Tabelle B-83:	Spezifika des 3D Druckers je Bauteileinheit222
Tabelle B-84:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Gramm - Tabelle zu Abbildung B-70227
Tabelle B-85:	Aufteilung der Anteile zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase für die betrachteten Ressourcenintensitäts- und Umweltwirkkategorien zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ – Tabelle zu Abbildung B-74*234
Tabelle B-86:	Bill-of-Materials Apple Watch Series 4 (GPS + Cellular)237
Tabelle B-87:	Leistungsaufnahme der betrachteten Geräte pro 16 h Smartwatch Nutzung in Wh237
Tabelle B-88:	Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ – Tabelle zu Abbildung B-78.....242

Tabelle B-89:	Anteil der Lebenszyklusphasen auf die Treibhausgasemissionen der Applewatch Series 4 bis 8 in Prozent - Tabelle zu Abbildung B-80.....	245
Tabelle B-90:	Aufteilung der Anteile zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase für die betrachteten Ressourcen zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ – Tabelle zu Abbildung B-81 .	247
Tabelle B-91:	Life Cycle Inventory der Fallstudie Videokonferenz (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“)	253
Tabelle B-92:	Life Cycle Inventory der Fallstudie Smart-Home (Werte für Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“)	255
Tabelle B-93:	Life Cycle Inventory der Fallstudie digitale Medien (Werte für „30 Minuten Lesen digitaler Medien“)	263
Tabelle B-94:	Life Cycle Inventory der Fallstudie <i>E-Grocery</i> (Werte für „Online-Lebensmitteleinkauf“).....	266
Tabelle B-95:	Life Cycle Inventory der Fallstudie Carsharing (Werte für Untersuchungseinheit „Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“)	267
Tabelle B-96:	Life Cycle Inventory der Fallstudie Kryptowährung (Werte für Untersuchungseinheit „Ein Jahr Betrieb“).....	269
Tabelle B-97:	Life Cycle Inventory der Fallstudie Consumer-to-Consumer Plattform (Werte für Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“)	273
Tabelle B-98:	Life Cycle Inventory der Fallstudie E-Sport (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“)	276
Tabelle B-99:	Life Cycle Inventory der Fallstudie 3D Druck (Werte für Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“).....	278
Tabelle B-100:	Life Cycle Inventory der Fallstudie E-Health (Werte für Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“)	284
Tabelle B-101:	Contribution Analysis für die Herstellungsphase der Fallstudie Videokonferenz im Homeoffice (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“)	287
Tabelle B-102:	Contribution Analysis für die Nutzungsphase der Fallstudie Videokonferenz im Homeoffice (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“)	288
Tabelle B-103:	Contribution Analysis für die Herstellungsphase der Fallstudie Smart-Home-System (Werte für Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“)	289
Tabelle B-104:	Contribution Analysis für die Nutzungsphase der Fallstudie Smart-Home-System (Werte für Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“)	290

Tabelle B-105:	Contribution Analysis für das Mix Szenario der Fallstudie digitale Medien (Werte für „30 Minuten Lesen digitaler Medien“)	291
Tabelle B-106:	Contribution Analysis für das Laptop Szenario der Fallstudie digitale Medien (Werte für „30 Minuten Lesen digitaler Medien“)	292
Tabelle B-107:	Contribution Analysis für das Smartphone Szenario der Fallstudie digitale Medien (Werte für „30 Minuten Lesen digitaler Medien“)	293
Tabelle B-108:	Contribution Analysis für das Tablet Szenario der Fallstudie digitale Medien (Werte für „30 Minuten Lesen digitaler Medien“)	294
Tabelle B-109:	Contribution Analysis für das Optimistische Szenario der Fallstudie <i>E-Grocery</i> : Online-Lebensmittelhandel (Werte für „ <i>E-Grocery</i> : Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“)	295
Tabelle B-110:	Contribution Analysis für das Optimistische Szenario der Fallstudie <i>E-Grocery</i> (Werte für „ <i>E-Grocery</i> : Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“)	296
Tabelle B-111:	Contribution Analysis für die Herstellungsphase der Fallstudie Carsharing (Werte für Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“)	297
Tabelle B-112:	Contribution Analysis für die Nutzungsphase in dem Grünstrom Szenario der Fallstudie Carsharing (Werte für Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“)	298
Tabelle B-113:	Contribution Analysis für die Nutzungsphase in dem konventionellem Strommix Szenario der Fallstudie Carsharing (Werte für Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“)	299
Tabelle B-114:	Contribution Analysis für das Szenario 1 der Fallstudie Kryptowährung (Werte für Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“)	300
Tabelle B-115:	Contribution Analysis für das Szenario 2 der Fallstudie Kryptowährung (Werte für Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“)	301
Tabelle B-116:	Contribution Analysis für das Szenario 3 der Fallstudie Kryptowährung (Werte für Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“)	302
Tabelle B-117:	Contribution Analysis für das RZ _{effizient} der Fallstudie Consumer-to-Consumer-Plattform (Werte für Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“)	303
Tabelle B-118:	Contribution Analysis für das RZ ₂₀₁₁ Szenario der Fallstudie Consumer-to-Consumer-Plattform (Werte für	

	Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“).....	304
Tabelle B-119:	Contribution Analysis für das Abholung Szenario der Fallstudie Consumer-to-Consumer-Plattform (Werte für Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“).....	305
Tabelle B-120:	Contribution Analysis für die Herstellungsphase der Fallstudie E-Sport (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“).....	306
Tabelle B-121:	Contribution Analysis für die Nutzungsphase der Fallstudie E-Sport (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“).....	307
Tabelle B-122:	Contribution Analysis für die Herstellungsphase der Fallstudie privater 3D-Druck (Werte für Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“).....	308
Tabelle B-123:	Contribution Analysis für die Nutzungsphase der Fallstudie privater 3D-Druck (Werte für Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“).....	309
Tabelle B-124:	Contribution Analysis für die Herstellungsphase der Fallstudie E-Health: Smartwatch für digitale Fitness und Gesundheit (Werte für Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“).....	310
Tabelle B-125:	Contribution Analysis für die Nutzungsphase der Fallstudie E-Health: Smartwatch für digitale Fitness und Gesundheit (Werte für Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“).....	311
Tabelle C-126:	Analysefehler bei Anwendung der Domestic Technology Assumption (Tabelle 1).....	314
Tabelle C-127:	Analysefehler bei Anwendung der Domestic Technology Assumption (Tabelle 2).....	315
Tabelle D-128:	Klassifikation der Produktionsbereiche im MRIO-Datensatz GLORIA.....	317
Tabelle E-129:	Abgrenzung des Digitalisierungssektors in den gesamtwirtschaftlichen Bewertungen.....	321
Tabelle F-130:	Datengrundlage zu Abbildung 81.....	323
Tabelle F-131:	Datengrundlage zu Abbildung 82.....	324
Tabelle F-132:	Datengrundlage zu Abbildung 83.....	325
Tabelle F-133:	Datengrundlage zu Abbildung 84.....	327
Tabelle F-134:	Datengrundlage zu Abbildung 85.....	329
Tabelle F-135:	Datengrundlage zu Abbildung 86.....	330
Tabelle F-136:	Datengrundlage zu Abbildung 87.....	332
Tabelle F-137:	Datengrundlage zu Abbildung 88.....	332
Tabelle F-138:	Datengrundlage zu Abbildung 89.....	333
Tabelle F-139:	Datengrundlage zu Abbildung 90.....	335

Tabelle F-140:	Datengrundlage zu Abbildung 91	337
Tabelle F-141:	Datengrundlage zu Abbildung 92	338
Tabelle F-142:	Datengrundlage zu Abbildung 93	340
Tabelle F-143:	Datengrundlage zu Abbildung 94	341
Tabelle F-144:	Datengrundlage zu Abbildung 95	343
Tabelle F-145:	Datengrundlage zu Abbildung 96	344
Tabelle F-146:	Datengrundlage zu Abbildung 97	345
Tabelle F-147:	Datengrundlage zu Abbildung 102	347
Tabelle F-148:	Datengrundlage zu Abbildung 103	351
Tabelle F-149:	Datengrundlage zu Abbildung 109	353
Tabelle F-150:	Datengrundlage zu Abbildung 110	354
Tabelle F-151:	Datengrundlage zu Abbildung 111	355
Tabelle F-152:	Datengrundlage zu Abbildung 113	370
Tabelle F-153:	Datengrundlage zu Abbildung 114	376
Tabelle F-154:	Datengrundlage zu Abbildung 115	379
Tabelle F-155:	Datengrundlage zu Abbildung 116	383
Tabelle F-156:	Datengrundlage zu Abbildung 117	386
Tabelle F-157:	Datengrundlage zu Abbildung 118	387
Tabelle F-158:	Datengrundlage zu Abbildung 119	388
Tabelle F-159:	Datengrundlage zu Abbildung 120	389
Tabelle F-160:	Datengrundlage zu Abbildung 121	390
Tabelle F-161:	Datengrundlage zu Abbildung 122	391
Tabelle F-162:	Datengrundlage zu Abbildung 123	398

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Erklärung
ADP	Abiotic Depletion Potential
CED	Kumulierter Energieaufwand (engl. Cumulative energy demand)
EED	EU-Energieeffizienz-Richtlinie
GLO	Global
GWP	Treibhausgaspotenzial (engl. Global warming potential)
KEA	Kumulierter Energieaufwand
KRA	Kumulierter Rohstoffaufwand
KSG	Bundes-Klimaschutzgesetz
LCA	Lebenszyklusanalyse (engl. Life Cycle Assessment)
LOP	Landnutzungspotenzial (engl. Land occupation potential)
PEF	Product Environmental Footprint
PMF	Product Material Footprint
RMC	Raw Material Consumption (Rohstoff-Fußabdruck)
RMC_{Dig.}	Raw Material Consumption (Rohstoff-Fußabdruck) der Digitalisierung
RMI	Primärrohstoffeinsatz (engl. Raw Material Input)
RMI_{Dig.}	Primärrohstoffeinsatz (engl. Raw Material Input) der Digitalisierung
Sb-Äq.	Antimonäquivalente
SCP	zusätzliches Kostenpotenzial (engl. Surplus Cost Potential)
SHS	Smart Heating-System
SOP	überschüssiges Erzpotezial (engl. Surplus Ore Potential)
TMR	Gesamtprimärrohstoffaufwand (engl. Total Material Requirement)
WDP	Wasserfußabdruck (engl. Water depletion potential)
WU	Wirtschaftsuniversität

A Bestandsaufnahme

A.1 Leitfragen zu den einzelnen Berichtskapiteln für die Analyse des Diskussionsstandes

Tabelle A-1: Leitfragen zu den einzelnen Berichtskapiteln für die Analyse des Diskussionsstandes

Kategorie	Frage
Generell	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Diskutiert das Instrument Ressourcenintensität der Digitalisierung? ▶ Wenn ja, können wir Inhalte daraus für unser Forschungsvorhaben verwenden? / Liefert der Diskussionsstand ein Ergebnis bzw. einen Input für mindestens ein Kapitel dieses Vorhabens? ▶ Welche Inhalte aus dem Instrument etc. können wir für das Vorhaben nutzen?
System- und Betrachtungsgrenzen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Was sind die am häufigsten diskutierten (Teil-) Systeme der Digitalisierung (z. B. Endgeräte oder Datenzentren)? ▶ Was sind die am häufigsten diskutierten Sektoren im Zusammenhang mit Digitalisierung (sowohl als negative sowie positive Beiträge zum Ressourcenbedarf)? ▶ Welches sind die am häufigsten diskutierten Indikatoren für die Analyse der Ressourcenintensität sowie weiterer Umweltwirkungen (z. B. Energie / CO₂)? ▶ Welche Digitalisierungstrends (z. B. Automatisierung, Sharing, E-Commerce, Online-Konferenzen) und technologischen Innovationen gibt es bei Hardware (z. B. Miniaturisierung von Geräten, Leistungssteigerung in der Halbleitertechnik)? ▶ Was sind aktuelle Marktentwicklungen (z. B. Datenverkehr, Ausbau 5G, ...)?
Fallstudien Lebenszyklusdaten	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Separate Recherche für dieses Kapitel in der Recherche zu quantitativen Ergebnissen im Hinblick auf die Ressourcen- bzw. Rohstoffanspruchnahme der Digitalisierung auf Mikroebene
Makroökonomische Berechnungen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Welche anderen Volkswirtschaften (Länder) sind besonders wichtig für die Ressourcenbedarfe der Digitalisierung in Deutschland?
Simulationen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Separate Recherche für dieses Kapitel in der Recherche zu quantitativen Ergebnissen im Hinblick auf die Ressourcen- bzw. Rohstoffanspruchnahme der Digitalisierung auf Meso- und Makroebene
Diskussion und Ableitung von Gestaltungssätzen	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Werden Bereiche zur Verbesserung des Umgangs mit Ressourcen in der Digitalisierung identifiziert (Empfehlungen, identifizierte Lücken, etc.; Politik, Forschung, andere Felder)?

Kategorie	Frage
	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Hängen die identifizierten Bereiche mit den Betrachtungsebenen und Systemgrenzen (Kapitel 3 des Abschlussberichts) zusammen? Finden sich Verbindungen zu den Resultaten aus den makroökonomischen Berechnungen und Simulationen? ▶ Werden konkrete Maßnahmen (bspw. veranlasst durch die Politik, in der Forschung oder durch gesellschaftlichen Wandel) zur Verbesserung der Nachhaltigkeit der Digitalisierung identifiziert?
Produkte des Vorhabens	<ul style="list-style-type: none"> ▶ Erstellung wissenschaftliches Papier: Welches peer-reviewed Journal kommt zur Veröffentlichung in Frage? ▶ Konferenzbeitrag: Welche Konferenz kommt in Frage zur Präsentation von Projektergebnissen? ▶ Konferenzbeitrag: Wer sind die <i>big player</i> im Bereich Digitalisierung und Ressourcennutzung, die zu einer Diskussionsrunde eingeladen werden sollten? Gibt es Personen / Institutionen, die in allen relevanten Projekten / Initiativen vertreten sind?

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

A.2 Rechercheergebnisse Analyse des Diskussionsstandes (Standards und Normen)

Tabelle A-2: Rechercheergebnisse zum Diskussionsstand (Standards und Normen)

Themenkomplex	Dokument	Titel	Datum
Lieferkette	DIN EN IEC 62474 (VDE 0042-4)	Materialdeklaration für Produkte der elektrotechnischen Industrie und für die elektrotechnische Industrie	2019-09
Reparierbarkeit; Recycling	DIN EN 45554	Allgemeine Verfahren zur Bewertung der Reparier-, Wiederverwend- und Erweiterbarkeit energieverbrauchsrelevanter Produkte	2020-10
Reparierbarkeit; Recycling	DIN EN 50625-Normenreihe	Sammlung, Logistik und Behandlung von Elektro- und Elektronik-Altgeräten (WEEE)	-
Ressourceneffizienz	DIN EN 62430	Umweltbewusstes Gestalten von elektrischen und elektronischen Produkten	2010-02
Ressourceneffizienz	IEC TR 62824	-	2016-05
Ressourceneffizienz	VDI 4800 Blatt 1	Ressourceneffizienz; Methodische Grundlagen, Prinzipien und Strategien	2016-02
Ressourceneffizienz	VDI 4800 Blatt 2	Ressourceneffizienz; Bewertung des Rohstoffaufwands, Rohstoffkritikalität	2018-3

Themenkomplex	Dokument	Titel	Datum
Ressourceneffizienz	VDI 4800 Blatt 3	Ressourceneffizienz; Indikatoren zur Bewertung von Umweltwirkungen	2018-11
Ressourceneffizienz	VDI 4803	Methoden zum effizienten Umgang mit Ressourcen in Unternehmen	-
Ressourceneffizienz	DIN EN 50693	Verfahren für quantitative umweltgerechte Produktgestaltung über Ökobilanzen und Umweltdeklarationen mittels Produktkategorieregeln für EEE	2018-12
Ressourceneffizienz	VDI-EE 4802 Blatt 1	Ressourceneffizienz im Bauwesen; Gebäude	2021-03
Ressourceneffizienz	VDI ZRE Leitfaden	Leitfaden Ressourceneffizienz	2019-05
Rohstoffe	DIN EN 45558	Allgemeines Verfahren zur Deklaration der Verwendung kritischer Rohstoffe	2019-10
Rohstoffe	VDI 4800 Blatt 2	Ressourceneffizienz - Bewertung des Rohstoffaufwands	2018-03
Rohstoffe	VDI-Statusreport	Strategische Nutzung von Rohstoffen in Deutschland	2020-11
Rohstoffe, Lieferkette	ZVEI Leitfaden	Konfliktrohstoffe in der Lieferkette - Übersicht über Regulierungen und Pflichten für Unternehmen	2020-12
Umweltschutz; -management	DIN EN ISO 14001	Umweltmanagementsysteme - Anforderungen mit Anleitung zur Anwendung	2015-11
Umweltschutz; -management	DIN EN ISO 14002-1	Umweltmanagementsysteme - Leitlinien für die Nutzung von ISO 14001 zur Behandlung von Umweltaspekten und -zuständen innerhalb eines Umweltthemengebiets - Teil 1: Allgemeines	2020-12
Umweltschutz; -management	DIN EN ISO 14040	Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen	2021-02
Umweltschutz; -management	DIN EN ISO 14044	Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen	2021-02
Umweltschutz; -management	DIN EN ISO 14067	Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung	2019-02
Umweltschutz; -management	DIN EN ISO 14021	Umweltkennzeichnungen und -deklarationen - Umweltbezogene Anbietererklärungen (Umweltkennzeichnung Typ II)	2016-07

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

A.3 Zusammenhang zwischen Projektergebnissen aus den einzelnen Kapiteln

Tabelle A-3: Ergebnisbedarfe zwischen den einzelnen Forschungsvorhaben

Kapitel/Arbeitsschritte der Ergebnisbereitstellung	Kapitel mit Ergebnisbedarf	Beschreibung des benötigten Ergebnisses
Bestandsaufnahme (Kapitel 2)	Alle Kapitel	<p>Überblick über Stand des Wissens im Bereich Politik und Wissenschaft</p> <p>Überblick über quantitative Arbeiten und ihre mögliche Verwendung in den anderen Kapiteln</p> <p>Einheitliches Verständnis der übergeordneten Projektziele sowie der entsprechenden Inhalte und Ergebnisse der einzelnen Kapitel.</p>
Bestandsaufnahme (Analyse des Diskussionsstandes)	System- und Betrachtungsgrenzen (Kapitel 3)	<p>Am häufigsten diskutierte (Teil-) Systeme der Digitalisierung (z. B. Endgeräte oder Datenzentren)</p> <p>Am häufigsten diskutierten Sektoren im Zusammenhang mit Digitalisierung (sowohl als negative als auch positive Beiträge zum Ressourcenbedarf)</p> <p>Am häufigsten diskutierte Indikatoren für die Analyse der Ressourcenintensität sowie weiterer Umweltwirkungen (z. B. Energie/CO₂, WEEE)</p> <p>Digitalisierungstrends (z. B. Automatisierung, Sharing, E-Commerce, Online-Konferenzen)</p> <p>Technologische Innovationen bei Hardware (z. B. Miniaturisierung von Geräten, Leistungssteigerung in der Halbleitertechnik)</p> <p>Marktentwicklungen (z. B. Datenverkehr, Ausbau 5G, etc. ...)</p>
Bestandsaufnahme (Recherche zu quantitativen Ergebnissen im Hinblick auf die Ressourcen- bzw. Rohstoffanspruchnahme der Digitalisierung auf Mikroebene)	Fallstudien Lebenszyklusdaten (Kapitel 4)	<p>Umfassender Überblick über quantitative Informationen und Daten zu (Teil-) Systemen der Digitalisierung</p> <p>Potenzielle Lücken bzw. Empfehlungen zur quantitativen Bewertung von (Teil-) Systemen der Digitalisierung</p> <p>Potenzielle Daten-/Informationsquelle für Aktualisierung bzw. Validierung der Fallstudien</p>
System- und Betrachtungsgrenzen (Kapitel 3)	Fallstudien Lebenszyklusdaten (Kapitel 4)	Eindeutige Kategorisierung, Gruppierung und Benennung von einschlägigen (Teil-) Systemen der Digitalisierung

Kapitel/Arbeitsschritte der Ergebnisbereitstellung	Kapitel mit Ergebnisbedarf	Beschreibung des benötigten Ergebnisses
		Empfehlungen zur Detailtiefe bzw. Betrachtungsebene für die Fallstudien (z. B. Systemebene, Produktebene, Komponentenebene)
Makroökonomische Berechnungen/Simulationen (Kapitel 5,6)	Fallstudien Lebenszyklusdaten (Kapitel 4)	Identifikation von Ressourcenbedarfen, die bei ökobilanziellen Betrachtungen außer Acht gelassen werden, aufgrund der methodischen Herangehensweise (z. B. Versicherungen, Finanzprodukte, Dienstleistungen)
Bestandsaufnahme/System- und Betrachtungsgrenzen (Kapitel 2, 3)	Makroökonomische Berechnungen (Kapitel 5)	Abgrenzung der Digitalwirtschaft (Sektoren der WZ08, die ganz oder teilweise der Digitalwirtschaft zuzurechnen sind)
Fallstudien Lebenszyklusdaten (Kapitel 4)	Makroökonomische Berechnungen (Kapitel 5)	Rohstoffintensität der analysierten Produkte/Technologien (Status quo und Dynamik bis 2060) Marktrelevanz der analysierten Produkte/Technologien (Status quo und Dynamik bis 2060)
Bestandsaufnahme (Kapitel 2)	Simulationen (Kapitel 6)	Szenarien der Digitalisierung (in Deutschland/global) bis 2060 Auswirkungen der Digitalisierung auf die Ressourceneffizienz in verschiedenen Branchen
Diskussion und Ableitung von Gestaltungssätzen (Kapitel 7)	Simulationen (Kapitel 6)	Zu berücksichtigende (Politik-) Stellschrauben für Simulations-Experimente
Bestandsaufnahme (Kapitel 2)	Diskussion und Ableitung von Gestaltungssätzen (Kapitel 7)	Bereits bekannte Methoden und Maßnahmen für ressourcenschonende Digitalisierung bspw. in Form von Richtlinien Angrenzende Themenfelder, die bedeutend für die Ressourcenintensität der Digitalisierung sind
System- und Betrachtungsgrenzen (Kapitel 3)	Diskussion und Ableitung von Gestaltungssätzen (Kapitel 7)	Darstellung und Erläuterung des Systems Digitalisierung mit seinen System- und Betrachtungsgrenzen
Fallstudien Lebenszyklusdaten (Kapitel 4)	Diskussion und Ableitung von Gestaltungssätzen (Kapitel 7)	Bereiche und Schnittstellen der Digitalisierung, die den größten Ressourcenbedarf aufweisen, identifiziert in den Fallstudien/auf produktspezifischer Ebene Problematiken aufgrund der Digitalisierung identifiziert in den Fallstudien/auf produktspezifischer Ebene Trends in der Entwicklung der Ressourcenintensität aufgrund der Digitalisierung auf produktspezifischer Ebene Ggf. identifizierte best practices in den Fallstudien

Kapitel/Arbeitsschritte der Ergebnisbereitstellung	Kapitel mit Ergebnisbedarf	Beschreibung des benötigten Ergebnisses
Makroökonomische Berechnungen/Simulationen (Kapitel 5,6)	Diskussion und Ableitung von Gestaltungssätzen (Kapitel 7)	<p>Sektoren mit Bereichen und Schnittstellen in der Digitalisierung, die den größten Ressourcenbedarf aufweisen</p> <p>Sektorspezifische und makroökonomische Problematiken aufgrund der Digitalisierung</p> <p>Trends in der Entwicklung der Ressourcenintensität aufgrund der Digitalisierung</p>
Weiterer Forschungsbedarf (Kapitel 8)	Diskussion und Ableitung von Gestaltungssätzen (Kapitel 7)	<p>Aktuelle Methoden und politische Strategien für ressourcenschonende Digitalisierung</p> <p>Identifizierte Chancen und Lücken für politisches Handeln und Forschungsbedarf</p>
Kapitel 2-8	Produkte des Vorhabens (Fachbroschüre)	Zentrale Ergebnisse inkl. Methodenbeschreibungen der einzelnen Kapitel
Bestandsaufnahme	Produkte des Vorhabens	<p>Relevante Peer-review Journale mit Bezug zu Digitalisierung/Ressourcenschonung</p> <p>Relevante Konferenzen mit Bezug zu Digitalisierung/Ressourcenschonung Digitalisierung</p> <p>Relevante Institutionen/Projekte/Initiativen/Personen im Bereich ressourcenschonende Digitalisierung und Modellierung dieser</p>

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

A.4 Suchbegriffe für Recherche zu quantitativen Vorarbeiten auf Mikroebene

Tabelle A-4: Suchbegriffe für fokussierte Recherche quantitativer Ergebnisse auf Mikroebene

Deutsch	Englisch
Ausstattung	Equipment
Digitale Produkte	Digital goods
Digitale Services	Digital services
Digitaler Wandel	Digital transformation
Digitalisierung	Digitalis(z)ation
Emissionen	Emissions
Energiebedarf	Energy demand
Energieeffizienz	Energy efficiency
Informations- und Kommunikationstechnologie (IKT)	Information and communication technologies (ICT)
Ökobilanz	Life Cycle Assessment (LCA)
Ökologische Aspekte	Environmental aspects
Ökologischer Fußabdruck	Environmental footprint
Produkt	Product
Prozess	Process
Ressourcenbedarf	Resource demand
Ressourceneffizienz	Resource efficiency
Ressourcenintensität	Resource intensity
Rohstoffe	Resources
Sachbilanz	Inventory
Strombedarf	Electricity use
Treibhausgasemissionen	Greenhouse gas emissions
Umweltproduktdeklaration	Environmental product declaration
Umweltwirkungen	Environmental impacts
Wirkungsabschätzung	Impact assessment

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

A.5 Wirtschaftszweige WZ 2008

Tabelle A-5: Wirtschaftsbereiche in den Input-Output-Tabellen des Statistischen Bundesamtes und deren Digital-Anteil im Jahr 2018

WZ 2008	Wirtschaftsbereich	Digital-Anteil ²
01	Landwirtschaft	0.4%
02	Forstwirtschaft	0.7%
03	Fischerei	0.0%
05-09	Bergbau und Gewinnung von Steinen und Erden	2.9%
10-12	H. v. Nahrungsmitteln u. Getränken, Tabakverarb.	0.7%
13-15	H. v. Textilien, Bekleidung, Lederwaren u. Schuhen	1.2%
16	H. v. Holz-, Flecht-, Korb- u. Korkwaren (oh. Möbel)	0.9%
17	H. v. Papier, Pappe und Waren daraus	1.5%
18	H. v. Druckerzgn., Vervielfält. v. Ton-, Bild-, Datenträgern	6.5%
19	Kokerei und Mineralölverarbeitung	0.6%
20	H. v. chemischen Erzeugnissen	2.7%
21	H. v. pharmazeutischen Erzeugnissen	5.3%
22	H. v. Gummi- und Kunststoffwaren	1.5%
23	H. v. Glas-, -waren, Keramik, Verarb. v. Steinen u. Erden	2.1%
24	Metallerzeugung und -bearbeitung	1.4%
25	H. v. Metallerzeugnissen	3.0%
26	H. v. DV-Geräten, elektron. u. optischen Erzeugnissen	43.1%
27	H. v. elektrischen Ausrüstungen	13.2%
28	Maschinenbau	5.6%
29	H. v. Kraftwagen und Kraftwagenteilen	2.0%
30	Sonstiger Fahrzeugbau	2.8%
31-32	H. v. Möbeln u. sonstigen Waren	11.9%
33	Rep. u. Installation v. Maschinen u. Ausrüstungen	13.7%
35	Energieversorgung	2.8%

² Anteil der Vorleistungsinputs ‚DV-Geräte, elektron. u. optische Erzeugnisse (CPA 26)‘, ‚Telekommunikationsdienstleistungen (CPA 61)‘ und ‚IT- und Informationsdienstleistungen (CPA 62-63)‘ an den gesamten Vorleistungsinputs. Datengrundlage: Statistisches Bundesamt (2021): Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen – Input-Output-Rechnung 2018 (Revision 2019, Stand: August 2020).

WZ 2008	Wirtschaftsbereich	Digital-Anteil ²
36	Wasserversorgung	5.8%
37-39	Abwasser-, Abfallentsorgung; Rückgewinnung	6.5%
41-43	Baugewerbe	1.0%
45	Kfz-Handel; Instandhaltung u. Rep. v. Kfz	2.5%
46	Großhandel (oh. Handel mit Kfz)	6.5%
47	Einzelhandel (oh. Handel mit Kfz)	4.5%
49	Landverkehr u. Transport in Rohrfernleitungen	3.2%
50	Schifffahrt	0.3%
51	Luftfahrt	2.8%
52	Lagerei, sonst. Dienstleister f. d. Verkehr	3.3%
53	Post-, Kurier- und Expressdienste	13.3%
55-56	Gastgewerbe	2.9%
58	Verlagswesen	24.1%
59-60	Audio-visuelle Medien und Rundfunk	9.5%
61	Telekommunikation	55.0%
62-63	IT- und Informationsdienstleister	77.9%
64	Finanzdienstleister	10.0%
65	Versicherungen und Pensionskassen	5.8%
66	Mit Finanz- und Versicherungsdienstl. verb. Tätigkeiten	7.9%
68	Grundstücks- und Wohnungswesen	1.2%
69-70	Rechts- u. Steuerberatung, Unternehmensberatung	7.4%
71	Architektur- u. Ing. büros; techn. Untersuchung	7.1%
72	Forschung und Entwicklung	32.6%
73	Werbung und Marktforschung	15.7%
74-75	Freiberufl., wiss., techn. DL a.n.g., Veterinärwesen	9.4%
77	Vermietung von beweglichen Sachen	4.8%
78	Vermittlung und Überlassung von Arbeitskräften	23.0%
79	Reisebüros und -veranstalter	6.7%
80-82	Unternehmensdienstleister a.n.g.	6.1%

WZ 2008	Wirtschaftsbereich	Digital-Anteil ²
84	Öff. Verwaltung, Verteidigung; Sozialversicherung	10.3%
85	Erziehung und Unterricht	7.1%
86	Gesundheitswesen	4.8%
87-88	Heime und Sozialwesen	6.6%
90-92	Kunst und Kultur, Glücksspiel	11.8%
93	Sport, Unterhaltung und Erholung	3.6%
94	Interessenvertretungen, religiöse Vereinigungen	5.3%
95	Rep. v. DV-Geräten u. Gebrauchsgütern	24.0%
96	Sonstige überwiegend persönl. Dienstleister	4.2%
97-98	Häusliche Dienste	n.d.

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

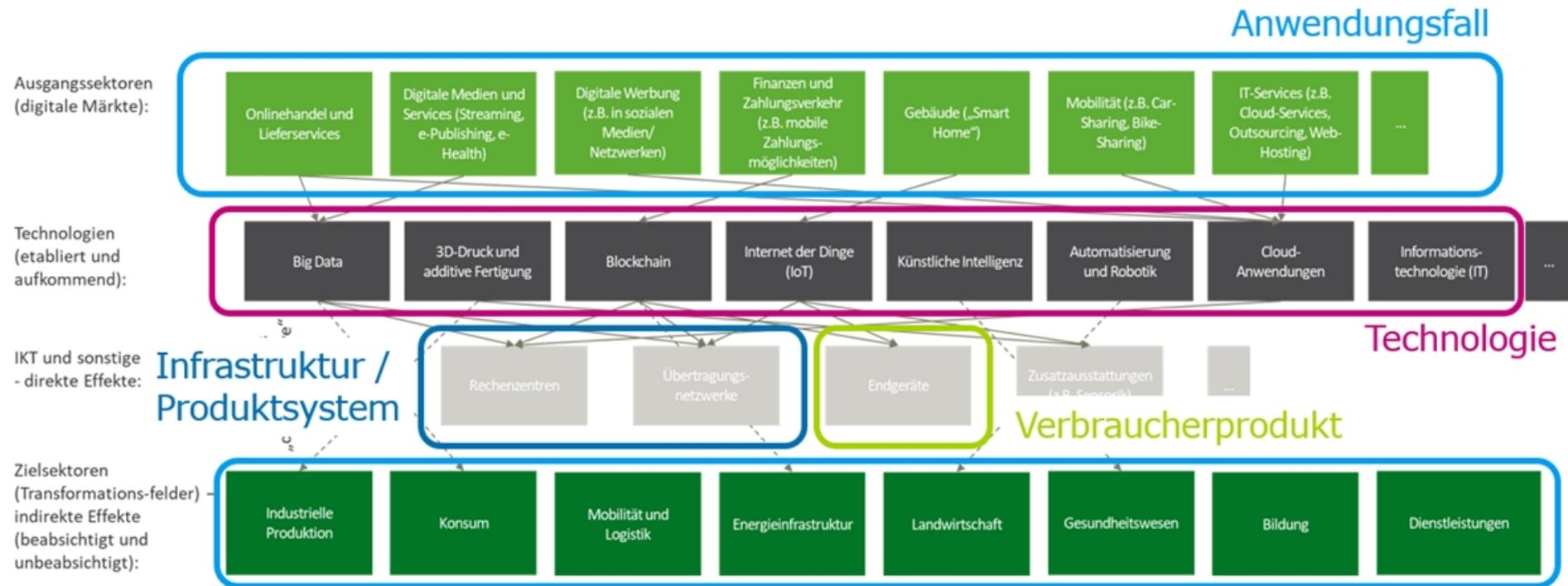
B Fallstudien Lebenszyklusdaten

B.1 Auswahl der Fallstudien

Zur Betrachtung der Ressourcenintensität auf Mikroebene wurde in Kapitel 2.4.1 des Berichts „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a) dargestellt, dass sich die Fallstudien jeweils auf einen konkreten Anwendungsfall beziehen sollten. Ein Anwendungsfall umfasst IKT und weitere Hardware in Verbindung mit einer Software und/oder Technologie, um einen konkreten Nutzen oder Service (digitale Anwendung) bereitzustellen. Je nach Anwendungsfall können auch mehrere physische Produkte (z. B. digitale Endgeräte oder digitale Infrastrukturen) und Technologien inbegriffen sein (vgl. Abbildung B-1). Weiterhin können die Anwendungsfälle idealerweise je einem Ausgangs- und Zielsektor zugeordnet werden. Ausgangssektoren beschreiben digitale Märkte, wie sie beispielsweise von statistischen Daten vorgegeben werden (siehe hierzu z. B. Marktverzeichnis auf Statista (Statista, 2022b)). Die Zielsektoren beschreiben wiederum die jeweiligen Transformationsfelder bzw. die indirekten Effekte des jeweiligen Anwendungsfalls (z. B. beabsichtigte Umweltentlastungspotenziale).

Die **folgende Abbildung B-1 zeigt** die Abgrenzung zwischen den Anwendungsfällen, Technologien und digitalen Produkten bzw. Infrastrukturen, die sich in das in Kapitel 3 des Berichts „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a) definierte „**System Digitalisierung**“ einordnen lassen.

Abbildung B-1: Abgrenzung zwischen Anwendungsfällen, Technologien und digitalen Produkten bzw. Infrastrukturen (basierend auf konzeptioneller Perspektive auf das System Digitalisierung)



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

Die Fallstudien und Anwendungsfälle sollten so gewählt werden, dass sich wichtige Produkte und Technologien dort wiederfinden. Der **primäre Fokus** galt in diesem Vorhaben der Erhebung von Sachbilanzdaten (Input-Output Tabellen) sowie ausgewählten **Ressourcen-Indikatoren** und nicht der vollständigen Ökobilanzierung.

Die finale Auswahl der Fallstudien für dieses Vorhaben erfolgte in enger Abstimmung mit dem Umweltbundesamt (UBA). Die Auswahl sollte einerseits einen repräsentativen Überblick über wichtige Fallstudien (Produkte, Technologien, etc.) der Digitalisierung gewährleisten, andererseits aber auch Informationen für die weiteren Forschungsvorhaben des Projekts bereitstellen und zuletzt eine interessante Außendarstellung des Vorhabens ermöglichen. Dies könnten u. a. politische Relevanz, Datenverfügbarkeit, Signifikanz und Rolle im „System Digitalisierung“ sein. Schließlich erfolgte die Auswahl der Fallstudien mit Bezug zu den wesentlichen Teilbereichen der Digitalisierung und idealerweise mit dem Ziel, vorhandene Lücken mit Blick auf den derzeitigen wissenschaftlichen Stand zu schließen und damit neues Wissen zu generieren.

Für die Priorisierung und Auswahl von **zehn repräsentativen Anwendungsfällen** wurden die folgenden Arbeitsschritte durchgeführt:

1. Top-down Vorauswahl: In diesem Schritt wurde u. a. in Anlehnung an nationale, europäische und internationale Rahmenwerke eine Vorauswahl an wesentlichen Untersuchungsgegenständen getroffen. Diese Vorauswahl wurde zudem um Empfehlungen aus der Bestandsaufnahme und Recherche zu quantitativen Vorarbeiten auf Mikroebene sowie im Hinblick auf die makroökonomischen Modellierungen ergänzt. Im Wesentlichen bestand diese Vorauswahl aus einer Sichtung von als relevant identifizierten Quellen (sog. Leit-Quellen für dieses Vorhaben). In einem nächsten Schritt wurden die identifizierten Schlagwörter kategorisiert.

2. Bottom-up Konkretisierung und Priorisierung: In diesem Schritt wurden weitere einschlägige Auswahlkriterien entwickelt und auf die Vorauswahl angewandt. Die Kriterien umfassten beispielsweise die Datenverfügbarkeit, die Verbindung zu den folgenden Forschungsvorhaben sowie die Repräsentativität für das Thema Digitalisierung, die Diversität bei den ausgewählten Fallstudien und ihre Bedeutung für Politik und Umweltschutz bzw. das Zukunftspotenzial. Auf Basis dieser Multi-Kriterien-Analyse wurde eine Priorisierung der Fallstudien vorgenommen, die das „System Digitalisierung“ und dessen Ressourcenintensität gut repräsentierten und die anschließend einem Kreis von Experten*Expertinnen vorgestellt wurde.

3. Finale Festlegung: Für die schlussendliche Festlegung der zu bearbeitenden Fallstudien wurde die priorisierte Liste mit dem UBA auf einem Projekttreffen im Januar 2022 diskutiert. Dabei wurden Vorschläge des Auftragnehmers besprochen und weitere Alternativen diskutiert. Die Auswahl sollte sich auf Digitalisierungsanwendungen von Endverbraucher*innen bzw. Endanwender*innen fokussieren, da der Bereich Industrie und B2B (z. B. Industrie 4.0) gemäß Projektauftrag nicht primär im Fokus des Vorhabens stand.

Die **wesentlichen Ergebnisse** bei der Auswahl der Fallstudien inklusive dieses Diskussionsprozesses können wie folgt zusammengefasst werden:

- ▶ Eine Vielzahl von möglichen Fallstudien wurde aus den Recherchen im Rahmen des Projekts identifiziert (Kapitel 2 des Abschlussberichts (Abraham *et al.*, 2023a³).
- ▶ Die Fallstudienauswahl basierte zunächst auf der Datenverfügbarkeit zu den einzelnen Anwendungsfällen, wie sie in Kapitel 2 des Abschlussberichts auch für die Mikroebene ermittelt wurde. Zusätzlich fand ein Literatur- und Datenbankscreening hinsichtlich der verfügbaren Daten statt.
- ▶ Die Ergebnisse wurden durch Einschätzungen von Experten*Expertinnen seitens des Projektteams besonders bezüglich der Projektrelevanz weiter eingegrenzt.
- ▶ Eine weitere Einschätzung von Experten*Expertinnen der verbleibenden Ergebnisse mit Vertreter*innen des UBA fand hinsichtlich der Diversität der Anwendungsfälle und ihrer zukünftigen und heutigen Bedeutung im Bereich der Digitalisierung statt. Hierbei wurde auch eine gewünschte Anwender*innen-Ebene/Konsumenten*Konsumentinnen-Perspektive der Auswahl hervorgehoben.

Der Auswahlprozess führte mit Blick auf die angelegten Kriterien zu einer Liste von zehn Fallstudien digitaler Anwendungen, die im weiteren Verlauf hinsichtlich ihrer Ressourcenintensität betrachtet werden sollten. Die finale Liste der zu bearbeitenden zehn Fallstudien ist zusammenfassend in Tabelle B-1 dargestellt.

Tabelle B-1: 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-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

³ Siehe www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen (Stand: 31.12.2023).

B.2 Vorgehensweise bei der Berechnung der Ressourcenintensität und weiterer Indikatoren

Dieses Kapitel ist der Anhang zu Kapitel 4.2 „Vorgehensweise bei der Berechnung der Ressourcenintensität und weiterer Indikatoren“ des Berichts „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a).

Im eigentlichen Abschlussbericht „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a) wurde wegen der großen Komplexität und Fülle an Information das Arbeitspaket „Fallstudien Lebenszyklusdaten“ lediglich in einer zusammenfassenden Darstellung behandelt.

Im Folgenden wird daher in diesem Anhang zum Abschlussbericht eine ausführliche Darstellung der „Fallstudien Lebenszyklusdaten“ dokumentiert.

Nach einer Bestandsaufnahme (Kapitel 2 in „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a)) und der Diskussion der System- und Betrachtungsgrenzen (Kapitel 3 in „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a)) sollten in diesem Teil des Vorhabens eine Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland beispielhaft auf Mikroebene durchgeführt werden. Dazu sollten für insgesamt **zehn typische** Produkte, Technologien, Infrastrukturen, etc. der Digitalisierung ausführliche Fallstudien erarbeitet werden.

Ziel war die Analyse von Lebenszyklusdaten, die eine Einschätzung bzw. Berechnung der Rohstoffintensität (kumulierter Rohstoffaufwand bzw. des *Material Footprint*), des Treibhausgaspotenzials sowie weiterer ausgewählter Indikatoren erlauben. In den zehn Fallstudien sollte beispielhaft dargestellt werden, welche Rohstoffe, Materialien und Energie sowie Treibhausgase im Lebenszyklus von ausgewählten digitalen Lösungen oder Anwendungen benötigt werden und welche weiteren umweltrelevanten Wirkungen bekannt sind und beispielhaft bemessen werden können.

Die Arbeiten bauen auf den gewonnenen Informationen aus der Recherche auf Mikroebene sowie auf den Diskussionen und Erkenntnissen aus den System- und Betrachtungsgrenzen (siehe Kapitel 3.4 und 3.5, Abraham *et al.*, 2023a) auf, indem die Ergebnisse dieser Arbeitsschritte bei der Wahl der Betrachtungsgegenstände und Definition der Systemgrenzen berücksichtigt wurden.

Die Ergebnisse der Fallstudien sollen diese Betrachtungen um fallspezifische Details zu digitalen Anwendungsfällen ergänzen. Die Ergebnisse dieses Arbeitsschrittes sollten auch erste Hinweise für die makroökonomischen Modellierungen des Ressourcenbedarfs der Digitalisierung auf volkswirtschaftlicher Ebene geben (siehe Kapitel 5-6, Abraham *et al.*, 2023a). Die gewonnenen Erkenntnisse aus der Bearbeitung der Fallstudien trugen zudem zur Diskussion und Ableitung von Gestaltungsansätzen für das Themenfeld Digitalisierung sowie zur Benennung von Politikempfehlungen und weiterem Forschungsbedarf bei (siehe Kapitel 7, Abraham *et al.*, 2023a).

B.2.1 Allgemeines Vorgehen

Komponenten, Produkte, Technologien oder Infrastrukturen der Digitalisierung sind mit unterschiedlichen Aufwendungen an natürlichen Ressourcen (Energie, Material, Wasser, Boden/Fläche) sowie negativen Umweltwirkungen (z. B. Treibhausgasemissionen) über den gesamten Lebenszyklus (*cradle-to-grave*) verbunden. Um dies quantitativ zu erfassen, bietet die Ökobilanz (*Life Cycle Assessment, LCA*) ein normiertes methodisches Vorgehen für eine Analyse und Bewertung entsprechender Umweltaspekte und den damit verbundenen möglichen Umweltauswirkungen eines Produktes oder einer Dienstleistung (Heinrich, 2009). Eine Ökobilanz beziehungsweise LCA bezieht den gesamten Lebenszyklus, von der Rohstoffgewinnung und -verarbeitung über die Herstellung, den Vertrieb und die Verwendung des Produkts bis zum Recycling oder der endgültigen Entsorgung der Materialien (*end of life*) in die Analyse ein (Kapitel 2 im Abschlussbericht „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a)). Derzeit bietet die Ökobilanz den besten und ausgereiftesten Rahmen für die Bewertung der potenziellen Umweltauswirkungen von Produkten (Europäische Kommission, 2019).

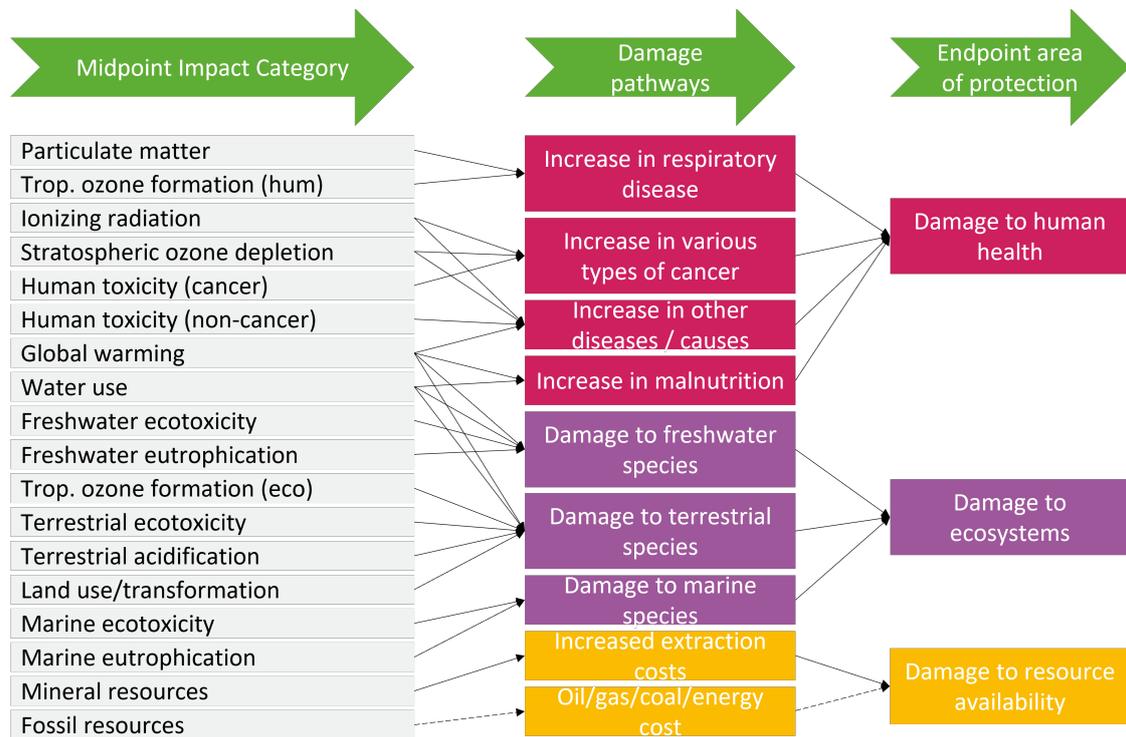
Im Rahmen von Ökobilanzen wird eine sogenannte Umweltwirkungsabschätzung auf Basis von Stoff- und Energieströmen (Sachbilanzen) durchgeführt. Der Anspruch dieser Umweltwirkungsabschätzungsmethoden (z. B. Methode „ReCiPe“ (Huijbregts *et al.*, 2016)) oder anderer etablierter Methoden wie z. B. „*EU Product Environmental Footprint*“, PEF (Europäische Kommission, 2019) ist es, die große Menge von Einzelergebnissen eines Lebenszyklusinventars (Sachbilanz) auf eine begrenzte Anzahl an Indikatoren zu aggregieren, um die jeweiligen Umweltauswirkungen auf konkrete Umweltzustände (z. B. Beitrag zum Klimawandel) zu bewerten. Die Liste der Ergebnisse eines Lebenszyklusinventars besteht aus zahlreichen Stoffen bzw. Elementarflüssen.

Bei der Übersetzung auf die Indikatorebene wurden zwei Aggregationsebenen festgelegt: **Midpoint-Indikatoren** (auch vergleichbar mit Wirkungskategorien) und **Endpoint-Indikatoren** (auch Schadenskategorien; vgl. entsprechendes Kapitel 3 des Abschlussberichts „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a)). Die LCA-Bewertungsmethodik ReCiPe identifiziert beispielsweise 18 *Midpoint*- und 3 *Endpoint*-Indikatoren (Huijbregts *et al.*, 2016). Ergebnisse von Ökobilanzen werden typischerweise in einem Set solcher Indikatoren auf Wirkungs- oder Schadenskategorie-Ebene dargestellt. *Midpoint*-Indikatoren repräsentieren einzelne Umweltzustände wie beispielsweise das Treibhauspotenzial, Toxizität, Wasserverbrauch oder die Versauerung (siehe Abbildung B-2). Mittels eines weiteren Bewertungs- und Aggregationsschrittes können diese wiederum den *Endpoint*-Indikatoren und damit den potenziellen Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit, die Ökosystemqualität und die Ressourcenknappheit zugeordnet werden (RIVM, 2011).

Abbildung B-2 zeigt beispielhaft für die Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe die verschiedenen Indikatoren auf *Midpoint*- und *Endpoint*-Ebene sowie die Verknüpfungen zwischen beiden Ebenen. Neben ReCiPe liefern andere Methoden ähnliche Wirkungskategorien.

Beispielhaft seien hier *Eco-Indicator 99* und *IMPACT 2002+* genannt. Außerdem bieten spezialisierte Methoden beispielsweise vom IPCC ein kleineres Set an Indikatoren zu – in diesem Fall – klimatischen Auswirkungen der betrachteten Produkte oder Systeme.

Abbildung B-2: Übersicht über gängige LCA-Indikatoren anhand des Beispiels der ReCiPE Wirkungsabschätzungsmethodik



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach Huijbregts *et al.* (2016)

Ziel ist es, Umweltauswirkungen in einem limitierten Set von Indikatoren zusammenzufassen und je nach Anwendung der Methodik absolute Umweltauswirkungen zu quantifizieren oder zwischen mehreren Produkten oder Dienstleistungen zu vergleichen. Besonders die aggregierte Darstellung auf Ebene der Schadenskategorien soll es ermöglichen, die dargestellten Ergebnisse besser einzuordnen zu können.

Ableitung der hier verwendeten Methodik und Abgrenzung zur typischen LCA

Das hier angewandte Vorgehen (vgl. Kapitel 4.2.1 „Allgemeines Vorgehen“ des Abschlussberichts „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a)) erfolgte in Anlehnung an LCA-Methodik. Im Gegensatz zur klassischen LCA sollten erste Ergebnisse jedoch bereits auf Ebene der Sachbilanz betrachtet werden (beispielsweise konkrete Rohstoffe oder Rohstoffgruppen). Diese Betrachtungsweise sollte helfen, die verwendeten Rohstoffe hinsichtlich der wesentlichen Treiber der Ressourcenintensität und umwelt- und ressourcenrelevanter Lebenszyklusphasen zu analysieren. Im nächsten Schritt sollten, analog zum Vorgehen bei einer klassischen LCA, diese Sachbilanz-bezogenen Informationen mit typischen Wirkungskategorien (z. B. Materialfußabdruck, Wasserfußabdruck, Landfußabdruck und Treibhauspotenzial) ergänzt werden. Für die Quantifizierung der Ressourcenintensität in den Fallstudien besteht eine ganze Reihe potenzieller Indikatoren oder Methoden, die in Kapitel B.2.3 „Indikatoren und weitere systematische Angaben zu den Fallstudien“ beschrieben und bezüglich ihrer möglichen Verwendung in den Fallstudien diskutiert werden (vgl. Kapitel 4.2.3 in Abraham *et al.* (2023a)). Doch zuvor werden detaillierte Informationen zu „Datengrundlagen und Modellierungs-Software“ (vgl. Kapitel 4.2.2 (Abraham *et al.*, 2023a)) gegeben.

B.2.2 Datengrundlagen und Modellierungs-Software

Um die Ressourcenintensität und die in diesem Vorhaben betrachtete Indikatoren digitaler Anwendungsfälle abbilden und berechnen zu können, wurden Daten zu den Anwendungsfällen gesammelt und in einer Art und Weise kompiliert, die eine Aussage über das jeweilige Produktsystem bzw. den jeweiligen Anwendungsfall erlaubt. Da in diesem Vorhaben aus Kapazitätsgründen keine neuen Primärdaten erhoben werden konnten, wurden geeignete Datenbanken und -quellen identifiziert und zur Übersetzung der Daten in das Produktsystem der einzelnen Anwendungsfälle eine Softwarelösung identifiziert und ausgewählt. Im Folgenden wird auf die verschiedenen identifizierten Möglichkeiten zur Datenbank- und Softwarenutzung eingegangen und der Auswahlprozess der im Vorhaben letztendlich verwendeten Lösung beschrieben.

B.2.2.1 Auswahl der Softwarelösung

Die Wahl der Softwarelösung, in welcher die Modellierung der in den Fallstudien dargestellten Anwendungsfälle erfolgte, war maßgeblich von der zuvor beschriebenen Wahl der verwendeten Datenbank bestimmt, da nicht jede Datenbank für jede Softwarelösung verfügbar ist. Im Falle der Ecoinvent-Datenbank standen mehrere prominente Softwarelösungen zur Verfügung. Hierzu zählen SimaPro von Pré Sustainability⁴, Umberto von iPoint-systems, OpenLCA von GreenDelta und die GaBi Software von Sphera⁵. Zum Zeitpunkt der Softwarewahl war die neueste Version der Ecoinvent-Datenbank (3.8) noch nicht für die GaBi-Softwareumgebung verfügbar, da nach Veröffentlichung einer neuen Ecoinvent-Version die entsprechenden aktualisierten Datensätze zunächst in die Semantik der GaBi-Datenbank übersetzt werden mussten. Aus diesem Grund wurde eine Verwendung der GaBi-Softwarelösung für dieses Vorhaben ausgeschlossen. Zwischen SimaPro, Umberto und OpenLCA fiel die Wahl der **Softwarelösung** für dieses Vorhaben nach einiger Abwägung auf **OpenLCA**⁶, da diese Software als einzige unter den drei genannten frei verfügbar ist und die dort verwendete tabellarische Darstellungsform eine strukturierte und systematische Modellierungsweise fördert. Die Hauptindikatoren für die Fallstudien konnten als Wirkungsabschätzungsmethode eingebunden werden (Details siehe Kapitel B.2.4.3). Zudem wurden sowohl in der SimaPro als auch in der Umberto Softwarelösung keine Aspekte identifiziert, welche in der Verwendung im Rahmen dieses Projekts einen klaren Vorteil gegenüber der Nutzung von OpenLCA dargestellt hätten.

Die für die Fallstudien bestimmten Indikatoren und die jeweiligen Berechnungsgrundlagen sind bereits in gängigen Softwarelösungen für die ökobilanzielle Untersuchung, unter ihnen auch OpenLCA, integriert. Für die genannten Nebenindikatoren sind teilweise mehrere Wirkungsabschätzungsmethoden verfügbar. Die konkrete Methode wurde unter Berücksichtigung der Datenverfügbarkeit und -qualität auf Sachbilanzebene ausgewählt. Darüber hinaus sollte gewährleistet werden, dass die unterschiedlichen Fallstudien auf die gleichen Methoden zurückgreifen, sofern dies möglich ist. Die dazu notwendige Quantifizierung und Zuschreibung von Stoff- und Energieflüssen wurde im Rahmen der Modellierung der Fallstudien und durch die Aufschlüsselung auf Sachbilanzebene erreicht. Mit Blick auf eine möglichst hohe Interoperabilität der gewonnenen Lebenszyklusdaten wurden neben der Berechnung von aggregierten Indikatoren auch die Sachbilanzen (Input-Output-Tabellen)

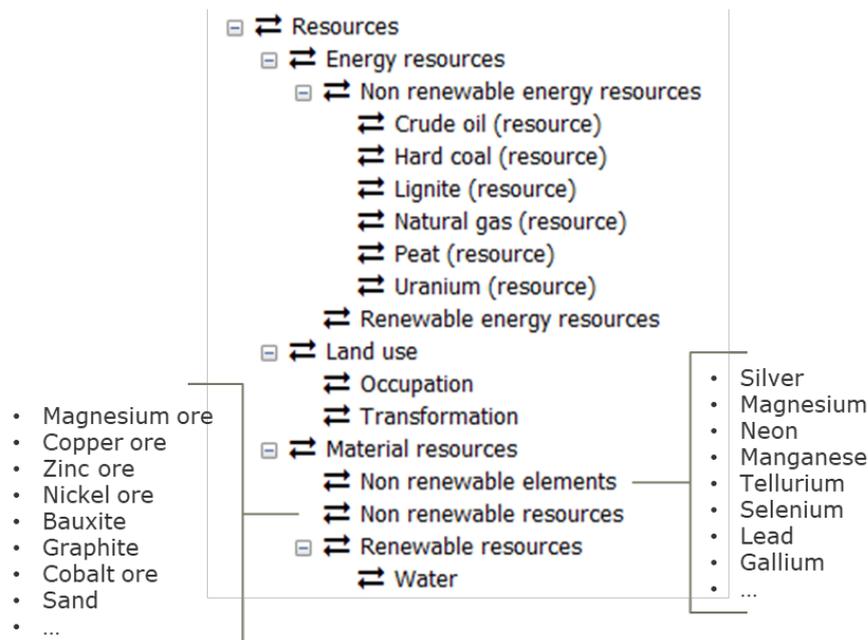
⁴ <https://simapro.com/plans/> (Stand: 20. Februar 2023)

⁵ <https://sphera.com> (Stand: 20. Februar 2023)

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

entsprechend aufbereitet und offengelegt. Dies umfasste z. B. eine Gruppierung von relevanten Stoffflüssen gemäß der etablierten Ökobilanz-Taxonomie (siehe Abbildung B-3).

Abbildung B-3: Gruppierung von Sachbilanzdaten gemäß Ökobilanz-Taxonomie



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach GaBi Software⁷

Spezifizierung der Betrachtung mittels RMI und TMR in der Softwarelösung

Zwei Indikatoren, die in den Fallstudien betrachtet werden, sind der Primärrohstoffensatz (RMI) und Gesamtprimärrohstoffaufwand (TMR). Eine ausführliche Erläuterung der Auswahl für die Indikatoren und deren genaue Beschreibung sind in Kapitel B2.3 „Indikatoren und weitere systematische Angaben“ zu finden. Letztlich erfolgt die Quantifizierung der Rohstoffintensität innerhalb der Softwarelösung anhand der Berechnung von RMI und TMR. Die aggregierten Werte der Indikatoren konnten auf Basis der jeweiligen Sachbilanzen berechnet werden. Hierzu wurden die entsprechenden Materialinputs für den Anwendungsfall (oder den Teilaspekt bzw. die Lebenszyklusphase des Anwendungsfalls) mit sogenannten Charakterisierungsfaktoren multipliziert und aufsummiert. Die dazu notwendige Wirkungsabschätzungsmethode (d. h. Datenbasis für die jeweiligen Charakterisierungsfaktoren) und Schnittstelle zu Ökobilanzsoftware wird hierzu von Bringezu *et al.* (2019) bereitgestellt (siehe Abbildung B-4). Dies ermöglicht es, den Rohstoffeinsatz und Aufwand an Primärextraktionsmaterial der digitalen Anwendungsfälle (Produktsystemen) zu messen und zu bewerten.

⁷ <https://sphera.com> (Stand: 20. Februar 2023)

Abbildung B-4: Ausschnitt aus Publikation zu Charakterisierungsfaktoren für Materialfußabdruck sowie Implementierung in Ökobilanzsoftware OpenLCA

No.	Elementary Flow "Resource, in Ground"	CF _{RMI} [kg/kg]
1	Aluminum, 24% in bauxite, 11% in crude ore, in ground	5.3
2	Aluminum, in ground	5.3
3	Anhydrite, in ground	1.0
4	Barite, 15% in crude ore, in ground	6.7
5	Basalt, in ground	1.0
6	Borax, in ground	1.0
7	Cadmium, 0.30% in sulfide, Cd 0.18%, Pb, Zn, Ag, In, in ground	735.0
8	Calcium carbonate, in ground	1.0
9	Carbon, in organic matter, in soil	1.0
10	Cerium, 24% in bastnaesite, 2.4% in crude ore, in ground	42.0
11	Chromium, 25.5% in chromite, 11.6% in crude ore, in ground	2.7
12	Chrysotile, in ground	1.0
13	Cinnabar, in ground	1.0
14	Clay, bentonite, in ground	1.0
15	Clay, unspecified, in ground	1.0
16	Coal, brown, in ground	1.0
17	Coal, hard, unspecified, in ground	1.0
18	Cobalt, in ground	115.0
19	Colemanite, in ground	1.0
20	Copper, 0.52% in sulfide, Cu 0.27% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	143.0
21	Copper, 0.59% in sulfide, Cu 0.22% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	143.0
22	Copper, 0.97% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 4.1E-2% in crude ore, in ground	143.0
23	Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	143.0
24	Copper, 1.13% in sulfide, Cu 0.76% and Ni 0.76% in crude ore, in ground	143.0
25	Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	143.0
26	Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	143.0
27	Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and Mo 8.2E-3% in crude ore, in ground	143.0
28	Copper, Cu 0.2%, in mixed ore, in ground	143.0
29	Copper, Cu 0.38%, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Pb 0.014%, in ore, in ground	143.0
30	Cu, Cu 3.2E+0%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0% in ore, in ground	143.0
31	Cu, Cu 5.2E-2%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2% in ore, in ground	143.0

Impact factors: PMF ecoinvent 3.1 cutoff v1.0				
Impact factors				
Impact category: ERM abiotic				
Flow	Category	Flow property	Factor	Unit
Fe Aluminium	Resource/in ground	Mass	5.3	kg/kg
Fe Aluminium, 24% in bauxite, 11% in crud...	Resource/in ground	Mass	5.3	kg/kg
Fe Anhydrite	Resource/in ground	Mass	1.0	kg/kg
Fe Barite, 15% in crude ore	Resource/in ground	Mass	6.7	kg/kg
Fe Basalt	Resource/in ground	Mass	1.0	kg/kg
Fe Borax	Resource/in ground	Mass	1.0	kg/kg
Fe Cadmium, 0.30% in sulfide, Cd 0.18%, P...	Resource/in ground	Mass	735.0	kg/kg
Fe Calcium carbonate	Resource/in ground	Mass	1.0	kg/kg
Fe Carbon, in organic matter, in soil	Resource/in ground	Mass	1.0	kg/kg
Fe Cerium, 24% in bastnaesite, 2.4% in crude...	Resource/in ground	Mass	42.0	kg/kg
Fe Chromium, 25.5% in chromite, 11.6% in ...	Resource/in ground	Mass	2.7	kg/kg
Fe Chrysotile	Resource/in ground	Mass	1.0	kg/kg
Fe Cinnabar	Resource/in ground	Mass	1.0	kg/kg
Fe Clay, bentonite	Resource/in ground	Mass	1.0	kg/kg
Fe Clay, unspecified	Resource/in ground	Mass	1.0	kg/kg
Fe Coal, brown	Resource/in ground	Mass	1.0	kg/kg
Fe Coal, hard, unspecified	Resource/in ground	Mass	1.0	kg/kg
Fe Cobalt, in ground	Resource/in ground	Mass	115.0	kg/kg
Fe Colemanite	Resource/in ground	Mass	1.0	kg/kg
Fe Copper, 0.52% in sulfide, Cu 0.27% and ...	Resource/in ground	Mass	143.0	kg/kg
Fe Copper, 0.59% in sulfide, Cu 0.22% and ...	Resource/in ground	Mass	143.0	kg/kg
Fe Copper, 0.97% in sulfide, Cu 0.36% and ...	Resource/in ground	Mass	143.0	kg/kg
Fe Copper, 0.99% in sulfide, Cu 0.36% and ...	Resource/in ground	Mass	143.0	kg/kg
Fe Copper, 1.13% in sulfide, Cu 0.76% and ...	Resource/in ground	Mass	143.0	kg/kg
Fe Copper, 1.18% in sulfide, Cu 0.39% and ...	Resource/in ground	Mass	143.0	kg/kg
Fe Copper, 1.42% in sulfide, Cu 0.81% and ...	Resource/in ground	Mass	143.0	kg/kg
Fe Copper, 2.19% in sulfide, Cu 1.83% and ...	Resource/in ground	Mass	143.0	kg/kg
Fe Copper, Cu 0.2%, in mixed ore, in ground	Resource/in ground	Mass	143.0	kg/kg
Fe Copper, Cu 0.38%, Au 9.7E-4%, Ag 9.7E-4%, Zn 0.63%, Pb 0.014%, in ore, in ground	Resource/in ground	Mass	143.0	kg/kg
Fe Cu, Cu 3.2E+0%, Pt 2.5E-4%, Pd 7.3E-4%, Rh 2.0E-5%, Ni 2.3E+0% in ore, in ground	Resource/in ground	Mass	143.0	kg/kg
Fe Cu, Cu 5.2E-2%, Pt 4.8E-4%, Pd 2.0E-4%, Rh 2.4E-5%, Ni 3.7E-2% in ore, in ground	Resource/in ground	Mass	143.0	kg/kg

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 nach Bringezu *et al.* (2019) und OpenLCA Software⁸

Die Werte und zugrundeliegenden Annahmen und Quellen für die Charakterisierungsfaktoren sind in Mostert und Bringezu (2019) dokumentiert. Die konkreten Datenquellen zu den Faktoren zur Bestimmung des RMI sind wie folgt:

- ▶ RMG Raw Materials Group. Mining Database (S&P Global Market Intelligence); RMG Raw Materials Group: Stockholm, Sweden, 2014.
- ▶ Schoer, K.; Giegrich, J.; Kovanda, J.; Lauwigi, C.; Liebich, A.; Buyny, S.; Matthias, J. Conversion of European Productflows into Raw Material Equivalents. Final Report of the Project: Assistance in the Development and Maintenance of Raw Material Equivalents Conversion Factors and Calculation of RMC Time Series; IFEU: Heidelberg, Germany, 2012.
- ▶ Ecoinvent (version 3.1, cutoff LCI).

Die konkreten Faktoren zur Bestimmung des TMR sind der folgenden Quelle entnommen: Wirtschaftsuniversität (WU) Wien. Global Material Flows Database. Factors Unused Extraction; WU Vienna: Vienna, Austria, 2016.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass die Analyse der Ressourcenintensität (Material, Wasser, Fläche) auf Basis einer erweiterten Sachbilanz (wie sie in Ökobilanzdaten verankert ist) eine Berechnung aller Primärextraktionsmaterial- und Rohstoffströme in Verbindung mit einem konkreten Anwendungsfall ermöglicht. So können alle inputseitigen Ressourcenströme entlang des gesamten Lebenszyklus abgeschätzt werden.

Nachvollziehbarkeit der Software-Berechnungen in den Fallstudien

Um die Ressourcenintensitäten (siehe Kapitel 1, 2 und 3 in „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a) und andere Indikatoren der Fallstudien zu berechnen, wird der jeweilige Anwendungsfall durch Ecoinvent Datensätze in der OpenLCA Modellierungssoftware abgebildet. Hierbei sollen die einzelnen Bestandteile des Anwendungsfalls möglichst repräsentativ abgebildet werden, indem die gewählten Datensätze in Art, Einheit und Wert auf den

⁸<https://www.openlca.org> (Stand: 15. Dezember 2022)

spezifischen Fall zugeschnitten werden. Diese Informationen werden in den Kapitel B.4 und B.5 für jeden Anwendungsfall zur Verfügung gestellt.

Um die Fallstudien reproduzieren zu können müssen folgende Schritte unternommen werden:

1. Die Software OpenLCA herunterladen
2. Die Datenbank Ecoinvent in OpenLCA integrieren
3. Zusätzlich zu den bereits in die Datenbank integrierten notwendigen Berechnungsmethoden (ReCiPe, Cumulative Energy Demand, etc.) die für TMR und RMI notwendige Methode integrieren. Diese wird von Bringezu *et al.* (2019) bereitgestellt (siehe vorherigen Abschnitt „Spezifizierung der Betrachtung mittels RMI und TMR in der Softwarelösung“).
4. Die *Life Cycle Inventories* in OpenLCA übertragen. Die *Life Cycle Inventories* inklusive der Namen aller genutzten Datenbank Prozesse sind in den Kapiteln B.20.1 bis B.20.10 für alle Fallstudien zu finden. Diese *Inventories* enthalten alle wichtigen Informationen, die für das Erstellen der Herstellungs- und Nutzungsphasen-Prozesse in OpenLCA notwendig sind. Output der Prozesse sind immer die funktionalen Einheiten (z. B. 1 h Videokonferenz)
5. Anhand dieser Prozesse werden dann die Modellgraphen für die Herstellungs- und Nutzungsphase in OpenLCA erstellt.
6. Abschließend wird die jeweilige Berechnungsmethodik für die zu berechnenden Indikatoren ausgewählt. Die Software berechnet dann die Ergebnisse.

Unter Verwendung einer gültigen Lizenz für die Ecoinvent Datenbank (Version 3.8) und einer geeigneten Modellierungssoftware (mit integrierter Methode zur Berechnung des *Product Material Footprint (PMF)* nach Bringezu *et al.* (2019)) und den *Life Cycle Inventories* können die Modellierungen und Ergebnisse der Fallstudien reproduziert und nachvollzogen werden.

Die Offenlegung einzelner Werte der Datensätze - sowie der verbundenen Elementarflüsse und assoziierter LCIA-Ergebnisse⁹, aus denen sich die Modelle und deren Ergebnisse zusammensetzen - ist aus lizenzrechtlichen Gründen nicht möglich. In Kapitel B.5 „*Contribution Analysis* für die Fallstudien“ ist zum besseren Verständnis der Ergebnisse aufgeschlüsselt, welche Beiträge die einzelnen Bestandteile des Anwendungsfalls zum Gesamtergebnis der verschiedenen Indikatoren leisten. Dieses Vorgehen entspricht der gängigen wissenschaftlichen Praxis.

B.2.2.2 Beschreibung und Auswahl der genutzten Datenbanken und -quellen

Die Auswahl der Datenbanken und -quellen beeinflusst maßgeblich die Qualität und Aussagekraft der resultierenden Ergebnisse. Daher war auch für die Fallstudien die Auswahl geeigneter Datenquellen von großer Wichtigkeit. Besonders zu berücksichtigen war im spezifischen Fall, dass sich die genutzten Datenbanken im wissenschaftlichen Kontext etabliert haben, da die Ergebnisse neben der Darstellung einzelner Anwendungsfälle auch als Orientierungswert für die Abschätzung gesamtgesellschaftlicher Entwicklungen im Bereich der Digitalisierung verwendet werden sollten. Hierzu war sicherzustellen, dass die verwendeten Grundlagen der Ergebnisse eine ausreichend akzeptierte Methodik und Repräsentativität für die in der Realität vorkommenden verschiedenen Ausprägungen der Anwendungsfälle bieten.

⁹ LCIA-Ergebnisse bezeichnen die Ergebniswerte für die verschiedenen Indikatoren, welche in den Datensätzen (in Verbindung mit der Software) hinterlegt sind.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden nur ausreichend etablierte und verbreitete Datenbanken in Betracht gezogen. In Frage kamen die gemeinhin bekanntesten Ökobilanz-Datenbanken – die **Ecoinvent**-Datenbank¹⁰ von der Schweizer Firma Ecoinvent und die **GaBi**-Datenbank von Sphera¹¹ – sowie die **ProBas**-Datenbank des Umweltbundesamts und die **ÖKOBAUDAT**-Datenbank des Bundesministeriums für Wohnen, Stadtentwicklung und Bauwesen (Umweltbundesamt, 2015a)¹².

In einem ersten Schritt wurden die Datenbanken einer inhaltlichen Prüfung unterzogen. Es galt abzuschätzen, wie es in den jeweiligen Datenbanken um die Verfügbarkeit von für die Modellierung von Digitalisierungsprozessen relevanten Komponenten wie Batterien, Chips, Leiterplatten, und digitalen Endgeräten stand. Bezüglich der Datenverfügbarkeit kritischer Komponenten wurden lediglich die Ecoinvent- sowie die GaBi-Datenbank als geeignet eingeschätzt.

Von einer gemischten Verwendung beider Datenbanken wird aus Sicht des Projektkonsortiums abgesehen; auch andere wissenschaftliche Publikationen raten hiervon explizit ab (Kalverkamp & Karbe, 2019; Kalverkamp *et al.*, 2020; Pauer *et al.*, 2020). Aufgrund des unterschiedlichen Aufbaus der beiden Datenbanken Ecoinvent und GaBi kann bei der gemischten Nutzung von Datensätzen in einem Modell eine erhebliche Unschärfe bezüglich der Ergebnisse auftreten, welche die Aussagekraft besonders bei den Kategorien Wasser- und Landnutzung deutlich einschränkt.

Die Ecoinvent-Datenbank enthält mehr als 18.000 Lebenszyklusdatensätze. Sie wird von dem Ecoinvent non-profit Verein gepflegt und regelmäßigen Qualitätskontrollen unterzogen¹³. Dabei deckt sie eine Reihe von Sektoren ab. Unter anderem finden sich Daten zu Landwirtschaft und Viehzucht, Bauwesen, Chemikalien und Kunststoffe, Energie, Forstwirtschaft und Holz, Metalle, Textilien, Verkehr, touristische Unterkünfte, Abfallbehandlung und Recycling sowie Wasserversorgung und andere Industriezweige. Des Weiteren ist jeder Tätigkeit in der Ecoinvent-Datenbank ein geografischer Standort zugeordnet¹⁴. Ecoinvent wurde in einer Vielzahl von Forschungsprojekten verwendet und diente auch in diesem Forschungsvorhaben als Grundlage für die Modellierungen der Fallstudien.

Neben Ecoinvent gehört auch GaBi¹⁵ zu den größten verfügbaren Lebenszyklusinventaren. GaBi wird von dem Unternehmen Sphera gepflegt und aktualisiert. In der Datenbank finden sich Informationen von über 60 Branchenverbänden. Im Gegensatz zu Ecoinvent findet GaBi eher in der Industrie Anwendung¹⁶.

Die ÖKOBAUDAT-Datenbank ist auf Datensätze zu Baumaterialien, Bau-, Transport-, Energie- und Entsorgungsprozessen spezialisiert. Die Daten werden Qualitätskontrollen unterzogen und können in den unterschiedlichen Gebäudebewertungssystemen eingesetzt werden. Da in dem Forschungsvorhaben allerdings digitale Anwendungsfälle betrachtet wurden, bot die Datenbank nicht genügend Informationen zur Bewertung der Ressourcenintensität der Digitalisierung (BMWSB, 2023).

¹⁰ <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/> (Stand: 20. Februar 2023)

¹¹ <https://sphera.com> (Stand: 20. Februar 2023)

¹² <https://www.oekobaudat.de/> (Stand: 20. Februar 2023)

¹³ <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/> (Stand: 20. Februar 2023)

¹⁴ <https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/> (Stand: 20. Februar 2023)

¹⁵ Zum Zeitpunkt der Erstellung der vorliegenden Arbeiten wurde die Datenbank noch als „GaBi“ bezeichnet. Inzwischen wird die besagte Datenbank vom Anbieter als „Sphera Managed LCA content“ (MLC) bezeichnet.

¹⁶ <https://sphera.com> (Stand: 20. Februar 2023)

Nach der Analyse der ProBas-Datenbank, stellte sich heraus, dass sie nicht alle erforderlichen Informationen für eine ökobilanzielle Untersuchung der Ressourcenintensität der Digitalisierung im Rahmen dieses Forschungsvorhabens liefert.

Schlussendlich fiel die **Entscheidung auf die Nutzung der Ecoinvent-Datenbank**. Dies erfolgte nach umfassender Abwägung aufgrund mehrerer Aspekte:

- ▶ Mit der zum Zeitpunkt der Auswahl aktuellen Version der Ecoinvent-Datenbank (3.8) wurden eine Reihe von neuen und aktualisierten Datensätzen für Batterien¹⁷ und Verbraucherelektronik¹⁸ eingeführt, aufgrund welcher die Datenlage bezüglich digitalisierungsrelevanter Komponenten in der Ecoinvent-Datenbank als umfangreicher und aktueller als in der GaBi-Datenbank eingeschätzt wurde.
- ▶ Die Ecoinvent-Datenbank verfügt nach Einschätzung des Auftragnehmers über eine höhere Akzeptanz in der Wissenschaft. Dies liegt daran, dass die Transparenz der enthaltenen Datensätze als deutlich höher als in der GaBi-Datenbank einzuschätzen ist. In der Ecoinvent-Datenbank lässt sich jeder Datensatz, neben der beigefügten Dokumentation, innerhalb der Datenbank bis auf alle einzelnen enthaltenen Prozessschritte und Elementarflüsse herunterbrechen. Die GaBi-Datenbank hingegen ist nach dem sogenannten „Black Box“ Prinzip aufgebaut. Hierbei lassen sich die Datensätze nicht bis auf die einzelnen verwendeten Prozessschritte und Elementarflüsse zurückverfolgen. Es ist zwar auch bei Datensätzen aus der GaBi-Datenbank eine schriftliche Dokumentation über zentrale Eigenschaften und Annahmen des Datensatzes vorhanden, jedoch schwankt die Qualität dieser Dokumentationen zwischen den einzelnen Datensätzen erheblich und es besteht keine Möglichkeit nachzuprüfen, welche einzelnen Sub-Prozesse und Elementarflüsse in den Datensatz eingeflossen sind.
- ▶ Verfügbare Methoden zu den für die Anwendung in den Fallstudien als essenziell gesehenen Indikatoren Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand sind auf die Nomenklatur und Semantik von Ecoinvent ausgelegt. Eine Übertragung auf die GaBi-Struktur wäre mit erheblichem Zusatzaufwand verbunden.

Bezüglich der Qualitätssicherung bei der Verwendung von Datenquellen außerhalb der Ecoinvent-Datenbank wurden, wenn möglich, wissenschaftliche Studien/Papers oder vergleichbare Publikationen verwendet. Wenn die Datenverfügbarkeit es nicht anders zuließ, wurden sorgsam ausgewählte Zeitungs- und Blogartikel, sowie Websites als Quellen für einzelne Werte, bzw. als Basis für bestimmte Annahmen verwendet.

Neben der Verwendung von Sachbilanzdaten aus der Datenbank wurde für jede Fallstudie eine Literaturrecherche durchgeführt. Dabei wurden in Abhängigkeit der jeweiligen Fallstudie und dazu verfügbaren Informationen Sachbilanzdaten gesammelt, Rahmenbedingungen für die Fallstudie definiert oder Ergebnisse identifiziert, die zur Interpretation oder Diskussion der hier berechneten Ergebnisse zusätzlich dienen.

¹⁷ Drei Arten von Li-Ion-Batterien (NCA, NMC111, NMC811) und ihre Herstellung.

¹⁸ Auf der Grundlage der neuesten Literaturdaten wurden Datensätze für Smartphones und Tablets der Datenbank hinzugefügt und der bestehende Datensatz für Laptops wurde aktualisiert. Für die mobilen Geräte wurden Datensätze für eine neue Leiterplatte und eine Flüssigkristallanzeige erstellt. Die Komponenten in der entsprechenden Lieferkette wurden nach Bedarf angepasst.

B.2.3 Indikatoren und weitere systematische Angaben zu den Fallstudien

Als Grundlage für die konsistente Ausgestaltung der Fallstudien wurden im Folgenden relevante Indikatoren für die Analyse der Digitalisierung diskutiert. Dabei wird Bezug auf die Recherchen in Kapitel 4.2.3 „Indikatoren und Angaben zu den Fallstudien“ in „Vorgehensweise bei der Berechnung der Ressourcenintensität und weiterer Indikatoren“ des Abschlussberichts „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a) genommen und erörtert, inwieweit die Indikatoren, die im Rahmen der Recherche zu quantitativen Ergebnissen auf Mikroebene vielfach berichtet werden, auch für die Fallstudien verwendet werden sollten, sodass die Auswahl der Indikatoren mit dem Fokus dieses Vorhabens wie beabsichtigt auf dem Thema Ressourcenintensität liegt.

B.2.3.1 Indikatoren zur Betrachtung von Rohstoff- und Ressourcenaufwänden

Für die Betrachtung des Rohstoffaufwands finden sich in der Literatur verschiedene Input-orientierte Indikatoren, die im Folgendem beschrieben und diskutiert werden. Die für dieses Forschungsvorhaben angewendeten Indikatoren werden anschließend festgelegt.

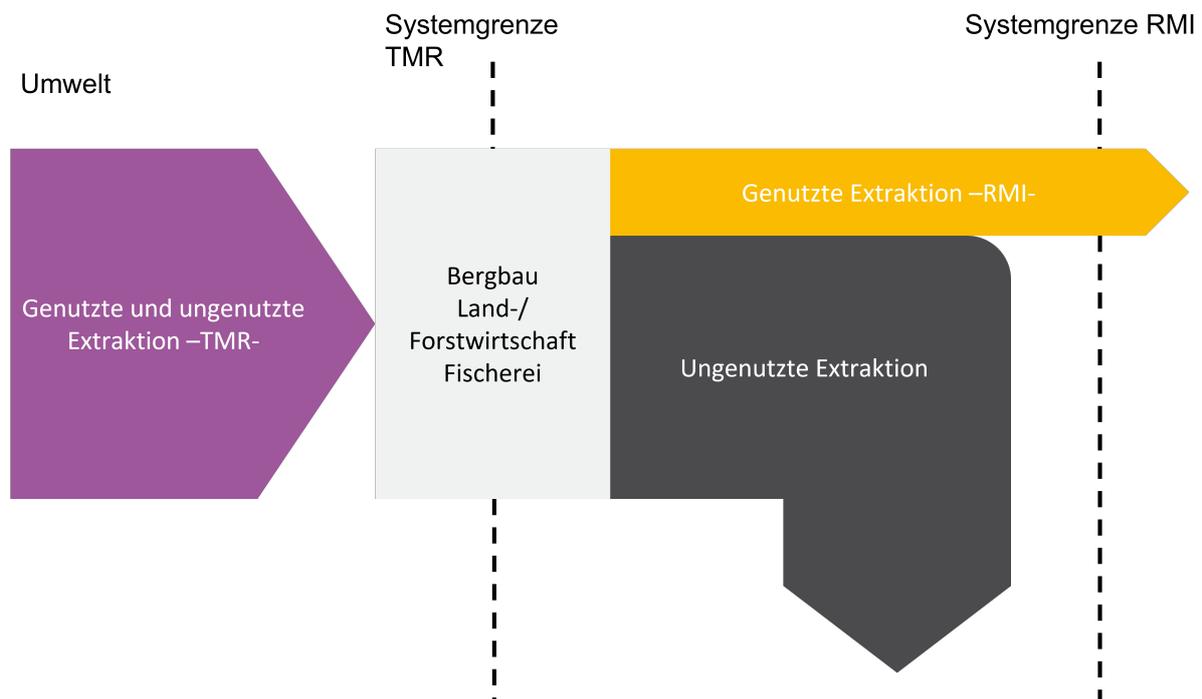
- ▶ **Primärrohstoffeinsatz (RMI) und Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR):** Sowohl der RMI als auch der TMR werden in Tonnen (t) angegeben und in der Analyse von Lebenszyklen und als makroökonomische Indikatoren angewendet. Dabei berücksichtigen die Bilanzen die tatsächliche Materialzusammensetzung eines physischen Gegenstands (z. B. Produkt) und alle Materialien, die entlang des Lebenszyklus benötigt werden. Außerdem deckt das Indikatoren-Paar alle relevanten Bilanzen und Ressourcen ab, die zur Berechnung des Materialfußabdrucks für die jeweiligen Anwendungsfälle (d. h. allokierte Produkte und Produktsysteme sowie Infrastrukturen) benötigt werden (OECD, 2008).

Die Verwendung beider Indikatoren verdeutlicht explizit den Unterschied zwischen Primär(extraktions)material und (Primär-)Rohstoffen.

- ▶ **Primär(extraktions)material:** dieses wird der Natur entnommen; nur ein Teil davon wird weitergenutzt (als Rohstoff verkauft), der ungenutzte Teil wird direkt zu Abfall; Erfassung aller auftretenden Produktflüsse eines Anwendungsfalls und Umrechnung in Rohstoffflüsse mittels der Materialgehalte (bei Sekundärrohstoffen werden lediglich die Aufwendungen für Sammel- und Recyclingprozesse berücksichtigt).
- ▶ **(Primär-)Rohstoffe:** dies sind die von der Rohstoffgewinnung und -aufbereitung vermarkteten Produkte (ökonomisch genutzter Anteil); Ermittlung durch Einbeziehung der ungenutzten Extraktion zusätzlich zum Primärrohstoffaufwand (Bringezu *et al.*, 2019).

Abbildung B-5 verdeutlicht grafisch den Unterschied zwischen den beiden Indikatoren RMI und TMR.

Abbildung B-5: Grundlegende Darstellung der Indikatoren RMI und TMR anhand der zugrundeliegenden Stoffströme und Systemgrenzen



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

- **Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA):** Ein weiterer Indikator zur Bemessung der Ressourcenintensität ist der kumulierte Rohstoffaufwand (KRA). Der Indikator gibt die Summe der Gewichte der in einem Produkt oder System verwendeten Rohstoffe (abzüglich Wasser und Luft) über den Lebenszyklus des Produkts oder Systems an und wird in Tonnen (Rohstoffe) pro Tonne (Produkt) angegeben. Dabei kann zwischen folgenden Teilindikatoren unterschieden werden: KRA von nicht erneuerbaren Energierohstoffen; KRA von mineralischen Rohstoffen zur Metallerzeugung; KRA von anderen mineralischen Rohstoffen (nicht zur Metallerzeugung) (Mostert & Bringezu, 2022; VDI, 2018).

Bezogen auf biotische Rohstoffe bestehen Unterschiede zum RMI, da von KRA nur aus der Natur entnommene Rohstoffe und beispielsweise keine landwirtschaftlichen Erzeugnisse einbezogen werden (Mostert & Bringezu, 2022).

- **Mineral Resource Scarcity/Metal Depletion/Förderung der Mineralien (ReCiPe- bzw. IMPACT 2002+-Methode in Ökobilanzen):** Die Verknappung mineralischer Ressourcen kann durch das überschüssige Erzpotezial (SOP) (engl. *Surplus Ore Potential*) ermittelt werden. Das überschüssige Erzpotezial beschreibt den durchschnittlichen Anstieg der Erzmenge pro kg abgebautem Mineral unter Berücksichtigung aller zukünftigen noch abzubauenen mineralischen Ressourcen. Im Gegensatz zum RMI und TMR werden unter dieser Berechnungsmethode nur mineralische Rohstoffe betrachtet (Huijbregts *et al.*, 2016; Vieira & Huijbregts, 2020).
- **Fossil Resource Scarcity/Fossil Depletion (ReCiPe-Methode in Ökobilanzen):** Die Gewinnung von Erdöl, Erdgas und Steinkohle wird als zusätzliches Kostenpotenzial (SCP) (engl. *Surplus Cost Potential*) ausgedrückt und in in US\$/kg or US\$/m³ angegeben. Das SCP basiert auf kumulativen Kosten-Tonnagen-Beziehungen für Erdöl, Erdgas und Steinkohle. Auch bei dieser Berechnungsmethode werden nur ausgewählte, in diesem Fall fossile Ressourcen, betrachtet (Huijbregts *et al.*, 2016).

- ▶ **Abiotischer Ressourcenverbrauch** (*Abiotic Depletion Potential*; CML- oder Eco-Indicator 99-Methode in Ökobilanzen): Der abiotische Ressourcenverbrauch [kg] umfasst sowohl die Nutzung nicht erneuerbarer (z. B. Metallerze) als auch erneuerbarer abiotischer Ressourcen (z. B. Wind, fließendes Wasser), also Ressourcen, an dessen Bildung keine Lebewesen beteiligt sind (Huppel *et al.*, 2002; Umweltbundesamt, 2014; van Oers & Guinée, 2016). Bei biotischen Ressourcen hingegen handelt es sich um „sämtliche tierische und pflanzliche Stoffe, die nicht in fossilen Rohstoff umgewandelt wurden“ (Umweltbundesamt, 2016). Die Erschöpfung abiotischer Ressourcen ist die Abnahme der Verfügbarkeit der gesamten Reserve potenzieller Funktionen der Ressourcen. Die Erschöpfung abiotischer Ressourcen ist eine sehr umstrittene Wirkungskategorie in der Lebenszyklusbewertung. Grund dafür ist, dass das Problem auf unterschiedliche Weise definiert werden kann. Ähnlich wie bei den zuvor genannten Berechnungsmethoden umfasst der abiotische Ressourcenverbrauch auch nur einen Teil der digitalisierungsrelevanten Ressourcen, und zwar die abiotischen Ressourcen (Huppel *et al.*, 2002; Umweltbundesamt, 2014; van Oers & Guinée, 2016).
- ▶ **Wasserfußabdruck** (*Water Use/Freshwater Consumption*) über den Lebenszyklus eines Produkts: Der Wasserfußabdruck misst die Frischwassernutzung bzw. den -konsum in m³. Er ist Teil gängiger LCA-Auswertungsmethoden, wie zum Beispiel der ReCiPe (H) 2016-Methode, um die begrenzte Ressource Frischwasser zu berücksichtigen (Huijbregts *et al.*, 2016).
- ▶ **Landnutzung bzw. Flächeninanspruchnahme**: Die Landnutzung wird in m²a angegeben, erhebt also neben der flächenmäßigen Nutzung von landwirtschaftlicher und urbaner Fläche auch die Nutzungsdauer. Die Landnutzung ist Teil gängiger LCA-Auswertungsmethoden, wie zum Beispiel der ReCiPe (H) 2016-Methode, um die begrenzte Ressource Land zu berücksichtigen (Huijbregts *et al.*, 2016).
- ▶ **Kumulierter Energieaufwand** (KEA; engl. *Cumulative Energy Demand* CED): Der KEA wird innerhalb der VDI Richtlinie 4600 (VDI, 2012) des Vereins Deutscher Ingenieure definiert und in Joule [J] angegeben. Er berechnet sich aus der Summe aller Primärenergieaufwände über die Lebensphasen Herstellung, Nutzung und Entsorgung eines Produktes oder einer Dienstleistung. Hierbei werden sowohl der kumulierte energetische Verbrauch als auch der kumulierte nicht energetische Aufwand berücksichtigt (VDI, 2012). Des Weiteren kann zwischen nicht regenerativen, mit einem fossilen und nuklearen Anteil, und regenerativen Primärenergien unterschieden werden. Der KEA ist weltweit innerhalb der Systemgrenze *Cradle-to-Gate* anwendbar (Günther, 2018). Der KEA ist direkt als KEA-Methode oder für den kumulierten nicht-erneuerbaren Energieaufwand z. B. durch IMPACT 2002+-Methode in LCA-Softwarelösungen implementiert.

B.2.3.2 Treibhauspotenzial

Der Fokus der Analyse der Fallstudien Lebenszyklusdaten auf Mikroebene liegt gemäß Projektauftrag (Leistungsbeschreibung) auf der tatsächlichen Verwendung von Ressourcen (Ressourcenintensität). Eine umfassende Bewertung des Schadenspotenzials an Ökosystemen oder natürlichen Ressourcen allgemein war nicht Gegenstand des Projektauftrags.

Es wird daher auf die aggregierten LCA-Indikatoren zu mineralischer und fossiler Rohstoffnutzung im Rahmen der Betrachtungen verzichtet. Weiterhin wird im Sinne des Projektziels auf die Darstellung gesundheitsbezogener Indikatoren verzichtet, da diese nicht im Fokus der Betrachtung stehen.

Betrachtet werden sollte hingegen das Treibhauspotenzial (*engl. Global Warming Potential* (GWP)). Das Treibhauspotenzial ist eine Maßzahl für den relativen Beitrag eines Untersuchungsgegenstands zum Treibhauseffekt, also die mittlere Erwärmungswirkung der Erdatmosphäre über einen Zeitraum von 100 Jahren. Dieser Indikator wurde dem verwendeten Indikatoren-Set bewusst hinzugefügt, da die durchgeführte Recherche ergab, dass bei der Betrachtung digitaler Anwendungen im aktuellen wissenschaftlichen Kontext ein Fokus auf diesem Indikator liegt. Somit erlaubt die Darstellung des Indikators THG für die untersuchten Fallstudien eine etwaige Gegenüberstellung der hier mit anderen Publikationen, falls vorhanden.

B.2.3.3 Weitere systematische Angaben in den Fallstudien

Neben den zuvor beschriebenen Indikatoren wurden weitere quantitative und qualitative Informationen systematisch untersucht, um die Umweltwirkungen und Einflüsse der digitalen Anwendungsfälle auf die Ressourcenintensität umfassend beschreiben zu können. Die folgenden Aspekte wurden vom Auftragnehmer in Abstimmung mit dem Auftraggeber und Experten*Expertinnen im Rahmen eines Projekttreffens diskutiert und für die Fallstudien empfohlen und festgelegt:

- ▶ Kritische Rohstoffe (quantitativ)
- ▶ Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung des jeweiligen Produkts oder der Technologie für den Bereich/Sektor Digitalisierung (qualitativ)
- ▶ Mögliche Umweltentlastungspotenziale (qualitativ)
- ▶ Ggf. sonstige Informationen in Abhängigkeit der jeweils untersuchten Fallstudie

B.2.3.3.1 Kritische Rohstoffe

Gemäß Leistungsbeschreibung sollte in den Fallstudien eine Diskussion und Beschreibung zur Verwendung sogenannter „kritischer Rohstoffe“ bzw. Edel- und Sondermetalle bzw. Technologiermetalle erfolgen.

Als kritische Rohstoffe wurden von der Europäischen Kommission im Jahr 2011 erstmals 14 Rohstoffe benannt, die für die Industrie über alle Stufen der Lieferkette hinweg wichtig sind, für die (Weiter-)Entwicklung von moderner Technologie (zur Digitalisierung) benötigt werden oder auch im Rahmen des Ausbaus von umweltfreundlichen Technologien wesentlich sind, beispielsweise für die Verwendung in Solarpanelen oder für Elektrofahrzeuge (Europäische Kommission, 2020). Ein aktueller Bericht der Europäischen Kommission zu kritischen Rohstoffen (Europäische Kommission, 2023) konnte im Vorhaben **nicht mehr berücksichtigt werden**, da dieser erst nach der schon begonnenen Ergebnisermittlung in diesem Vorhaben veröffentlicht wurde.

Grundlage für die Aufnahme in die Liste kritischer Rohstoffe ist eine Kombination aus wirtschaftlicher Relevanz und Versorgungsrisiko. Die Liste der kritischen Rohstoffe wird seither alle drei Jahre überprüft und angepasst. Seit 2020 gelten die in der folgenden Tabelle B-6 gelisteten Rohstoffe als kritisch, wobei mehr als die Hälfte essenziell für die Digitalisierung sind (Bobba *et al.*, 2020).

Tabelle B-6: Liste kritischer Rohstoffe für die EU gemäß der Europäischen Kommission

Alphabetische Liste der 30 kritischen Rohstoffe	
Antimon (antimony)	Metalle der Platingruppe (platinum group metals)
Baryt (baryte)	Naturkautschuk (natural rubber)
Bauxit (bauxite)	Natürlicher Grafit (natural graphite)
Beryllium (beryllium)	Niob (niobium)
Borat (borate)	Phosphor (phosphorus)
Flussspat (fluorspar)	Phosphorit (phosphate rock)
Gallium (gallium)	Schwere seltene Erden (heavy rare earth elements)
Germanium (germanium)	Scandium (scandium)
Hafnium (hafnium)	Siliciummetall (silicon metal)
Indium (indium)	Strontium (strontium)
Kobalt (cobalt)	Tantal (tantalum)
Kokskohle (coking coal)	Titan (titanium)
Leichte seltene Erden (light rare earth elements)	Vanadium (vanadium)
Lithium (lithium)	Wismut (bismut)
Magnesium (magnesium)	Wolfram (tungsten)

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach Europäische Kommission (2020)

Über diese kritischen Rohstoffe hinaus sind aber **auch eine Reihe von Edel- und Sondermetallen** besonders digitalisierungsrelevant, die jedoch (noch) nicht auf der EU-Liste stehen. Dazu zählen u. a. Neodym, Rhenium oder Edelmetalle wie Gold, Silber oder Palladium. Aufgrund des steigenden Bedarfs nach diesen Rohstoffen weltweit nimmt ihre Relevanz zu. Auch das Recycling solcher Edel- und Sondermetalle wird immer wichtiger (Umweltbundesamt, 2015b).

Für eine Reihe der genannten Rohstoffe bestehen zudem Bedenken hinsichtlich der Umwelt- und Gesundheitsauswirkungen ihrer Gewinnung und Weiterverarbeitung (Pagano & Krause, 2019).

Daher wurden in diesem Vorhaben im Rahmen der Fallstudien neben den kritischen Rohstoffen auch Edel- und Sondermetalle als besonders **„digitalisierungsrelevante Rohstoffe“** berücksichtigt und je nach Relevanz und Datenverfügbarkeit der Sachbilanzdaten quantitativ miterfasst und diskutiert. Dazu wurde eine Methodik zur quantitativen Ermittlung der „digitalisierungsrelevanten Rohstoffe“ bezeichneten Inputs für die Fallstudien ermittelt, die kritische Rohstoffe sowie Technologiemetalle bzw. für die Digitalisierung besonders relevante Rohstoffe kombiniert. Die spezifische Auswahl von Rohstoffen, das Vorgehen und die Umsetzung im Rahmen der gewählten Methodik ist in Kapitel B.2.4.3 im Detail erläutert.

B.2.3.3.2 Bedeutung des jeweiligen Anwendungsfalls für die Digitalisierung (gegenwärtig und zukünftig)

Im Rahmen der Fallstudien wird darauf eingegangen, warum der ausgewählte Anwendungsfall für die Digitalisierung beispielhaft und relevant ist. Die Betrachtung fokussiert dabei auf die aktuelle Bedeutung des Anwendungsfalls, die sich teils aus der jüngsten Entwicklung ergibt. Zum anderen sollte, soweit möglich, beleuchtet werden, welche zukünftigen Entwicklungen absehbar sind und welche Bedeutung die Anwendung daher in den kommenden Jahren gewinnen kann. Die Informationen dazu stammen aus der Literaturrecherche und gehen insbesondere auf die potenzielle zukünftige Relevanz des Anwendungsfalls ein.

B.2.3.3.3 Beschreibung möglicher Umweltentlastungspotenziale

Für jede Fallstudie sollte – sofern möglich - beschrieben werden, inwieweit die jeweilige digitale Anwendung zur Entlastung von negativen Umweltauswirkungen beitragen kann (Umweltentlastungspotenziale). Somit sollten negative Effekte möglichen positiven Wirkungen gegenübergestellt werden, auch wenn ein direkter Vergleich oftmals nicht gezogen werden kann. Positive und negative Umweltauswirkungen können sich zeitlich wie räumlich und in Bezug auf die betroffenen Umweltmedien oder Schutzgüter unterscheiden. Relevant ist daher besonders die Betrachtung von Einsparungspotenzialen durch das Vermeiden analoger Anwendungen und Prozesse, welche durch den digitalen Anwendungsfall ersetzt werden können. Die Umweltentlastungspotenziale umfassen dabei sowohl direkte Entlastungen als auch indirekte oder systemische Effekte. Bei letzterem spielen beispielsweise Rebound-Effekte (Kompensations- bzw. Überkompensationseffekte) eine Rolle.

Die konkrete Ausgestaltung und Höhe des Potenzials von Umweltentlastungen ist stark vom einzelnen Anwendungsfall der Fallstudie abhängig. Entscheidend war hier oftmals die Frage, ob überhaupt eine analoge Anwendung durch den digitalen Anwendungsfall ersetzt wird oder in diesem hauptsächlich eine zusätzliche Anwendung zu sehen ist. Um bei Bedarf Umweltentlastungspotenziale über die Größenordnung des einzelnen Anwendungsfalls hinaus (beispielsweise auf volkswirtschaftlicher Ebene) abzuschätzen, wurden in einzelnen Fallstudien durch Desktop-Recherche entsprechende Referenzpunkte identifiziert.

B.2.3.3.4 Sonstige Informationen in Abhängigkeit der Fallstudien

Sofern bei der Recherche zu den einzelnen Fallstudien sonstige relevante Informationen gewonnen wurden, die nicht durch die bisher diskutierten Indikatoren abgedeckt waren, die aber für die Betrachtung der Fallstudie und ihrer jeweiligen Auswirkungen auf die Ressourcenintensität wichtig erschienen, wurden diese zusätzlich in die Betrachtung mit aufgenommen. Dies umfasste beispielsweise die qualitative Beschreibung möglicher Rebound-Effekte oder den nur indirekt mit der digitalen Anwendung verbundenen und daher nicht quantifizierten Ressourcenbedarf in Fallstudien wie der zum Onlinehandel oder zu *Peer-to-Peer* Plattformen¹⁹.

¹⁹ Die im Onlinehandel gekauften Produkte oder die über die *Peer-to-Peer* Plattformen ausgetauschten Produkte oder Dienstleistungen werden nicht Teil der Betrachtung in den Fallstudien sein und somit die damit verbundenen Ressourcen nicht quantifiziert werden. Entsprechende Hinweise darauf und mögliche zusätzliche oder verringerte Ressourcenbedarfe (Implikationen aufgrund der digitalen Anwendung) werden aber an geeigneter Stelle in den Fallstudien aufgegriffen.

B.2.3.3.5 Festlegung der Indikatoren sowie weitere systematische Angaben zu den Fallstudien

Für die Analysen in den Fallstudien sollten laut Aufgabenstellung die Berechnungen zu den Input-orientierten Indikatoren zur Rohstoff- bzw. Ressourcenintensitäten im Zentrum der Betrachtung stehen. Diese Fokussierung lässt sich u. a. dahingehend begründen, dass anhand der vier Ressourcenfußabdrücke „Material, fossile Energie, Wasser und Land“ über **80 % der Varianz aller spezifischen** Umweltwirkungen auf der Entnahmeseite abgebildet werden können, wie sie z. B. in einschlägigen Umweltwirkungsabschätzungsmethoden für Ökobilanzen zu finden sind (Steinmann *et al.*, 2016).

Für die Fallstudien wurden daher die im Folgenden dargestellten Hauptindikatoren zur Abbildung der Ressourcenintensität (**Basis-Set an Indikatoren**) im Rahmen dieses Vorhabens festgelegt. Diese können für die ökobilanzielle Untersuchung im Rahmen angewandt werden.

Die zuvor vorgestellten und diskutierten quantitativen sowie qualitativen Indikatoren sollten der Betrachtung der Ressourcenintensität und ausgewählter Umweltwirkungen auf Mikroebene dienen. Wie beschrieben, sollten hierbei nicht nur die aggregierten Rohstoffaufwände quantifiziert werden, sondern es stand die Betrachtung von konkreten Rohstoffen und Materialien im Fokus. Dies diente zum einen dem besseren Verständnis der wesentlichen Treiber des Ressourcenbedarfs und war andererseits essenziell für die Verknüpfung der Arbeitsergebnisse mit denen der Makroebene (Kapitel 5 im Abschlussbericht „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023)) sowie der Ableitung von gezielten Handlungsoptionen und Empfehlungen (Kapitel 7 im Abschlussbericht „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023)).

Das in Abstimmung mit dem UBA ausgewählte **Indikatoren-Set** ist in der Abbildung B-6 dargestellt.

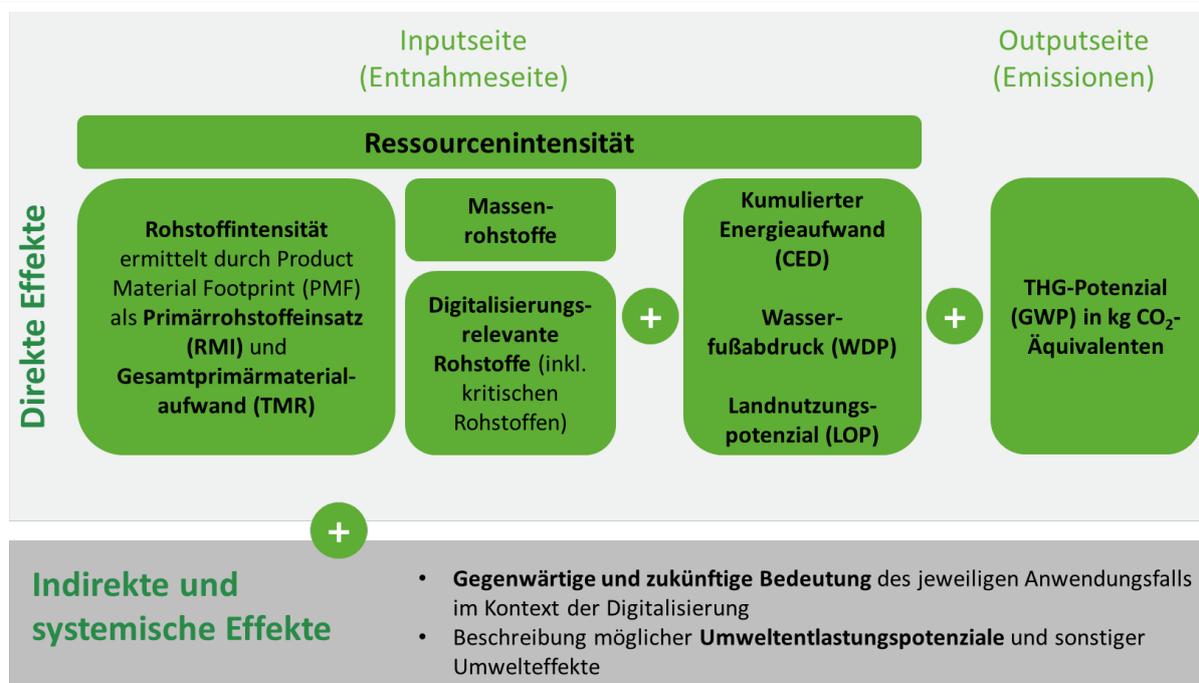
Es handelt sich bei den für dieses Vorhaben festgelegten Indikatoren für die Fallstudien vornehmlich um solche, die sich auf direkte Umwelteffekte beziehen, was wiederum auch im Einklang mit der methodischen Herangehensweise (= ökobilanzielle Untersuchung) und der entsprechenden Datenverfügbarkeit steht. Vorrangig wurde für die Fallstudien berichtet, analysiert und diskutiert:

- ▶ **Einsatz von Primärrohstoffen²⁰ (RMI – engl. *raw material input*), abiotisch:** gesamte Menge (in kg-Äquivalenten) (ökonomisch) genutzter Primärrohstoffextraktion zur Bereitstellung von Produkten, Dienstleistungen und Infrastrukturen sowie deren Nutzung und Entsorgung (analog zu KRA gem. VDI-Richtlinie 4800 Blatt 2, der sich bzgl. des abiotischen Anteils nicht vom RMI unterscheidet).
- ▶ **Gesamtprimärmaterialaufwand⁴ (TMR – engl. *total material requirement*), abiotisch:** gesamte Menge (in kg-Äquivalenten) an abiotischem Primärmaterial, das für die Bereitstellung von Produkten, Dienstleistungen und Infrastrukturen sowie deren Nutzung und Entsorgung innerhalb der Umwelt bewegt oder der Umwelt entnommen wird.
- ▶ **Ausgewählte (besonders) digitalisierungsrelevante Rohstoffe (inklusive kritischer Rohstoffe):** Hierbei wird eine eigens für dieses Vorhaben entwickelte Methodik verwendet, welche in Kapitel B.2.4.3 dieser Anlage genauer erläutert wird.

²⁰ 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.

- ▶ **Kumulierter Energiebedarf (CED – engl. *cumulative energy demand***, nicht erneuerbar) in MJ: Bemessung des energetischen Aufwands über den Lebenszyklus eines Produkts und unterschieden in absoluten, fossilen, nuklearen, erneuerbaren und sonstigen Energieaufwand, der durch (teils begrenzte) Ressourcen bereitgestellt wird. Der Indikator ist direkt als Methodik in verschiedenen Ökobilanzsoftwarelösungen verfügbar.
- ▶ **THG-Potenzial (GWP – engl. *global warming potential***, bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren) in kg CO₂-Äquivalenten: gem. ReCiPe (H) 2016-Methode. Das Treibhausgaspotenzial dient der Bemessung der emittierten THG-Emissionen über den Lebenszyklus eines Produkts oder digitalen Systems. Angesichts des Klimawandels handelt es sich bei dem verbleibenden CO₂-Budget ebenfalls um eine begrenzte Ressource. Das THG-Potenzial ist zudem eng verbunden mit dem Fußabdruck für fossile Energie und ist daher ein geeigneter und komplementärer Indikator. Somit können bereits auf dieser Basis relativ richtungssichere Erkenntnisse gewonnen werden.
- ▶ **Wasserfußabdruck (WDP – engl. *water depletion potential***, Frischwassernutzung bzw. -konsum) in m³: z. B. gem. ReCiPe (H) 2016-Methode, um die begrenzte Ressource Frischwasser in den Fallstudien zu berücksichtigen.
- ▶ **Landnutzungspotenzial (LOP – engl. *land occupation potential***) in m²a; z. B. gem. ReCiPe (H) 2016-Methode, um die begrenzte Ressource Land in den Fallstudien zu berücksichtigen.
- ▶ Einschätzung zur **gegenwärtigen und zukünftigen Bedeutung** des jeweiligen Anwendungsfalls für die Digitalisierung.
- ▶ Beschreibung von **Umweltentlastungspotenzialen** auf Basis von Literaturinformationen und im Kontext zu den Fallstudienenergebnissen.

Abbildung B-6: Indikatorenset für die Analyse auf Mikroebene im Rahmen der Fallstudien*



*Anmerkung: Indikatoren werden im Folgenden auch in abgekürzter Form (deutsch sowie englisch) verwendet: Primärrohstoffeinsatz RMI, Gesamtprimärmaterialaufwand TMR, Kumulierter Energieaufwand KEA bzw. CED, Wasserfußabdruck WDP, Landfußabdruck LOP, THG-Potenzial GWP.

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

B.2.4 Methodische Details zur Berechnung der Indikatoren in den Fallstudien

Die folgenden Abschnitte erläutern im Detail das methodische Vorgehen bei der konkreten Berechnung der Ressourcenintensität der Fallstudien und gehen auf zentrale Annahmen ein, die für alle Fallstudien getroffen wurden.

B.2.4.1 Gemeinsame Datenbasis für die Fallstudien und notwendige Annahmen

Bei Betrachtung der Fallstudien ließen sich mehrere Endgeräte identifizieren, auf welche in einer Vielzahl der Anwendungsfälle zurückgegriffen wurde. Auch die Übertragungsinfrastruktur war den meisten Fallstudien gemein. Bei solchen Überschneidungen sollten in den Fallstudien jeweils die gleichen Annahmen und Daten zugrunde gelegt werden. Die folgende Tabelle B-7 gibt eine Übersicht über die Fallstudien und darin wiederkehrende Komponenten und Geräte. In den einzelnen Fallstudien wurden Nutzungsprofile zugrunde gelegt, die in den jeweiligen Fallstudien beschrieben sind.

Tabelle B-7: Ausgewählte mehrfach genutzte Endgeräte und Komponenten in den Fallstudien

Ausgewählte Endgeräte, die mehrfach genutzt werden	Fallstudien mit diesen Endgeräten
Smartphone	Videokonferenz, Smart-Home-System, digitale Medien, Carsharing, C2C-Plattform, E-Sports, E-Health
Tablet	Digitale Medien, C2C-Plattform, E-Sports
Laptop	Videokonferenz, digitale Medien, C2C-Plattform, E-Sports
Externer Monitor	Videokonferenz, C2C-Plattform, E-Sports
Desktop-Computer	C2C-Plattform, E-Sports
Router	Videokonferenz, Smart-Home-System, digitale Medien, C2C-Plattform, E-Sports
Übertragungsinfrastruktur, Rechenzentren	Videokonferenz, digitale Medien, <i>E-Grocery</i> , Carsharing, Kryptowährung, C2C-Plattform, E-Sports, E-Health

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

Des Weiteren mussten verschiedene Annahmen oder Vereinfachungen getroffen werden, die im Folgenden für alle Fallstudien erläutert werden.

B.2.4.1.1 Ressourcenintensität von Rechenzentren und Übertragungsnetzen

Die Ressourcenintensität der Rechenzentren konnte nur in Bezug auf die verwendete Energie in die Betrachtung der Fallstudien einbezogen werden, da robuste und aktuelle Daten der materiell verwendeten Ressourcen nur bedingt verfügbar sind. Daten zur Herstellungsphase von Rechenzentren wurden im Rahmen der UBA-Studie zum Green Cloud Computing (Gröger *et al.*, 2021) ermittelt. Aufgrund der hier verwendeten Methodik und dem Bezug auf Ecoinvent-Datensätze war jedoch eine Übertragung der dort generierten Informationen nicht direkt möglich.

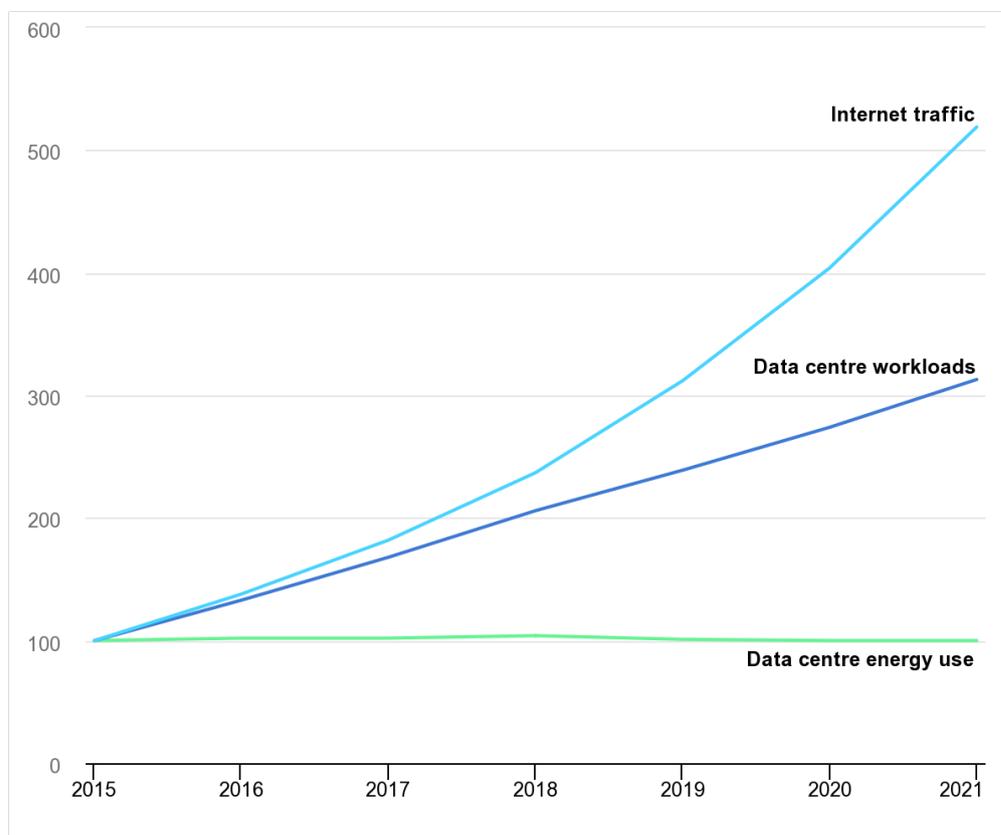
Um den möglichen Einfluss der Herstellungsphase der Rechenzentren auf das Gesamtergebnis der Fallstudien zu ermitteln, wurde jedoch eine Abschätzung der Ergebnissensitivität in den relevanten Fallstudien am Beispiel des Indikators *Abiotic Depletion Potential (ADP)* sowie *Global*

Warming Potential (GWP) vorgenommen. Die Ergebnisse dieser Abschätzungen zeigten, dass der Einfluss der Herstellungsphase der Rechenzentren vergleichsweise gering war gegenüber der Herstellungsphase der Endgeräte, die beim Endverbraucher Anwendung finden sowie gegenüber den Ressourcenbedarfen während der Nutzungsphase.

Auch die in den Fallstudien verwendeten Daten zum Stromverbrauch der Rechenzentren und Übertragungsnetze können nur als Annäherung an die gegenwärtige Situation verstanden werden. Grund hierfür ist, dass neben erheblichen Unterschieden in den aus verschiedenen Datenquellen identifizierten Informationen, auch die einzelnen Werte in sich deutliche Unsicherheiten bezüglich der Berechnungsmethode und Aktualität der Eingangsdaten ausweisen. Die Aktualität der Daten ist hier im Gegensatz zu anderen Betrachtungsgegenständen, wie zum Beispiel den digitalen Endgeräten, besonders hervorzuheben, da sich das Verhältnis von Strombedarf, Auslastung der Rechenzentren und Internetverkehr über die letzten Jahre stark verändert hat (vgl. Abbildung B-7).

Die Auswirkung dieser zeitlichen Veränderung auf das Verhältnis zwischen dem Ressourcenverbrauch der Herstellung von Komponenten der Rechenzentren und der Nutzung während des Lebenszyklus zeigt sich deutlich, wenn man die Ergebnisse von Whitehead *et al.* (2015) mit denen der Green Cloud Computing Studie des Umweltbundesamts vergleicht. In zuerst genannter Studie, welche ein Rechenzentrum in Großbritannien im Jahr 2015 untersucht, führt die Herstellung der Rechenzentrum-Komponenten zu 8 % des Ressourcenverbrauchs, wohingegen die Nutzungsphase für 92 % des Ressourcenverbrauchs verantwortlich ist. Die Green Cloud Computing Studie hingegen findet einen Anteil der Herstellung von 15 %.

Abbildung B-7: Globale Trends beim Internetverkehr, bei der Auslastung von Rechenzentren und beim Energieverbrauch von Rechenzentren; 2015 = 100 (%)



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach Kamiya (2020)

Das Projektteam erwartet, dass sich aufgrund der Revision EU-Energieeffizienz-Richtlinie (EED) im Juni 2022 diese Daten zukünftig verbessern werden, da diese ab 2024 eine jährliche Berichterstattung von Rechenzentren über ihren Energieverbrauch einführt.

Aus diesen Gründen wurde somit bei den Rechenzentren lediglich die verwendete Energie während der Nutzungsphase berücksichtigt.

B.2.4.1.2 Allokation von multifunktionalen Geräten

Mit Blick auf die ausgewählten Fallstudien bzw. Anwendungsfälle wird deutlich, dass sich die dafür jeweils notwendige Hardware auf eine relativ überschaubare Anzahl an Produkten und Produktsystemen begrenzt. Insbesondere zeigt sich, dass multifunktionale Endgeräte (z. B. Smartphones) für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungsfälle relevant sind. Dies trifft vor allem auf die folgenden Produkte bzw. Produktsysteme zu:

- ▶ Internetzugang und -nutzung (d. h. mobiler oder stationärer Internetzugangspunkt sowie Datenübertragung und -verarbeitung)
- ▶ Mobile Endgeräte und ihre Datenverarbeitung (v. a. Smartphone und Laptop)

Die Allokation von mehrfachgenutzter Hardware ist eine kritische Herausforderung bei der Erhebung von Ressourcenintensitäten und Umweltwirkungen eines Anwendungsfalls. Im Rahmen der untersuchten Fallstudien musste in mehreren Fällen eine Zurechnung eines Teils des gesamten Ressourcen- und Energiebedarfs eines digitalen Endgerätes auf einen betrachteten Anwendungsfall erfolgen. Der Grund dafür besteht darin, dass Endgeräte, wie beispielsweise Smartphones für eine Vielzahl unterschiedlicher Anwendungen genutzt werden.

In den Fallstudien dieses Vorhabens war für eine konsistente Bewertungsgrundlage digitaler Anwendungsfälle eine nutzungszeitbasierte Allokation der elektronischen Endgeräte vorgesehen, welche für jede individuelle Fallstudie geprüft und nach Anforderung angepasst oder ergänzt wurde. Im Zusammenspiel mit anzunehmenden Stromintensitäten (z. B. kWh pro GB) der eingesetzten Netzkomponenten (z. B. Zugangsnetzwerk, Rechenzentrum) konnte so eine vergleichbare Basis für die Beurteilung von unterschiedlichen Anwendungsfällen geschaffen werden.

B.2.4.1.3 Fokus auf Herstellungs- und Nutzungsphase

Die meisten Fallstudien rücken die Betrachtung von Herstellungs- und Nutzungsphase in den Vordergrund. Das Ende des Lebenszyklus von Endgeräten (z. B. ordnungsgemäße Entsorgung, Wiederverwendung, Recycling 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).

Eine durchgängige Berücksichtigung der *End-of-Life*-Phase wäre aus wissenschaftlicher und ökologischer Sicht zwar wünschenswert gewesen. Gründe für die gewählte Vorgehensweise waren aber die große Unsicherheit, die generell mit dem Ende des Lebenszyklus von digitalen Endgeräten verbunden ist, sowie die mangelhafte Datenlage. Die Literaturrecherche ergab keine ausreichenden belastbaren Daten, die eine Annahme zum Verbleib der Elektrogeräte an deren Lebensende begründen könnten. Auch fehlten belastbare Vergleichswerte aus der Literatur um etwaige Ergebnisse ins Verhältnis setzen und verifizieren zu können.

Aus den Erkenntnissen zu Lebenszyklusphasen und Wertschöpfungsstufen auf Mikroebene lässt sich zudem ableiten, dass Herstellungs- und Nutzungsphase im Vergleich zur *End-of-Life*-Phase

deutlich mehr Gewicht haben. Der Fokus auf die Herstellungs- und Nutzungsphase hat auch positive Auswirkungen auf die bereits besprochene Allokation. Dies liegt daran, dass die Berücksichtigung verschiedener möglicher Lebensendwege erhebliche Unsicherheiten bei der Zuweisung der Ressourcenbedarfe für den Anwendungsfall verursachen könnte. Zum Beispiel werden derzeit weniger als die Hälfte der in Deutschland verkauften Geräte wieder als Elektroschrott eingesammelt. Angaben zum Verbleib der restlichen Geräte sind nur schwer zu machen, jedoch wird davon ausgegangen, dass sich ein erheblicher Teil in den Haushalten als Bestand „im Winterschlaf“ befindet (Huisman *et al.*, 2017).

Auch eine Wiederverwendung von Geräten durch unterschiedliche Nutzer (*Reuse*) war aufgrund der unzureichenden Datenlage nicht Gegenstand der Betrachtung in den Fallstudien. Der Ressourcenbedarf in der Herstellung der Geräte wurde auf die jeweils angegebene Nutzungsdauer und entsprechende Nutzung pro funktionelle Einheit in den jeweiligen Fallstudien allokiert. Es konnte angenommen werden, dass eine Wiederverwendung die Ressourcenintensität der Herstellungsphase reduziert, da sie sich auf die zusätzliche Nutzungszeit und -art erstreckt, wodurch die Ressourcenintensität der erstmaligen Nutzung auch auf die Wiederverwendungsphase verteilt wird.

B.2.4.2 Berechnung der Ressourcenintensität in den Fallstudien

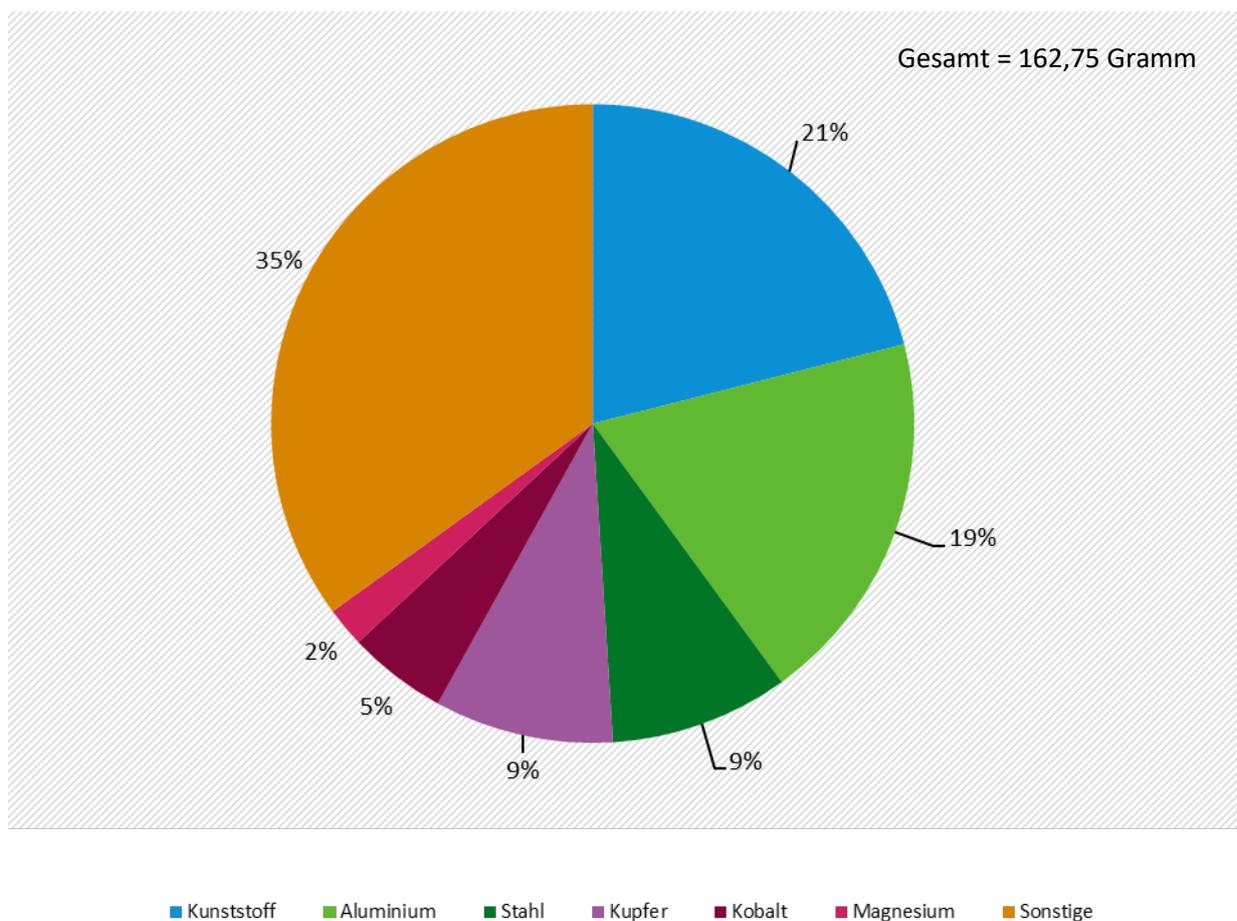
B.2.4.2.1 Rohstoffintensität und ausgewählte Rohstoffe

Um die Rohstoffintensität der untersuchten Anwendungsfälle in den Fallstudien des Vorhabens zu beschreiben, wurde zunächst der Indikator Gesamtrohstoffintensität quantitativ erhoben und beschrieben. Hierbei wurde die kumulierte Ressourcenintensität genannt und erläutert. Zudem wurde auch zwischen den verschiedenen betrachteten Lebenszyklusphasen (wie etwa zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase) unterschieden und deren Ressourcenintensitäten einzeln dargestellt.

Wie bereits beschrieben, wurde die Gesamtrohstoffintensität des Anwendungsfalls über die *Product Material Footprint (PMF)* Methode (Mostert & Bringezu, 2019) berechnet. Diese erlaubt, die in Kapitel B.2 genauer erläuterten Indikatoren RMI und TMR für ein klar abgegrenztes Produktsystem eines Anwendungsfalls in der OpenLCA-Software zu berechnen. Hierzu wurden für beide Indikatoren basierend auf dem MIPS-Konzept von Schmidt-Bleek Charakterisierungsfaktoren erstellt. Diese werden den 143 Input-Elementarflüssen (*Resource, in ground*) der Ecoinvent-Datenbank zugewiesen. Um die Indikatoren in diesem Vorhaben nutzen zu können, wurde auf ein Update der von Mostert und Bringezu (2019) bereitgestellten Methode zurückgegriffen, welches die Zuordnung der Charakterisierungsfaktoren auf die hier genutzte Version 3.8 der Ecoinvent-Datenbank überträgt und auf die aktualisierte Liste der Elementarflüsse erweitert (Pauliuk, 2022). Diese Version erlaubte es zudem, durch weitere Charakterisierungen der Elementarflüsse die Aufteilung der berechneten Indikatoren in deren Bestandteile aus Biomasse, fossilen Energieträgern, Metallerzen und nichtmetallischen Mineralien einzusehen.

Wie in Kapitel B.4 beschrieben, sind verschiedenste Rohstoffe und Metalle aufgrund ihrer Verwendung bei der Herstellung digitaler Infrastruktur und Endgeräte wesentlich für die Digitalisierung. Wie Rizos *et al.* (2019) am Beispiel eines Smartphones verdeutlichen (vgl. folg. Abbildung B-8) werden die einzelne Rohstoffe in teils deutlich unterschiedlichen Mengen in digitalen Geräten eingesetzt.

Abbildung B-8: Geschätzte Materialzusammensetzung eines Mobiltelefons in Prozent



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

Das Wissen um die eingesetzte Menge eines Rohstoffs allein reicht jedoch nicht für die Einordnung der Rohstoffintensität eines Endgeräts oder einer Fallstudie aus. Dieses Wissen muss weiterhin mit einer Einschätzung zur Kritikalität einzelner verwendeter Rohstoffe erweitert werden. Die Kritikalität setzt sich hauptsächlich aus Informationen über Verfügbarkeit, Produktion, sowie globaler Reserve zusammen (siehe Ausführungen in Kapitel B.4). Ist ein Rohstoff als kritisch anzusehen, kann auch die Verwendung einer im Verhältnis zu anderen Inputs deutlich geringen Menge sehr relevant für die Einschätzung der Rohstoffintensität des Anwendungsfalls sein.

Zur gezielten Auswertung der Anwendungsfälle in den Fallstudien musste daher zunächst ein schematisches Vorgehen zur Auswertung und Analyse der enthaltenen Rohstoffe bzw. Rohstoffgruppen erarbeitet werden, welches neben den eingesetzten Mengen auch die Kritikalität der eingesetzten Rohstoffe berücksichtigt.

Hierzu wurden zunächst Informationen aus mehreren Publikationen kombiniert, um den Aspekt der Nutzung und Kritikalität von Rohstoffen in digitalen Endgeräten in den Auswahlprozess einfließen zu lassen. Tabelle B-8 listet die entsprechenden Publikationen und die darin für die Digitalisierung als relevant erachteten Rohstoffe auf.

Tabelle B-8: Benennung von digitalisierungsrelevanten Rohstoffen laut ausgewählter Literatur*

Quelle	Informationen zu digitalisierungsrelevanten Rohstoffen
WBGU, 2019	„Folglich wird derzeit davon ausgegangen, dass im Jahr 2050 dreimal so viel Kupfer wie 2010 benötigt wird und 2035 das Vierfache an Lithium im Vergleich zu 2013“ (WBGU, 2019); Zudem Nennung von Edelmetallen, Seltenen Erden, Gold, Kobalt, Zinn
BMUV, 2020	„Bereits heute werden beispielsweise mehr als 40 % der Weltjahresproduktion von Antimon, Beryllium, Gallium, Indium und Tantal für die Produktion von digitalen Geräten verwendet“ (BMUV, 2020)
Bobba <i>et al.</i> , 2020 (European Commission)	Bor, Kobalt, Gallium, Germanium, Silizium, Lithium , Mangan, Kupfer, Gold, Silber, Platingruppen Metalle , Chrom, Grafit, Indium, Magnesium, Nickel, Seltene Erden, Wolfram
European Commission, 2020a ²¹	30 Kritische Rohstoffe in der EU (Antimon, Baryt, Beryllium, Wismut, Borat, Kobalt, Kokskohle, Flussspat, Gallium, Germanium, Hafnium, schwere seltene Erden, leichte seltene Erden, Indium, Magnesium, natürlicher Grafit, Naturkautschuk, Niob, Metalle der Platingruppe, Phosphorit, Phosphor, Scandium, Siliziummetall, Tantal, Wolfram, Vanadium, Bauxit, Lithium, Titan, Strontium ; wovon laut Bobba <i>et al.</i> (2020) über die Hälfte für die Digitalisierung wesentlich sind)

*Anmerkung: Fett gedruckte Rohstoffe oder Rohstoffgruppen gelten laut EC 2020 als kritisch.

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

Die in den aufgeführten Quellen als relevant für die Digitalisierung genannten Rohstoffe wurden daraufhin mit einer Liste der in Ecoinvent verfügbaren Elementarflüsse abgeglichen, um zu ergründen, für welche dieser Rohstoffe, im Rahmen der in den Fallstudien verwendeten Methodik relevante Informationen aus der Sachbilanz der Anwendungsfälle extrahiert werden können.

Tabelle B-9 listet auf, welche Rohstoffe in Ecoinvent enthalten sind und somit im Rahmen der verwendeten Methodik analysiert werden konnten und für welche eine Aufschlüsselung mangels Detailtiefe in der Datenbank nicht möglich war.

²¹ Die Berechnungen und Analysen der Fallstudien wurden im Februar 2023 abgeschlossen. Aus diesem Grund konnte die Methodik zur Festlegung kritischer Rohstoffe, die im März 2023 durch das europäische Gesetz zu kritischen Rohstoffen verankert wurde, nicht berücksichtigt werden.

Tabelle B-9: Aufteilung von Rohstoffen und Rohstoffgruppen mit Relevanz für die Digitalisierung in auswertbare und nicht auswertbare Rohstoffe nach der gewählten Methodik*

Rohstoffgruppe	Rohstoffe (-gruppe), für die eine Auswertung möglich war	Rohstoffe (-gruppe), die für die Fallstudien nicht ausgewertet werden konnten
Metalle, Edelmetalle, Halbmetalle, andere Rohstoffe	Antimon Chrom Gallium Gold Kobalt Kupfer Lithium Magnesium Mangan Nickel Silber Silizium Tantal Zinn	Beryllium Bor Germanium Grafit Indium Wolfram
Seltene Erden	Cerium Dysprosium Europium Gadolinium Lanthanum Neodymium Praseodymium Samarium Scandium Terbium Yttrium	Erbium Holmium Lutetium Promethium Ruthenium Thulium Ytterbium
Platingruppen Metalle	Platin Rhodium	Iridium Osmium Palladium

*Anmerkung: Fett gedruckte Rohstoffe sind nach der EU definierte kritische Rohstoffe (Europäische Kommission, 2020).
 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

Darauf aufbauend wurde folgende Vorgehensweise zur Angabe der Rohstoffintensität in den Fallstudien angewendet:

Schritt 1: Im ersten Schritt der Analyse wurden die mengenmäßig wichtigsten Rohstoffe einer Fallstudie (ausgegebenen Elementarfluss-Inputs) ausgewählt und analysiert; unabhängig von ihrer Relevanz für die Digitalisierung. Durch diese Auswertung wurden Informationen zu Rohstoffintensitäten erwartet, die ähnlich der Aufschlüsselung in Abbildung B-8 (siehe zuvor) Massenrohstoffe abbilden. Im Gegensatz zur vorherigen Abbildung wurden in dieser Darstellung keine verarbeiteten Materialien wie Kunststoff, Glas oder Stahl berücksichtigt. Stattdessen erfolgte die Auswertung anhand von Primärrohstoffen wie Öl, Sand und Eisen.

Schritt 2: Aufgrund ihres umfangreichen Einsatzes in der Digitalisierung und ihrer hohen Bedeutung in gesellschaftlichen Diskussionen wurden zwei Rohstoffe, nämlich Kupfer und Lithium, als besonders relevant für die Digitalisierung identifiziert. Diese beiden Rohstoffe wurden auch in der Literatur, die im Rahmen dieses Projekts analysiert wurde, regelmäßig als

besonders wichtig für die Digitalisierung genannt. Daher wurde in den einzelnen Fallstudien, sofern diese Rohstoffe relevant waren, stets über ihren Einsatz berichtet und eine entsprechende Analyse durchgeführt.²².

Schritt 3: Im dritten Schritt wurden die Sachbilanzergebnisse der in Tabelle 10 als verfügbar angegebenen digitalisierungsrelevanten Rohstoffe einer Relevanzprüfung unterzogen. Hierbei wurden die Fallstudienenergebnisse für jeden Rohstoff ins Verhältnis zu seiner jährlichen globalen Gesamtproduktion gesetzt (falls keine Daten hierfür vorhanden waren, wurde ersatzweise der Wert für die jährliche globale Gesamtentnahme verwendet). Die sich ergebenden Werte wurden genutzt, um diese Rohstoffe entsprechend ihrer Relevanz in der betrachteten Fallstudie zu ordnen, wobei ein höherer anteiliger Wert an der jährlichen globalen Gesamtproduktion eine potenziell höhere Relevanz im Rahmen dieses Vorhabens abbildet. Auf diese Weise können Rohstoffe identifiziert werden, die je nach Fallstudie besonders digitalisierungsrelevant sind.

Daraus ergaben sich die verhältnismäßig in der betreffenden Fallstudie wichtigsten Rohstoffe, welche noch nicht in Schritt 1 und Schritt 2 miteinbezogen wurden. Insgesamt sollten pro Fallstudie mindestens fünf der in Schritt 3 als relevant identifizierten Rohstoffe (bzw. -gruppen) in einer Fallstudie berichtet werden, wobei sich das exakte Vorgehen jeweils nach den spezifischen Ergebnissen einer Fallstudie richten.

Im Ergebnis wurde die Rohstoffintensität einer Fallstudie daher wie folgt aufgeschlüsselt:

Gesamtrohstoffintensität sowie ungenutzte Materialentnahme nach Mostert und Bringezu (2019) sowie Pauliuk (2022), wobei die Rohstoffintensität in Abhängigkeit der jeweiligen Fallstudie zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase aufgeschlüsselt wurde und die Anteile von Biomasse, fossilen Energieträgern, Metallerzen und nichtmetallischen Mineralien berichtet wurden.

Intensität digitalisierungsrelevanter Rohstoffe gemäß den oben beschriebenen Schritten 2 und 3, sodass Aussagen zur Verwendung von Kupfer, Lithium und weiteren – auch kritischen - Rohstoffen getroffen werden konnten. Ergänzung um weitere ressourcenbezogene Ergebnisse (siehe nächster Absatz).

Weitere ressourcenbezogene Ergebnisse aus den Fallstudien

Der primäre Fokus des Vorhabens bei der Betrachtung der Fallstudien lag auf den verwendeten Rohstoffen – angegeben als kumulierter Indikator Rohstoffintensität und aufgeschlüsselt in die verwendeten Rohstoffe. Darüber hinaus wurden für die Fallstudien weitere umweltrelevante Indikatoren mit Ressourcenbezug berichtet:

- ▶ Treibhausgasemissionen,
- ▶ Kumulierter Energiebedarf,
- ▶ Wassernutzung,
- ▶ Landnutzung.

Wie zuvor analysiert, stehen Treibhausgasemissionen bzw. Klimaeffekte bisher im Fokus wissenschaftlicher Arbeiten und des öffentlichen Diskurses zur Digitalisierung (Manhart *et al.*, 2016; Liu *et al.*, 2019). Sie sollten daher auch im Rahmen der Fallstudien u. a. betrachtet werden, um Vergleiche mit bisherigen Erkenntnissen zu erlauben und möglicherweise neue Erkenntnisse zu dieser Debatte beizutragen. Treibhausgasemissionen der Fallstudien beziehen

²² Ausnahmen bestehen beispielsweise bei der Fallstudie zu Kryptowährungen, in welcher Lithium im betrachteten System verglichen mit anderen digitalisierungsrelevanten Rohstoffen nur eine deutlich untergeordnete Rolle spielt.

sich dabei auf alle mit der Fallstudie in Verbindung stehenden Emissionen von Treibhausgasen in der Herstellungs- und Nutzungsphase – sowohl aus den Vorketten (z. B. Verarbeitung und Herstellung der IKT-Hardware) als auch aus der Nutzungsphase (z. B. Nutzung von Strom zum Betreiben der Hardware). Der Indikator Energiebedarf korreliert bei Verwendung fossiler Energieträger häufig mit der Menge an Treibhausgasemissionen und konnte bei Bedarf in erneuerbare und nicht erneuerbare Energiequellen aufgeschlüsselt werden. Beide Indikatoren wurden in den einzelnen Fallstudien berichtet und kurz interpretiert.

Wie bereits in der Bestandsaufnahme dargelegt, wurden Wasser und Land wesentlich von der Herstellung der IKT beeinflusst. Der Abbau von Rohstoffen sowie die Herstellung von Halbleitern sind hierbei wesentliche Treiber des Wasserbedarfs sowie entstehender Abwässer (Liu *et al.*, 2019). Darüber hinaus ist die Erhebung von spezifischen Wasserbedarfen und die Quantifizierung von Landnutzung mit methodischen Schwierigkeiten und Unsicherheiten verbunden. Die beiden Indikatoren Land- und Wassernutzung wurden im Rahmen der Fallstudien daher kurz benannt, stellten aber nicht den Fokus der Betrachtung dar.

Darüber hinaus wurden fallstudienpezifisch weitere Informationen oder Indikatoren berichtet und interpretiert, sofern diese aufgrund der Literaturrecherche oder Ergebnisse der Berechnungen besonderer Aufmerksamkeit bedurften. Beispiele hierfür sind die regionale Verteilung der Ressourcenintensität oder ausgewählte Wirkungskategorien einer Ökobilanz.

B.2.4.3 Vorgehensweise bei der Auswahl der Fallstudien

Die Fallstudien sollten reale Anwendungen betrachten, die über einzelne Produkte bzw. Hardwarekomponenten hinausgehen. Daher sind in den Fallstudien Produkte und Komponenten als Teil eines ganzen Systems berücksichtigt, das einem digitalen Anwendungsfall zugrunde liegt. Der jeweilige Betrachtungsrahmen umfasst also z. T. mehrere Komponenten, Geräte, usw., deren Herstellung inkl. Vorketten und die Nutzungsphase (= die eigentliche digitale Anwendung). Diese Betrachtungsweise wurde gewählt, da so eine greifbare Bezugsreferenz aus dem Alltag behandelt wird und eine Einordnung der untersuchten Ressourcenintensitäten leichter möglich ist.

Die thematische Auswahl der Fallstudien fand auf Basis verschiedener Vorarbeiten innerhalb des Projekts statt. Grundlage hierfür waren insbesondere bestehende Studien und Literatur sowie die Berücksichtigung des methodischen Rahmens der System- und Betrachtungsgrenzen (Kapitel 2 und 3 des Abschlussberichtes „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023)). Diese Vorauswahl wurde schließlich zusammen mit Experten*Expertinnen des Umweltbundesamts im Rahmen eines Projekttreffen konsolidiert und es wurde eine finale Liste der zehn Fallstudien erarbeitet (Tabelle B-1). Details zur Berechnungsmethodik in den Fallstudien und zentrale Annahmen über alle Fallstudien hinweg sind in Kapitel B.2 beschrieben. Die zehn Fallstudien wurden dann in einer, soweit möglich, einheitlichen Vorgehensweise bearbeitet (siehe Kapitel B.3), wobei einige Aspekte allen Fallstudien gemein sind (z. B. methodisches Vorgehen in Anlehnung an LCA-Norm, Berechnungen mittels Datenbank und Software). Für die einzelnen Fallstudien (Kapitel B.3.1 bis B.3.11) wurden jeweils eine funktionelle Einheit und detaillierte Systemgrenzen definiert. Mittels Literaturrecherche wurden Informationen hinsichtlich der Bedeutung der Fallstudie für den „Sektor Digitalisierung“ und, soweit möglich, Prognosen zur zukünftigen Entwicklung und Bedeutung ergänzt. Die zentralen Ergebnisse der Fallstudien sind in übersichtlichen Zusammenfassungen dargestellt. Im Folgenden erfolgt eine detaillierte Darstellung gemäß Projektauftrag.

B.2.4.3.1 Aufbau und Gestaltung der Fallstudien

Der generelle Aufbau und die Struktur einer jeden Fallstudie orientierte sich an der im Folgenden beschriebenen Struktur, welche die jeweilige Zielsetzung und die jeweiligen methodischen Rahmenbedingungen berücksichtigten.

Für jede Fallstudie wird eingangs erläutert, inwiefern der betrachtete Anwendungsfall relevanter Bestandteil der Digitalisierung ist und warum er für die Betrachtung im Rahmen des Vorhabens geeignet ist. Hierbei wurde vor allem auf die bisherige Entwicklung und die gegenwärtige Bedeutung der digitalen Anwendung sowie auf vorhandene Zukunftsprognosen hinsichtlich der weiteren Verwendung eingegangen. Mittels Literaturrecherche und des Austauschs mit Experten*Expertinnen aus dem UBA wurden vorhandene Forschungsarbeiten und Studien zur jeweiligen Fallstudie und ihrem weiteren Kontext analysiert. Der aktuelle Wissenstand bezüglich der historischen und gegenwärtigen Entwicklung und zu bestehenden Erkenntnissen im Bereich Ressourcenintensität der Fallstudie wurde dargestellt.

Darüber hinaus wurden für jede Fallstudie potenzielle negative Umwelteffekte sowie Umweltentlastungspotenziale beschrieben. In Anlehnung an die Systematik aus der Bestandsaufnahme wurden hierbei, wann immer möglich direkte, indirekte und systemische Effekte unterschieden. Gleichzeitig erheben die Fallstudien nicht den Anspruch ein vollständiges Bild des vorhandenen Wissenstands wiederzugeben und weisen daher teils qualitativ oder in Kurzform auf bestehende Informationen hin.

Wie in der Bestandsaufnahme beschrieben, betrachten die Fallstudien die materielle Basis der Digitalisierung und die dadurch entstehenden Effekte auf die Umwelt in Form von Rohstoffentnahmen, Ressourcenintensitäten, Energiebedarfen und Treibhausgasemissionen. Somit wurden nicht nur tatsächlich in IKT-Produkten verwendete Materialien und somit die zugrundeliegenden Rohstoffe betrachtet, sondern auch die Ressourcenbedarfe in den vorgelagerten (*upstream*) und nachgelagerten (*downstream*) Wertschöpfungsstufen mitabgebildet. Diese überstiegen die in den IKT-Produkten letztlich gebundenen Mengen der meisten Rohstoffe deutlich – wie sich am Beispiel eines Laptops verdeutlichen lässt: der spezifische Rohstoffinput bei der Herstellung eines Laptops ist 270-mal so hoch wie das eigentliche Produktgewicht (Umweltbundesamt, 2021).

Im Unterschied zu direkten Effekten der Digitalisierung, die aus Ressourcensicht immer negativ sind (Ressourcen nutzen), können indirekte Umwelteffekte positiv oder negativ sein. Positive Effekte lassen sich dabei in Bezug auf die Einsparungen durch die digitale Lösung an anderer Stelle beschreiben (z. B. digitale statt analoger Lösung, effiziente zentralisierte statt weniger effiziente dezentrale Lösung). Wie bereits in der Bestandsaufnahme erörtert, kommen viele bisherige wissenschaftliche Arbeiten zu dem Schluss, dass die positiven indirekten Effekte der Digitalisierung die direkten negativen Umweltauswirkungen übersteigen (Bieser & Hilty, 2018), wobei Unsicherheiten bestehen bleiben und bisher vorwiegend in Bezug auf Treibhausgasemissionen beleuchtet wurden (siehe AP 1; Liu *et al.*, 2019; Itten *et al.*, 2020; Antony *et al.*, 2020). Die Fallstudien haben indirekte Einsparpotenziale durch die untersuchte digitale Anwendung anhand von Literaturquellen dokumentiert, wann immer dies in quantitativer Form möglich war. Weiterhin wurden mögliche negative Auswirkungen (Rebound-Effekte) qualitativ diskutiert.

Eine genaue Beschreibung des Untersuchungsrahmens einer jeden Fallstudie folgte der Einordnung der Thematik. Hierbei wurde die Bezugsgröße einer jeden Fallstudie erläutert und die Systemgrenzen der Betrachtung wurden vorgestellt. In Abhängigkeit der Fallstudie wurde gesondert auf Herstellungs- und Nutzungsphase, auf wesentliche Annahmen und verwendete Daten eingegangen und es wurden die wichtigsten Eingangsgrößen der Sachbilanzen genannt.

Eine detaillierte Übersicht zur Sachbilanz (*Life Cycle Inventory*) und *Contribution Analysis* findet sich für jede der Fallstudien im Kapitel B.4. Eine Abbildung veranschaulichte den Untersuchungsrahmen für jede Fallstudie.

Im Anschluss folgten die Ergebnisse der Bewertung der Ressourcenintensität. Für die Fallstudien wurden jeweils die zuvor festgelegten Indikatoren berichtet. Daneben orientiert sich die Struktur am methodischen Vorgehen, welches in Kapitel B.1 erläutert wurde. Es erfolgte zunächst der Überblick über die Rohstoffintensität insgesamt (Primärrohstoffeinsatz RMI und Gesamtprimärmaterialaufwand TMR). Für eine genaue Betrachtung der Rohstoffintensität und einem konkreten Verständnis der Ursachen für den jeweils berechneten Rohstoffbedarf sollten über den Indikator der Rohstoffintensität hinaus bestimmte Rohstoffe und Materialien explizit betrachtet und ausgewiesen werden. Hierfür wurden die kumulierten Elementarflüsse als Ergebnis einer Fallstudie zunächst hinsichtlich der mengenmäßig relevantesten Rohstoffe und Materialien untersucht und es wurden die wichtigsten Rohstoffe beschrieben. Zusätzlich dazu wurde besonderes Augenmerk auf weitere Rohstoffe gelegt, die in den einzelnen Fallstudien bewertet werden sollten. Diese Liste ergab sich aus dem aktuellen sowie zukünftig erwarteten Bedarf für die Digitalisierung (vgl. Kapitel 2 des Abschlussberichtes „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a) z. B. Kupfer, Technologiemetalle sowie Kapitel B.4 zu ausgewählten digitalisierungsrelevanten Rohstoffen). In einigen Fallstudien wurden außerdem verschiedene Szenarien analysiert, die Aspekte wie mögliche Ressourcen- oder Emissionseinsparungen durch grünen Strom oder Effizienzgewinne beleuchten, die durch die digitale Anwendung erreicht werden sollen.

Die Ergebnisse wurden für jede Fallstudie interpretiert und, soweit möglich, zusammen mit bestehenden Forschungsergebnissen in diesem Bereich diskutiert. Dabei wurde schlussfolgernd nochmals auf das Umweltentlastungspotenzial eingegangen und beschrieben, inwieweit die Ergebnisse der Fallstudie zur Minderung des Ressourcenbedarfs oder der Umweltentlastung beitragen. Darüber hinaus wurden in Abhängigkeit der Fallstudie auch etwaige inhärente Unsicherheiten in der Berechnung gesondert diskutiert und, wo möglich, mittels einer überschlägigen Berechnung eingeordnet. Dies war insbesondere für die Herstellungsphase der Rechenzentren der Fall, welche nicht in der Modellierung der Fallstudien abgebildet werden konnte. Weiterhin erfolgten für einige Fallstudien Hochrechnungen auf den gesamtdeutschen oder jährlichen Ressourcenbedarf, sofern dies zur Interpretation der Ergebnisse förderlich war.

B.3 Fallstudien

B.3.1 Fallstudie Videokonferenz im Homeoffice

B.3.1.1 Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung

Bereits vor Beginn der globalen Covid-19-Pandemie zeigten Umfragen, dass in Deutschland zukünftig ein Homeoffice-Anteil von bis zu 40 % denkbar wäre (Arnold *et al.*, 2015; Brenke, 2016; Büttner & Breitzkreuz, 2020). Spätestens seit Beginn der Pandemie hat sich die Arbeitsform des Homeoffice weiter gefestigt und verbreitet. Auch in Zukunft ist davon auszugehen, dass sich die Akzeptanz gegenüber dem mobilen Arbeiten weiter etablieren wird und dass deutlich mehr Arbeit sowie Aus- und Fortbildungen ganz oder teilweise in Heimarbeit stattfinden wird (Büttner & Breitzkreuz, 2020; Crow & Millot, 2020). Videokonferenzen dienen dabei unter anderem als Mittel zur Gewährleistung einer guten Zusammenarbeit trotz der entstehenden räumlichen Distanz zwischen den Mitarbeitenden. Sie werden sowohl zur

bilateralen Abstimmung als auch zum Austausch in größeren Runden, bis hin zu Online-Konferenzen mit einer großen Zahl an Teilnehmenden genutzt.

Auch im privaten Umfeld hat seit Beginn der Pandemie die Nutzung von Videokonferenzen stark zugenommen. Einer im Januar 2021 in Deutschland durchgeführten Studie zufolge gaben 19 % der Befragten an, während der Covid-19-Pandemie wöchentlich fünf bis neun Stunden Videogespräche geführt zu haben. Eine vergleichbare Antwort gaben vor der Covid-19-Pandemie nur 3 % der Befragten (Statista, 2021b).

Laut einer Studie zur Zukunft des Arbeitens nach der Covid-19-Pandemie (Lund *et al.*, 2021) können 70 % der Arbeiten, die am Computer stattfinden, auch ohne Effizienzeinbußen von Zuhause erledigt werden. In einer weltweiten Umfrage unter Führungskräften zeigte sich bereits im Juli 2020, dass bei 85 % der befragten Unternehmen die Nutzung der Kommunikations- und Kollaborationstools für virtuelle Zusammenarbeit während der Pandemie erhöht wurde und auch zukünftig besonders Routinebesprechungen virtuell fortgesetzt werden sollen (Lund *et al.*, 2021). Somit ist die Videokonferenz sowohl für berufliche als auch private Zwecke vieler Menschen mittlerweile ein gängiges Kommunikationsmittel.

B.3.1.2 Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie

Zur Betrachtung der Ressourcenintensität einer Videokonferenz muss zunächst eine Eingrenzung des Betrachtungsrahmens im Hinblick auf das System Videokonferenz im Homeoffice vorgenommen werden.

Zum Durchführen einer Videokonferenz müssen die Teilnehmenden jeweils über Endgeräte zur Wiedergabe von Bild und Ton (Bildschirm und Lautsprecher) sowie zur Aufnahme dieser (Kamera und Mikrofon) verfügen. Die Zusammensetzung der genutzten Geräte gestaltet sich im Einzelfall unterschiedlich, abhängig von der Verfügbarkeit, dem Format der Konferenz und den individuellen Präferenzen der Teilnehmenden. Allen gemein ist, dass sie Daten erzeugen und empfangen und so über das Internet mit einem Videokonferenzserver kommunizieren, welcher die Datenströme an die Teilnehmenden der Videokonferenz verteilt (Gröger *et al.*, 2021).

Für die Teilnahme an einer Videokonferenz sind verschiedene Endgeräte verfügbar. Hierbei spannt sich das Sortiment von Geräten wie Laptops, Smartphones und Tablets über Desktop PCs hin zu speziell für Videokonferenzen entwickelten Geräten wie großen Videomonitoren mit eingebauter Kamera und Mikrofon. Da sich die Nutzung von solchen speziell für Videokonferenzen entwickelten Geräten in der Regel auf Büroräume beschränkt, werden im Homeoffice meist multifunktionale Geräte wie Laptops und Smartphones benutzt, welche in einer Vielzahl digitaler Anwendungen Verwendung finden. Somit beinhaltet ein Einblick in den Anwendungsfall Videokonferenz nicht nur Informationen über eine spezielle digitale Anwendung, sondern setzt sich auch mit Fragen der Anrechenbarkeit des Ressourcenverbrauchs immer multifunktionaler Geräte auf die einzelnen digitalen Anwendungsfälle auseinander.

Neben den Endgeräten und der Heimvernetzung in Form eines Routers sind zudem das Übertragungsnetz und das Rechenzentrum für das Durchführen einer Videokonferenz relevant (Gröger *et al.*, 2021). Wie zuvor erläutert, wurden diese nur in Form ihres Energieaufwands für die Datenübertragung in die Betrachtung einbezogen. Die Sensitivität der Ergebnisse hinsichtlich dieser Vereinfachung wurde abschließend über eine Annäherung betrachtet. Der Stromverbrauch der Server- und Übertragungsnetznutzung wurde jedoch über einen aus der Fachliteratur hergeleiteten Berechnungsschlüssel für die Nutzungsphase in das Modell mit integriert (Gröger *et al.*, 2021).

Die Entsorgung der End- und Heimvernetzungsgeräte fand in der hier durchgeführten Betrachtung keine Berücksichtigung (siehe Kapitel zum Fokus auf Herstellungs- und Nutzungsphase). Auf Basis bisheriger Studien ist davon auszugehen, dass Produktion und Nutzungsphase dominant in ihrer Umweltwirkung gegenüber der Entsorgung der Geräte sind (Prakash *et al.*, 2012; Joshi *et al.*, 2021).

B.3.1.3 Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie

Für den Anwendungsfall der Videokonferenz als Teil der Arbeit im Homeoffice wurde folgende Untersuchungseinheit gewählt:

Teilnahme an einer einstündigen Gruppen-Videokonferenz unter Nutzung eines geeigneten Endproduktsystems aus dem Homeoffice

Generell gibt es eine Vielzahl an möglichen Endgeräten, die zur Teilnahme an Videokonferenzen aus dem Homeoffice genutzt werden können. Um dies abzubilden, wurden im Folgenden drei verschiedene Videokonferenzsysteme definiert, welche in gewichteten Anteilen das betrachtete Endgerätsystem bilden. Die Notwendigkeit, verschiedene Videokonferenz-Komponenten in dieser Studie zu berücksichtigen, basiert auf vorhandenen Forschungsarbeiten, die herausgestellt haben, dass die von Nutzenden installierte IT einen signifikanten Beitrag zu den Gesamtauswirkungen leistet (Gröger *et al.*, 2021).

B.3.1.3.1 Komponenten und betrachtete Videokonferenzsysteme

Für die Festlegung der zu berücksichtigenden Komponenten der Fallstudie Videokonferenz wurden vier bestehende Studien zu den Umweltwirkungen von Videokonferenzen im Hinblick auf die verwendeten Produktsysteme analysiert. Eine Auflistung der in diesen Studien identifizierten Komponenten ist in Tabelle B-10 aufgeführt.

Tabelle B-10: Komponenten für Videokonferenzen gemäß Literaturrecherche

Quelle	Gelistete Videokonferenz-Komponenten
Ong <i>et al.</i> (2012)	Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon Externer Monitor Externe Kamera Headset Externes Soundsystem Router
Vandromme <i>et al.</i> (2014)	Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon Router
Leuenberger und Büsser (2010)	Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon Router
Gröger <i>et al.</i> (2021)	Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon Desktop PC + Computer-Monitor Großer Videomonitor + Desktop PC Router

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

Gemein ist allen Endkomponenten-Systemen die Nutzung eines Routers sowie die Betrachtung eines Laptops mit integrierter Kamera und Mikrofon. Zwei der betrachteten Produktsysteme

behandeln zudem die Nutzung eines externen Monitors. Wider Erwarten betrachtet keine der Studien die Nutzung eines Smartphones zur Einwahl in eine Videokonferenz. Mit Hinblick auf die Omnipräsenz von Smartphones im privaten wie beruflichen Alltag sollte dieses in einer Betrachtung des Systems nicht ausgelassen werden.

Für die Fallstudie wurden daher drei Möglichkeiten zur Einwahl in eine Videokonferenz definiert, welche den untersuchten Anwendungsfall beschreiben, möglichst repräsentativ sind und unter dem Aspekt der Datenverfügbarkeit geeignet sind (siehe Tabelle B-12). Die Fülle unterschiedlicher Möglichkeiten der Videokonferenzteilnahme (Equipment, technische Bedingungen, individuelle Anforderungen etc.) wurde somit beispielhaft und vereinfacht abgebildet. Auch auf die Betrachtung aufwändigerer Komponenten einer Videokonferenz, wie etwa eines großen Videomonitors oder eines externen Soundsystems, wurde aufgrund des Kontexts im Homeoffice bewusst verzichtet. Größere oder komplexere Systeme sind oft mit hohen Anschaffungskosten verbunden und daher eher in Büroräumlichkeiten als im privaten Raum anzutreffen.

Im Hinblick auf die Anteile der drei Konferenzsysteme konnten in der Literatur keine geeigneten Informationen zur Einordnung identifiziert werden. Die Annahmen für die Anteile der Nutzung wurden daher wie in Tabelle B-11 abgebildet definiert.

Tabelle B-11: Betrachtete Konferenzsysteme (Endproduktsysteme) und angenommene Nutzungsanteile in Prozent der Fallstudie „Eine Stunde Videokonferenz“

Betrachtete Endgeräte zur Teilnahme an der Videokonferenz	Anteil der Nutzung (Annahme)
System 1: Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon + Router	40 %
System 2: Smartphone + Router	20 %
System 3: Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon + externer Monitor + externe Tastatur + optische PMaus + Router	40 %

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, basierend auf Leuenberger und Büsser (2010); Ong *et al.* (2012); Gröger *et al.* (2021); Vandromme *et al.* (2014)

B.3.1.3.1.1 Rahmenbedingungen der Nutzungsphase

Für die Nutzungsphase der Fallstudie Videokonferenz sind vor allem die Energiebedarfe relevant. Vandromme *et al.* (2014) berücksichtigen eine Annahme für die Nutzung eines Arbeitslaptops von vier Jahren, 50 Wochen pro Jahr, fünf Tage pro Woche, acht Stunden täglich. Um eine klare Zuordnung der zu beurteilenden Umweltindikatoren dieser Fallstudie über die Zeit zu ermöglichen, wurde angenommen, dass im Homeoffice keine privaten Geräte zur Anwendung kommen, sondern lediglich vom Arbeitgeber bereitgestellte Geräte Verwendung finden. Daher wurde das Nutzungsprofil auf die Komponenten der drei hier betrachteten Videokonferenzsysteme übertragen. Tabelle B-12 listet die Leistungsaufnahme der betrachteten Systeme auf.

Tabelle B-12: Leistungsaufnahme in kWh der betrachteten Geräte pro Stunde für die Fallstudie „Eine Stunde Videokonferenz“

Gerät	Leistungsaufnahme pro Stunde	Quelle
Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon	0,0084 kWh	Prakash <i>et al.</i> (2016)
Smartphone	0,002 kWh	3227 mAh (0,0124 kWh) Akkukapazität (iPhone 13), 1x täglich laden (Hristov, 2022)
Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon + externer Monitor	0,0164 kWh	Prakash <i>et al.</i> (2016)
Router	0,013 kWh	Gröger (2020)

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

Die Leistungsaufnahmen einer externen Tastatur oder optischen PMaus wurden nicht berücksichtigt, da davon ausgegangen wurde, dass der zusätzliche Stromverbrauch über den Laptop bereitgestellt wird, an den sie angeschlossen sind. Dieser Verbrauch ist im Verhältnis zu den in Tabelle B-12 aufgeführten Geräten vernachlässigbar.

Um den Strombedarf einer Videokonferenz abzubilden, musste auch jener Strom berücksichtigt werden, der durch die Internetverbindung und Servernutzung in Anspruch genommen wird (Übertragungsnetz und Server/Rechenzentrum). Im Rahmen des Green Cloud Computing Projekts (Gröger *et al.*, 2021) wurden Primärdaten von einem Anbieter für Videokonferenzen erhoben. Der Energiebedarf für Server, Speicher, Netzwerk und Infrastruktur im Rechenzentrum ist mit 112 Kilowattstunden pro Woche angegeben. Die betrachteten Server werden ausschließlich für das Bereitstellen von Videokonferenzen genutzt. Im einwöchigen Betrachtungszeitraum wurden 27.133 Teilnahmestunden an Nutzung der Cloud-Dienstleitung gemessen. Daraus resultiert ein Energiebedarf von 0,0041 kWh pro Teilnahmestunde. Die durchschnittliche Bandbreite der betrachteten Videokonferenzen lag bei 612 MB pro Teilnahmestunde. Diese Angaben sind vergleichbar mit Literaturwerten zur benötigten Bandbreite am Beispiel des amerikanischen Videokonferenzanbieters „Zoom“, wie in Tabelle B-13 in Abhängigkeit von Bildqualität und Teilnehmenden dargestellt. Die erhobene durchschnittliche Bandbreite von 612 MB pro Stunde wurde somit als ausreichend repräsentativ für den betrachteten Fall angesehen.

Tabelle B-13: Für Videokonferenzen benötigte Bandbreite des Anbieters „Zoom“ in Standardqualität für Einzel- und Gruppenanrufe

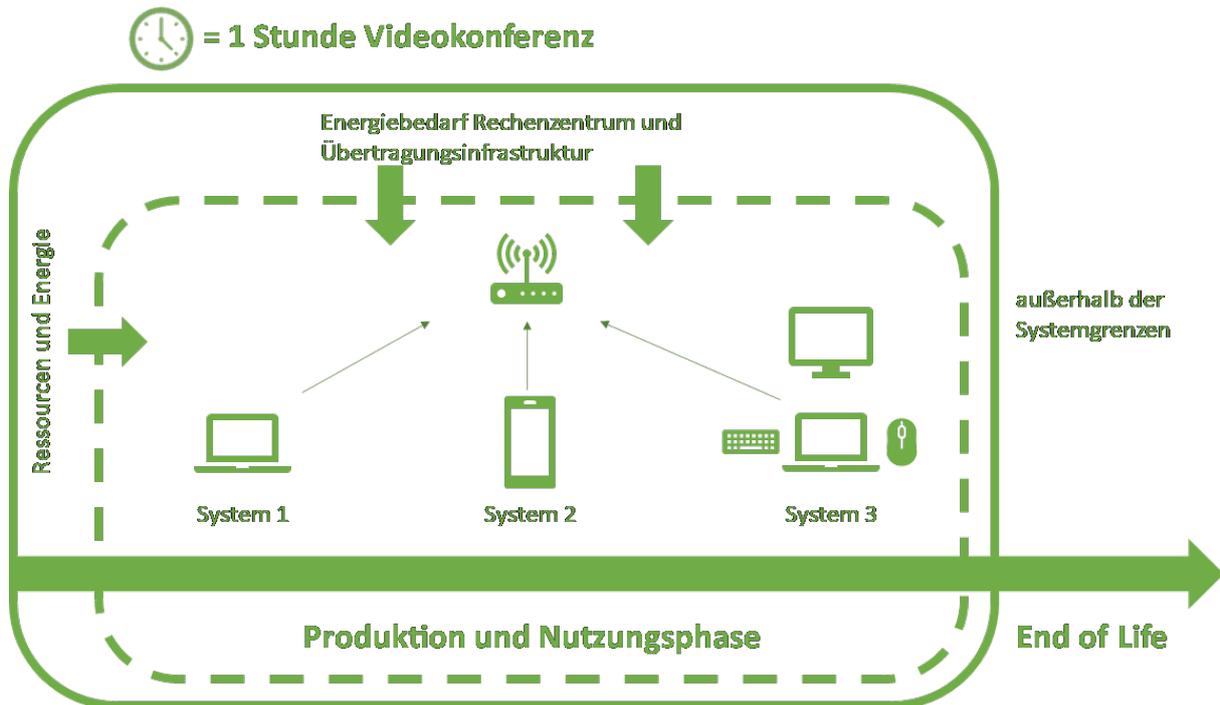
Bildqualität	Upload/Download	MB/min	MB/hr
480p/Standard	600/600 Kbps	9	540
Für Gruppenanrufe:			
480p/Standard	800 Kbps/1 Mbps	13,5	810

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach Braun (2020)

Zusätzlich zum Energiebedarf des Rechenzentrums ist auch die Leistungsaufnahme der Komponenten zur Datenübertragung zu berücksichtigen. Hierbei wurde ebenfalls auf die Green Cloud Computing Studie (Gröger *et al.*, 2021) zurückgegriffen, in welcher für einen exemplarischen Datenstrom auf einer Wegstrecke von ca. 500 km innerhalb Deutschlands ein Energiebedarf von 0,0016 kWh/GB für eine VDSL-Verbindung angegeben wird.

Die wesentlichen Rahmenbedingungen der Fallstudie sind in Abbildung B-9 schematisch zusammengefasst.

Abbildung B-9: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Eine Stunde Videokonferenz“



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

B.3.1.3.1.2 Weitere Sachbilanzen

Für die Modellierung der Fallstudie „Eine Stunde Videokonferenz“ wurden Datensätze für Endgeräte aus der Datenbank Ecoinvent verwendet. Der jeweilige Ressourcenbedarf für die Herstellung der wichtigsten verwendeten Endgeräte (Laptop, Smartphone, Display) wurde bereits in Kapitel 4 des Abschlussberichtes „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a) dargestellt.

Unter Betrachtung der Systemgrenzen sind neben der Herstellung der bereits dargestellten Endgeräte folgende weitere Datensätze Teil der Sachbilanz:

- ▶ Router: *market for router*, internet | router, internet | *Cutoff*, U – GLO.
- ▶ Tastatur: *market for keyboard* | keyboard | *Cutoff*, U – GLO.
- ▶ Optische PMAus: *market for pointing device, optical mouse, with cable* | pointing device, optical mouse, with cable | *Cutoff*, U – GLO.

- ▶ Strombedarf der Festnetz-Internetverbindung: *market group for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U – GLO.*
- ▶ Strombedarf durch Leistungsaufnahme der betrachteten Endgeräte: *market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U – DE.*

Für die Modellierung des Strombedarfs im Rechenzentrum und bei der Übertragung wurde ein Datensatz verwendet, der einen globalen Durchschnitt der Stromherstellung abbildet. Dieser Datensatz wurde verwendet, da die Fallstudie verschiedene Videokonferenzanbieter repräsentieren soll. Es wurde angenommen, dass die Server der Videokonferenzanbieter weltweit verteilt sind. Daher kann ein repräsentativer Anwendungsfall am besten durch die Verwendung eines globalen Durchschnitts dargestellt werden.

Die Aufschlüsselung nach konkreten Rohstoffen erfolgt im nachfolgenden Kapitel im Rahmen der Ergebnisse. Eine tabellarische Übersicht über die gesamte Sachbilanz ist im Kapitel B.5.1 enthalten.

B.3.1.4 Ressourcenintensität des Anwendungsfalls

Die Ergebnisdarstellung differenziert zunächst für die einzelnen Indikatoren zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase.

Vorgehensweise bei den Berechnungen

In den Fallstudien wurden die Indikatoren, die in Kapitel B.3.4 beschrieben werden mit Hilfe von OpenLCA und der Ecoinvent Datenbank berechnet. Die Datenbank und Software werden in Kapitel B.4 und B.5 detailliert vorgestellt. In Kapitel B.5 wird unter dem Abschnitt „Nachvollziehbarkeit der Software-Berechnungen in den Fallstudien“ 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 (Kapitel B.3.1 bis B.3.11).

B.3.1.4.1 Rohstoffintensität des Anwendungsfalls

B.3.1.4.1.1 Herstellungsphase

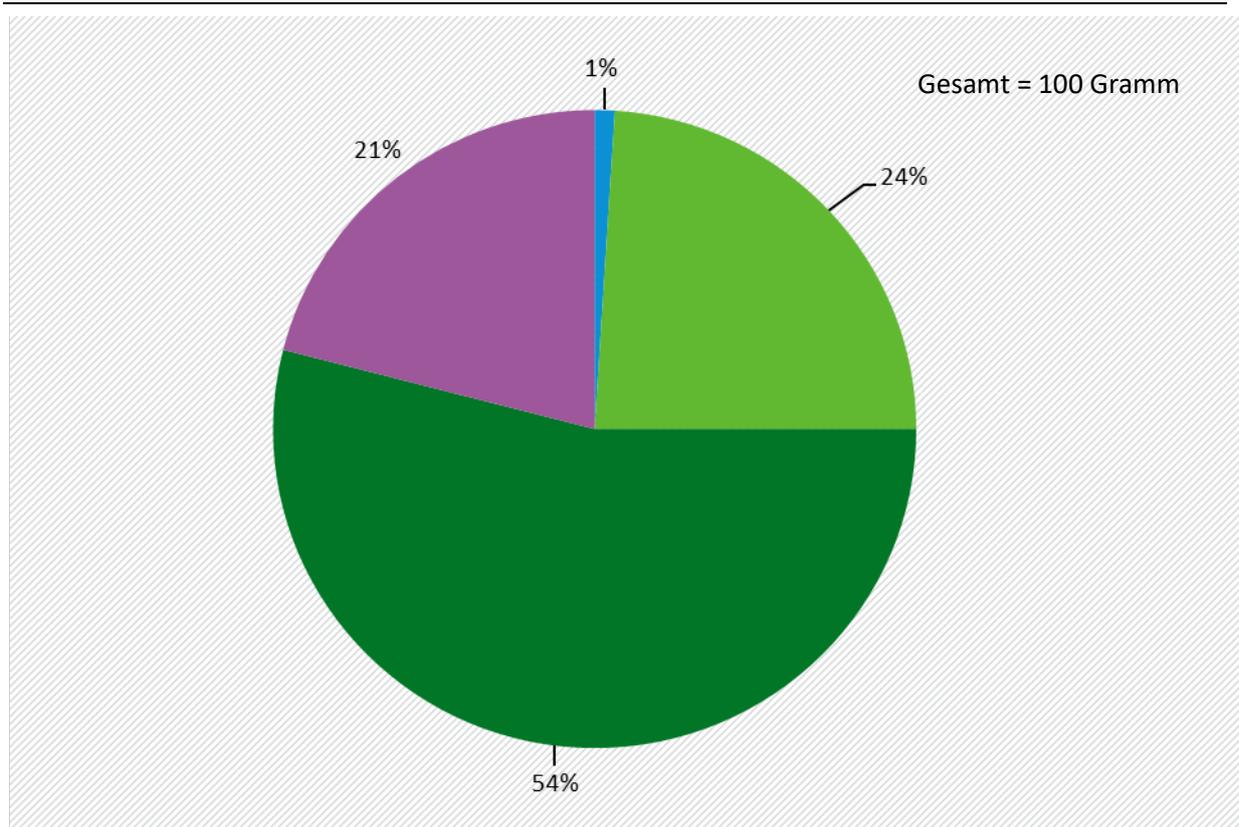
Zur Herstellung der typischen Komponenten, welche für eine Videokonferenz benötigt werden, wurde ein Primärrohstoffeinsatz von rund 797 kg berechnet. Bezogen auf die verwendete Untersuchungseinheit von **einer Stunde Videokonferenz** ergibt sich hieraus ein **Primärrohstoffeinsatz** von rund **100 g/h**, der dieser zeitlichen Verwendung der Geräte zugeschrieben werden kann.

Wird auch die ungenutzte Materialentnahme in die Erhebung miteinbezogen, berechnet sich für das Videokonferenzsystem ein **Gesamtprimärmaterialaufwand** von 906,53 kg, was in der Betrachtung dieses Vorhabens zu einem Wert von **113 g/h** für die untersuchte Untersuchungseinheit von einer Stunde Videokonferenz führt.

Die Anteile der verschiedenen Rohstoffgruppen am Primärrohstoffeinsatz sind in der folgenden Abbildung B-10 dargestellt. Demnach entfallen mit rund 50 g/h etwa die Hälfte der zur Herstellung des Videosystems beanspruchten Rohstoffe auf Metallerze (54 %). Metallerze werden größtenteils zur Herstellung des Routers, des externen Displays und des Laptops im beschriebenen Produktsystem benötigt.

Fossile Energieträger (24 %) und nichtmetallische Mineralien (21 %) liegen etwa in der gleichen Größenordnung, wohingegen die Rohstoffgruppe Biomasse einen vernachlässigbaren Anteil ausmacht. Fossile Energieträger sind ein Indikator der Energieintensität der Vorprozesse.

Abbildung B-10: Rohstoffintensität (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffgruppen zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ in Prozent*



- Primärrohstoffeinsatz, Biomasse
- Primärrohstoffeinsatz, fossile Energieträger
- Primärrohstoffeinsatz, Metallerze
- Primärrohstoffeinsatz, nichtmetallische Mineralien

* Die Abbildung zeigt gerundete Zahlen

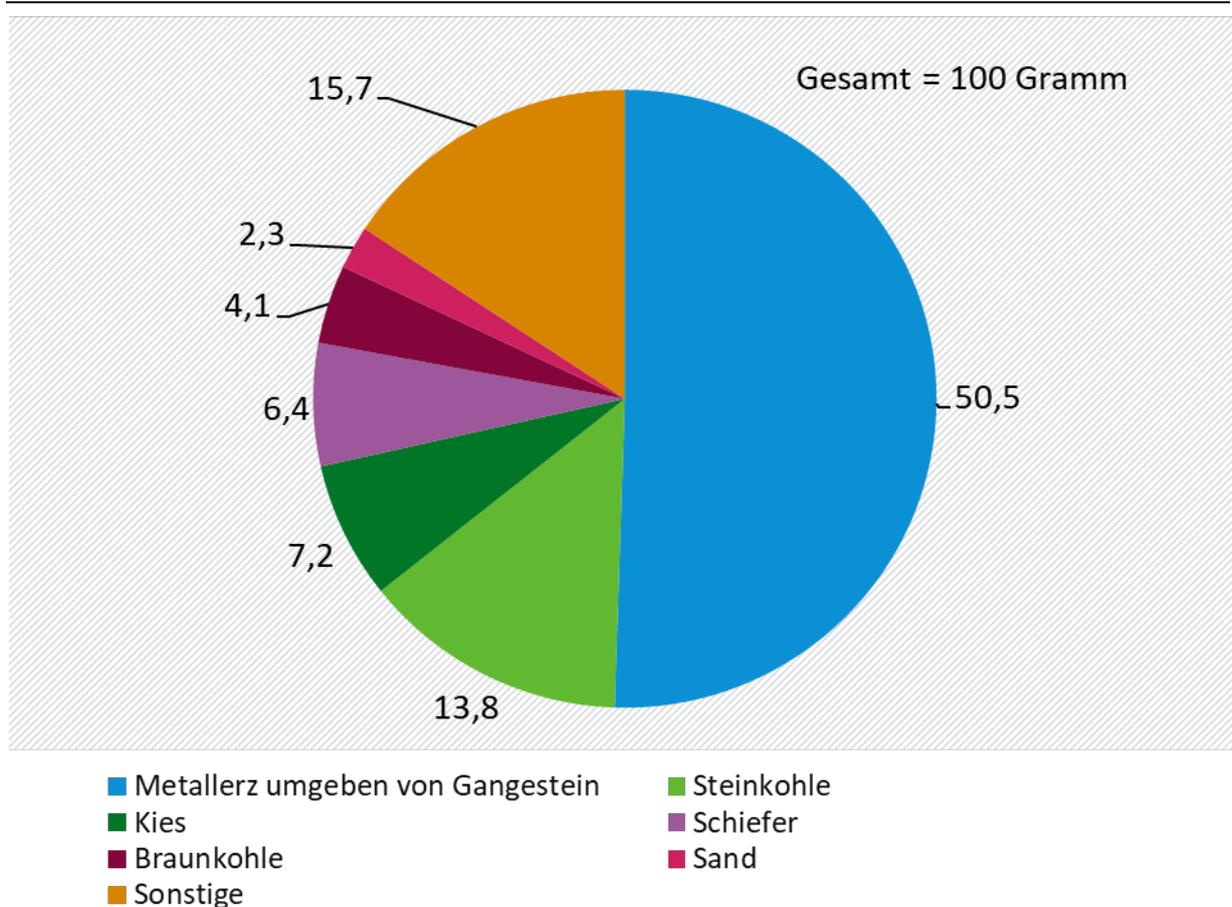
Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Bei Betrachtung der Herstellungsphase nach Rohstoffarten (Abbildung B-11) zeigt sich, dass diese massentechnisch vorrangig durch die Entnahme von Ganggestein, Stein- und Braunkohle, Kies, Schiefer und Sand geprägt ist. Der verbleibende Anteil von 8 % verteilt sich auf Calcit, Rohöl, Lehm und Eisen.

Die Herstellungsphase der Endgeräte umfasst dabei - wie auch schon bei den Berechnungen der Rohstoffgruppen (Abbildung B-10) - alle systemweiten Rohstoffaufwendungen inklusive

notwendigen Vorketten und benötigter Energiezufuhr²³. Abbildung B-11 zeigt, dass mineralische und fossile Rohstoffe in der Herstellungsphase den größten Anteil am Primärrohstoffbedarf ausmachen, und zwar 92 % (91,8 g/h, vgl. Abbildung B-11). Vergleicht man diese Rohstoffe exemplarisch mit den Bestandteilen eines Smartphones (entnommen aus Rizos *et al.*, 2019), zeichnet sich ab, dass bei den aufgeführten Stoffen in Abbildung B-11 nicht davon auszugehen ist, dass sie in entsprechenden Mengen in den IKT-Endgeräten selbst vorhanden sind, sondern in den Produktionsketten und Energienutzungsprozessen zuvor beansprucht wurden (mit Ausnahme von Eisen, welches tatsächlich Bestandteil eines klassischen Smartphones ist).

Abbildung B-11: 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.

²³ Wie in Kapitel 4 des Abschlussberichtes „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023) beschrieben, wird in dieser Betrachtung der Rohstoffbedarf für die Herstellung der Komponenten für Rechenzentren und die Netzinfrastruktur nicht in die Modellierung miteinbezogen, sondern in diesem Kapitel überschlägig betrachtet.

Abschätzung zum Einfluss der Herstellung des Rechenzentrums auf das Gesamtergebnis

Zur Abschätzung des möglichen Einflusses der Herstellungsphase der Rechenzentren auf das Gesamtergebnis wurden zwei Indikatoren der Fallstudie mit den Ergebnissen der Green Cloud Computing-Studie (Gröger *et al.*, 2021) verglichen. Bezogen auf das *Abiotic Depletion Potential* (ADP) in Antimonäquivalenten (Sb-Äq.) verursacht die Herstellung der Rechenzentren 0,5 % der Gesamtauswirkungen der Herstellungsphase für eine einstündige Videokonferenz; bezogen auf das *Global Warming Potential* (GWP) sind es 0,7 % der gesamten CO₂-Äquivalente. Es ist daher davon auszugehen, dass der Rohstoffbedarf für die Erhebung der Fallstudie kaum durch die Herstellung des Rechenzentrums beeinflusst wird – nicht, weil der Bedarf an Rohstoffen zur Herstellung des Rechenzentrums so gering wäre, sondern weil durch die große Menge an bereitgestellten Teilnahmestunden im Lebenszyklus eines Rechenzentrums die auf eine Stunde Videokonferenz allozierbare Menge deutlich geringer ist als bei den Endgeräten der Teilnehmenden.

Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe

Neben den zuvor dargestellten Berechnungen zu den Rohstoffen wurden in den Fallstudien auch die so genannten „besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe“ analysiert und quantifiziert (siehe Kapitel B.3.3.4).

Tabelle B-14 stellt die für diese Fallstudie berechneten Mengen von digitalisierungsrelevanten Rohstoffen dar und bezieht diese wiederum auf die Untersuchungseinheit von einer Stunde Videokonferenz. Dabei werden kritische Rohstoffe im Sinne der Definition der EU-Kommission (Europäische Kommission, 2020), unter ihnen seltene Erden und Metalle der Platingruppen, und andere **digitalisierungsrelevante Rohstoffe** unterschieden. Die Mengen insgesamt in Höhe von rund **260 mg** fallen im Vergleich zu den Ergebnissen bei den Rohstoffen vergleichsweise gering aus. Diese besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffe sind jedoch von herausragender rohstoffpolitischer, strategischer und technologischer Bedeutung und werden daher zusätzlich ausgewiesen (Abbildung B-12).

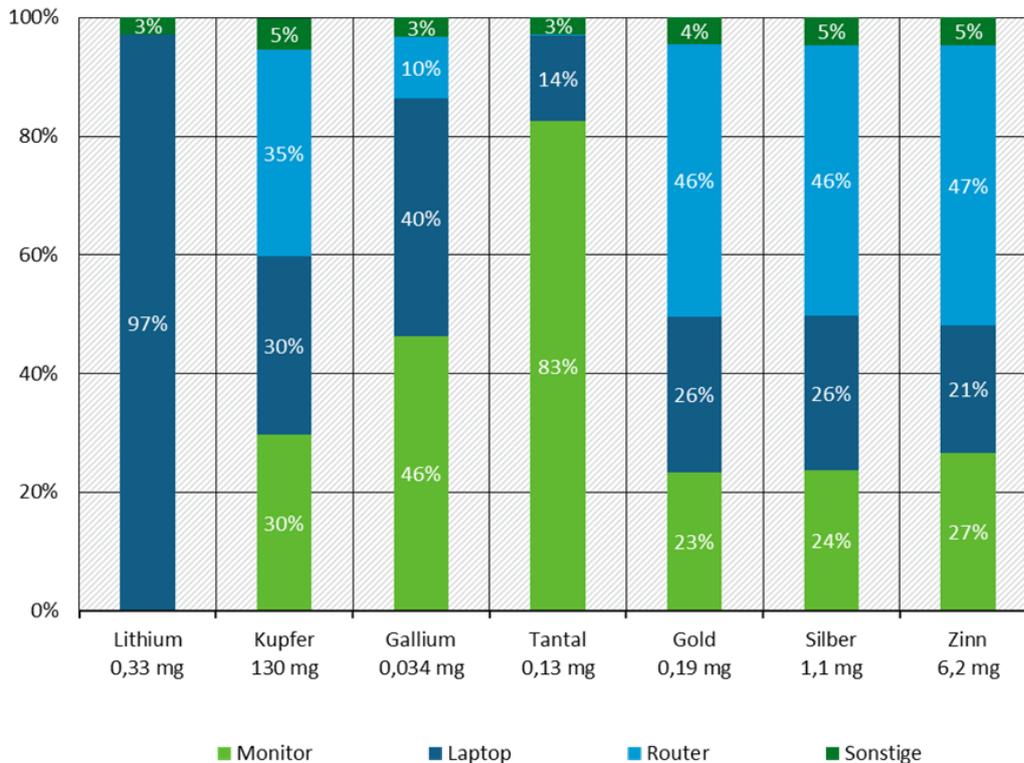
Tabelle B-14: Erforderliche Menge digitalisierungsrelevanter Rohstoffe zur Bereitstellung für die Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ in Milligramm

Ressource	Menge für die Herstellung der IKT-Endgeräte (allokiert auf die Untersuchungseinheit von Eine Stunde Videokonferenz) [mg]
Kritische, digitalisierungsrelevante Rohstoffe	49
... davon seltene Erden	0,16
... davon Platingruppenmetalle	0,0010
Andere digitalisierungsrelevante Rohstoffe	210
Summe	260

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

Die folgende Abbildung B-12 fasst die für diesen Anwendungsfall besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffe der Herstellungsphase noch einmal zusammen und zeigt auch die verschiedenen Anteile an den digitalen Komponenten. Nach den Berechnungen in diesem Vorhaben spielen Lithium und Kupfer sowie weitere fünf Rohstoffe (Gallium, Tantal, Gold, Silber und Zinn) eine wichtige Rolle. Sie machen etwa die Hälfte (rund 138 mg) aus.

Abbildung B-12: 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.

Auffällig ist dabei, dass für alle besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffe der Großteil des Bedarfs auf eines oder mehrere von drei Endgeräten entfällt: den Monitor, den Router, und den Laptop, und diese wiederum für verschiedene Anteile der Rohstoffe verantwortlich sind. Auffällig ist auch, dass für Lithium der Laptop und für Tantal der Monitor besonders herausstechen, da sie jeweils über 95 % bzw. über 80 % des Gesamtrohstoffbedarfs ausmachen. Kupfer und andere Rohstoffe wie Gold oder Zinn werden in allen Geräten benötigt, sodass sich hier ein differenzierteres Bild zeigt. Die Kategorie „Sonstige“ umfasst dabei im Wesentlichen das Smartphone, die Tastatur und die Maus. Bemerkenswert ist, dass der Beitrag des Smartphones zum Gesamtrohstoffbedarf gering ist. Dies resultiert einerseits aus der geringen Nutzung von Videokonferenzen über das Smartphone im Nutzungsprofil. Andererseits zeigt sich, dass die Verwendung der betrachteten Videokonferenzanwendung auf dem Smartphone generell mit einem deutlich niedrigeren Bedarf an besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffen dieses Anwendungsfalls verbunden ist.

Tabelle B-15: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ in Gramm und Prozent – Tabelle zu Abbildung B-12

Rohstoff	Monitor [g]	Laptop [g]	Router [g]	Sonstige [g]
Lithium	0 (0 %)	0,32 (97 %)	0 (0 %)	0,01 (3 %)
Kupfer	39 (30 %)	39 (30 %)	45 (35 %)	6,84 (5 %)
Gallium	0,02 (46 %)	0,01 (40 %)	0 (10 %)	0 (3 %)
Tantal	0,11 (83 %)	0,02 (14 %)	0 (0 %)	0 (3 %)
Gold	0,04 (23 %)	0,05 (26 %)	0,09 (46 %)	0,01 (4 %)
Silber	0,26 (24 %)	0,29 (26 %)	0,50 (46 %)	0,05 (5 %)
Zinn	1,65 (27 %)	1,33 (21 %)	2,93 (47 %)	0,29 (5 %)

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

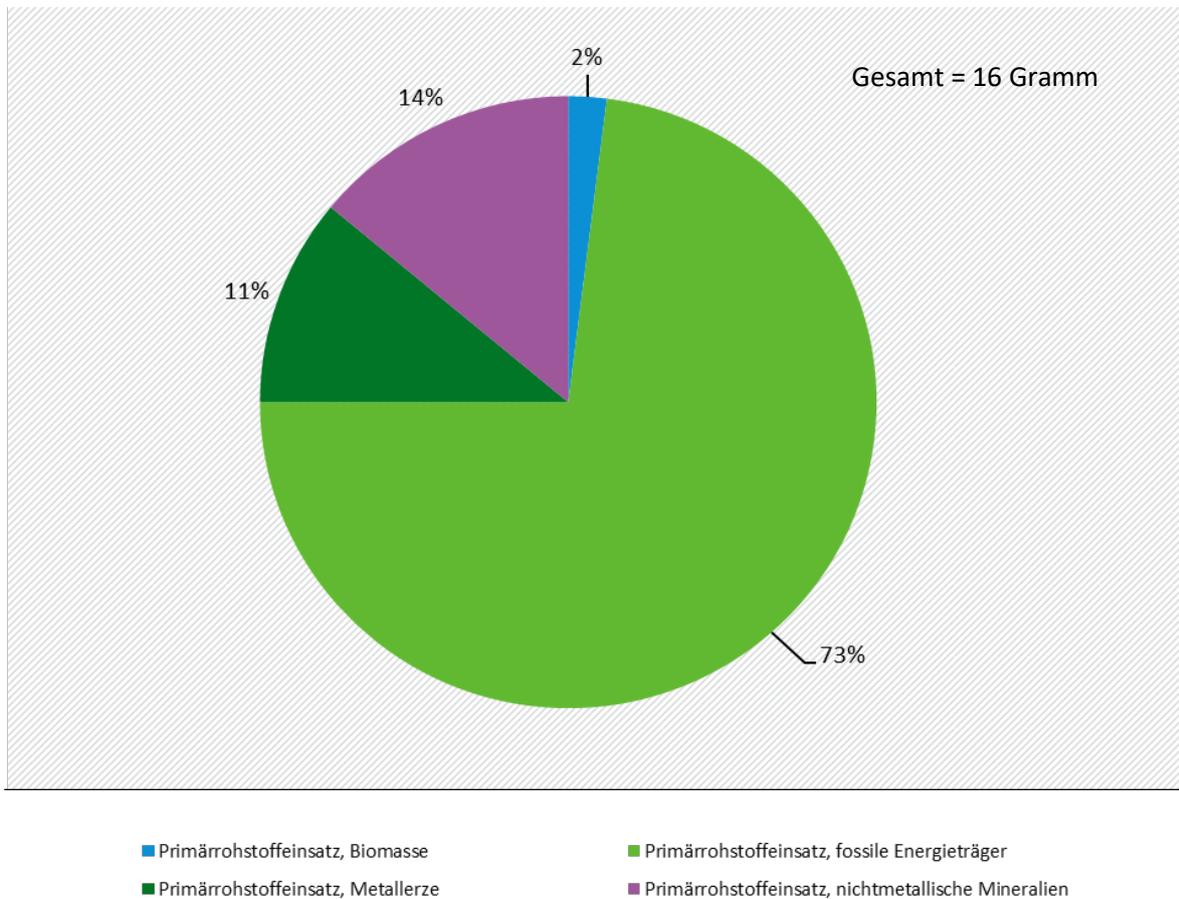
Zur Einordnung der Ergebnisse vor dem Hintergrund der Nutzung von Videokonferenzen und begrenzter Rohstoffverfügbarkeit wurde eine Abschätzung zum jährlichen Bedarf der besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffe, der durch die berufliche Nutzung von Videokonferenzen verursacht wird, vorgenommen. Die „*Collaboration-Maturity-Studie*“ von Atlassian gibt an, dass vier von zehn Büroangestellten bis zu fünf Stunden pro Woche in Videokonferenzen verbringen; ein Viertel sogar bis zu zehn Stunden pro Woche (Kroker, 2021). Unter Berücksichtigung der Zahl der in Büros arbeitenden Beschäftigten in Deutschland (Hammermann & Voigtländer, 2020) wurden die resultierenden jährlichen Bedarfe an den besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffen berechnet. Die resultierenden Werte für den Anteil an der jährlichen Gesamtentnahme, welcher der beruflichen Nutzung von Videokonferenzen zugeschrieben werden kann, bewegen sich alle im Bereich unter 0,1 % der jährlichen Gesamtentnahme der entsprechenden Ressource. Daher ist allein durch die berufliche Nutzung von Videokonferenzen auf Basis der hier erarbeiteten Sachbilanz nicht von einem relevanten Einfluss auf die Nutzung und Verfügbarkeit der ausgewählten Ressourcen auszugehen.

B.3.1.4.1.2 Nutzungsphase

Für eine **einstündige Nutzung des Videokonferenzsystems** wurde in diesem Vorhaben ein **Primärrohstoffeinsatz** von **16 g** berechnet. Beeinflusst wird dieser Primärrohstoffeinsatz im Wesentlichen durch den Stromverbrauch (Energieträger) der Videokonferenz-Endgeräte sowie den Stromverbrauch der Festnetz-Internetverbindung. Analog wurde der **Gesamtprimärmaterialaufwand** mit **21 g** berechnet. Im Vergleich ist die Herstellungsphase somit mit einem mehr als drei Mal so hohem Primärrohstoffeinsatz pro Stunde Videokonferenz verbunden als die Nutzungsphase.

Die folgende Abbildung B-13 zeigt die Anteile der verschiedenen Rohstoffgruppen am Gesamtwert des Primärrohstoffeinsatzes. Durch den Umstand, dass der Primärrohstoffeinsatz der Nutzung im Wesentlichen durch die Strombedarfe der Endgeräte wie dem Strombedarf der Internetnutzung bedingt ist, sind die Anteile durch den zugrundeliegenden Strommix geprägt. Sowohl der deutsche als auch der globale Strommix sind stark durch die Verwendung fossiler Energieträger geprägt. Hieraus ergibt sich deren anteilige Dominanz am Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase (73 %).

Abbildung B-13: Rohstoffintensität (RMI) der Nutzungsphase nach Rohstoffgruppen zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ in Prozent*



* Die Abbildung zeigt gerundete Zahlen

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

B.3.1.4.2 Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Fußabdruck

Der kumulierte Energieaufwand (KEA, engl. *CED*) der Herstellungsphase des Videokonferenz-Systems wurde – analog zu den Berechnungen der Rohstoffintensitäten - mit rund 6.007 MJ bestimmt. Bezogen auf die Untersuchungseinheit einer einstündigen Videokonferenz ergibt sich für die Herstellungsphase ein Wert von 0,75 MJ/h. Für die Nutzungsphase wurde ein zusätzlicher KEA von 0,28 MJ/h berechnet. Insgesamt (Herstellungs- und Nutzungsphase) ergibt sich also für den Anwendungsfall ein gesamter kumulierte Energieaufwand von **1,03 MJ/h**.

Ähnliches gilt auch für den CO₂-Fußabdruck (als *Global Warming Potential GWP100*), bei dem die Herstellungsphase (402 kg CO₂-Äquivalente) nach der Allokation auf die Untersuchungseinheit mit 50 g CO₂-Äq. einen höheren Fußabdruck aufweist als die einstündige Nutzungsphase mit 20 g CO₂-Äq (gesamt also **70 g CO₂-Äq.**).

Der kumulierte Energieaufwand wie auch der CO₂-Fußabdruck sind damit maßgeblich durch die Herstellungsphase geprägt, welche bei beiden Indikatoren ein mehr als doppelt so hohes Ergebnis erzielt wie die Nutzungsphase. Beide Indikatoren weisen durch die Verwendung fossiler Energieträger und dadurch bedingter Treibhausgasemissionen im Allgemeinen eine hohe Korrelation auf (Valente *et al.*, 2018).

B.3.1.4.3 Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial

Auch für den Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial wurden analoge Berechnungen durchgeführt. Ähnlich wie bei den Ergebnissen für Rohstoffintensität und Energieaufwand zeigt sich bei der Analyse des Wasserfußabdrucks (WDP), dass der wichtigste Treiber die Herstellung der Endgeräte im Produktsystem ist. Kumuliert betrachtet sorgen die Endgeräte in Herstellungs- und Nutzungsphase für einen Wasserfußabdruck von **85 L**. Davon fallen 30 L pro Untersuchungseinheit auf den Stromverbrauch der Internetnutzung (über die Rechenzentren). Der Wasserfußabdruck der Herstellungsphase wird hierbei maßgeblich durch die Herstellung des Laptops beeinflusst, die für 57,4 % verantwortlich ist.

Beim Landnutzungspotenzial (LOP), das mit einem Gesamtwert von $44 \text{ cm}^2\text{a}$ oder **0,0044 m^2a** berechnet wurde, ist ebenso eine Dominanz der Herstellungsphase festzustellen. Während der Herstellungsphase dieser wird einer Videokonferenz pro Stunde eine Landnutzung von $37 \text{ cm}^2\text{a}$ zugeschrieben, und die Leistungsaufnahme der heimischen Endgeräte verursacht potenziell pro Stunde $5,7 \text{ cm}^2\text{a}$. Im Vergleich dazu entfallen lediglich $1,3 \text{ cm}^2\text{a}$ auf den Strombedarf der Internetverbindung.

Alle Berechnungen zur Fallstudie Videokonferenz werden in der folgenden Abbildung B-14 sowie Tabelle B-16 noch einmal zusammengefasst und (siehe folgendes Kapitel B.3.1.5).

B.3.1.4.4 Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial

Bevor im Kapitel B 9.5 die Fallstudie Videokonferenz zusammengefasst und ein Fazit gezogen wird, sei gemäß Projektauftrag (Leistungsbeschreibung) das Umweltentlastungspotenzial diskutiert.

In der gesichteten Literatur finden sich bereits verschiedene Angaben insbesondere zum Energiebedarf und den damit verbundenen Treibhausgasemissionen von Videokonferenzen. Beispielhaft seien an dieser Stelle bisherige Untersuchungen des Umweltbundesamts, von Ong *et al.* (2012), Obringer *et al.* (2021) Vandromme *et al.* (2014) und Kugler (o. D.) genannt. Jedoch ist bei Betrachtung der Untersuchungen zu erkennen, dass sowohl das Alter der einzelnen Studien als auch die darin verwendeten Annahmen, besonders die zum Strombedarf der Internetnutzung, deutlich divergieren. Zudem fällt auf, dass sich die Analyse der Umweltwirkungen in den betreffenden Studien meist auf einige wenige Indikatoren – hauptsächlich die mit dem Anwendungsfall einhergehenden Treibhausgasemissionen – fokussieren.

In der vorliegenden Fallstudie sollte daher die in diesem Vorhaben angewandte Methodik auf den digitalen Anwendungsfall Videokonferenz angewandt und die Ergebnisse mit denen anderer Studien verglichen werden. Gleichzeitig wurde in der Auswertung ein Fokus auf den gesamten Ressourcenbedarf gelegt und somit gegenüber CO₂-fokussierten Analysen ein wesentlicher Beitrag zur wissenschaftlichen Debatte ergänzt.

Mögliche Umweltauswirkungen bei der Nutzung von Videokonferenzen werden in der gesichteten Literatur vor allem im Zusammenhang mit dem Energieverbrauch der für Videokonferenzen notwendigen Geräte gesehen. Bestehende Studien zu diesem Thema (z. B. Bitkom, 2020; Büttner & Breitkreuz, 2020; O'Brien & Yazdani Aliabadi, 2020) befassen sich hauptsächlich mit der Frage, welche potenziellen Treibhausgasemissionen mit der Nutzung von Videokonferenzen assoziiert sind.

Im Gegenzug können Videokonferenzen dazu beitragen, Treibhausgasemissionen zu reduzieren, indem beispielsweise auf individuelle Reisen verzichtet wird. Dadurch lassen sich verkehrsbedingte Treibhausgasemissionen und andere schädliche Umweltauswirkungen

vollständig vermeiden. Je nach verwendetem Szenario werden dort enorme Einsparpotenziale von bis zu 18 % der Emissionen aus dem Pendelverkehr und 4 % der Gesamtemissionen des Personenverkehrs in Deutschland attestiert (Büttner & Breitzkreuz, 2020). Neben den eingesparten Pendelwegen können Videokonferenzen auch Dienstreisen ersetzen. Insgesamt wird geschätzt, dass durch mobiles Arbeiten 15 bis 17 % der Verkehrs- und Primärenergieemissionen im Jahr 2030 durch kollaborative Digitallösungen wie Videokonferenzen und *Cloud-Sharing*-Plattformen reduziert werden können (Lutter *et al.*, 2017).

Um aus den vorliegenden Erkenntnissen Schlüsse auf das Umweltentlastungspotenzial zu ziehen, bietet sich zunächst ein Vergleich unter Betrachtung des errechneten CO₂-Fußabdrucks an. Herstellungs- und Nutzungsphase dieser Betrachtung ergeben zusammen einen CO₂-Fußabdruck von **70 g CO₂-Äq.** pro Untersuchungseinheit (Teilnahme an einstündiger Videokonferenz).

Die durchschnittliche Pendelentfernung bei Arbeitspendelnden in Deutschland in den Jahren 1999 bis 2016 betrug 17 km (Statista, 2022f). Unter Einbezug einer Schätzung für den Treibhausgasausstoß von Personenkilometer mit einem Pkw von 143 g CO₂-Äq./km (Gröger *et al.*, 2021) auf dem Hin- und Rückweg ergibt sich ein CO₂-Fußabdruck von 4,86 kg CO₂-Äq. für den durchschnittlichen Pendelweg zur Arbeit in Deutschland. Verglichen mit dem errechneten CO₂-Fußabdruck von Videokonferenzen wäre hiermit selbst eine den gesamten Arbeitstag umfassende Teilnahme an Videokonferenzen, welche mit 560 g CO₂-Äq. zu bemessen wäre, um ein Vielfaches übertroffen. Wird von einer zweistündigen Teilnahme an Videokonferenzen ausgegangen, was als Wert für viele Bürotätigkeiten in heutiger Zeit durchaus vorstellbar ist, wäre bereits ab einem Pendelweg von 500 m einfacher Strecke der potenzielle Ausstoß an CO₂-Äq. höher als der CO₂-Fußabdruck der Videokonferenz.

Verglichen mit den Ergebnissen der Green Cloud Computing-Studie des Umweltbundesamtes (Gröger *et al.*, 2021), welche ein Streckenäquivalent von 0,26 Pkw-Personenkilometern für eine einstündige Videokonferenzteilnahme per Laptop und 1,38 Personenkilometer für die Teilnahme per großem Videomonitor, fügt sich das Ergebnis dieser Studie, welches ein gewichtetes Produktsystem mit mehreren Bestandteilen annimmt, mit 0,49 Pkw-Personenkilometern harmonisch ein. Andere Publikationen, wie beispielsweise Kugler (o. D.) mit vier Pkw-Personenkilometern als CO₂-Fußabdrucks-Äquivalent einer einstündigen Videokonferenzteilnahme, beschreiben für diesen Vergleich deutlich höhere Personenkilometerwerte. Dies ist dadurch zu erklären, dass die hier angeführten Berechnungen einem starken Einfluss durch die in der Studie getroffenen Annahmen bezüglich des genutzten Produktsystems und dem Stromverbrauch der Internetnutzung sowie des Telekommunikationsnetzes, unterliegen. Da die hier getroffenen Annahmen über die Stromverbräuche im Rechenzentrum und Telekommunikationsnetzwerk mit der Green Cloud Computing Publikation harmonisieren, stehen naturgemäß auch die Ergebnisse zum CO₂-Fußabdruck weitgehend im Einklang, auch wenn Unterschiede hinsichtlich der Endgeräte bestehen.

Bezüglich der anderen betrachteten Indikatoren ist im Rahmen dieses Vorhabens lediglich eine qualitative Schlussfolgerung bezüglich möglicher Umweltentlastungspotenziale zu leisten, da sowohl die Studien- und Datenlage im Vergleich zum CO₂-Fußabdruck deutlich schlechter ist und sich zudem die Definition eines sinnvollen Referenzszenarios schwierig gestaltet. Da der kumulierte Energieaufwand mit dem potenziellen CO₂-Ausstoß eines Prozesses korreliert, kann man in dieser Kategorie von einem ähnlichen Reduktionspotenzial wie beim Treibhausgasausstoß ausgehen.

Bezüglich der Ressourcenintensität ist zukünftig von einer stark steigenden Nachfrage nach besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffen auszugehen. Jedoch wird diese Nachfrage nicht

nur von klassischen digitalen Endgeräten, wie im hier betrachteten Produktsystems, sondern auch vom digitalen Wandel in der Mobilität getrieben, welcher mit einem erhöhten Bedarf an Batterietechnologien und Computerchips sowie digitaler Vernetzungskapazität einhergeht. Da der Anwendungsfall der Videokonferenz als Surrogat für ein gewisses Maß an Individualmobilität im Berufsalltag gesehen werden kann, ist es unsicher abzuschätzen, ob eine Ausweitung von Videokonferenzen zu einer intensivierten Nachfrage nach digitalisierungsrelevanten Rohstoffen führen wird, oder durch einen verringerten Bedarf an Mobilitätsangeboten (über-)kompensiert werden kann.

Für den Wasserfußabdruck konnten im Rahmen dieses Vorhabens keine offensichtlich entstehenden Umweltentlastungspotenziale identifiziert werden. Auch für den Indikator Landnutzungspotenzial ist kein direktes Umweltentlastungspotenzial ersichtlich. Als indirekter Effekt wäre in diesem Bereich theoretisch denkbar, dass die steigende Verbreitung von Videokonferenzen den Bedarf an (beruflichen) Pkw reduziert; wodurch sich damit einhergehende Ressourcenbedarfe inklusive weniger Flächenbedarf für Parkflächen verringern würden. Auf Basis der hier betrachteten Fallstudie kann jedoch keine abschließende Aussage erfolgen und es wäre genauer zu beleuchten, welche systemischen Effekte sich durch verstärktes Homeoffice und Videokonferenzen als Ersatz zum täglichen Pendeln oder zu Dienstreisen ergeben und mit welchen indirekten Umweltentlastungspotenzialen diese einhergehen.

B.3.1.5 Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie

Da die betrachteten Indikatoren in unterschiedlichen Einheiten bemessen werden und teilweise verschiedene Schutzbereiche betreffen, ist ein direkter Vergleich zwischen den Kategorien nur über Umwege wie den einer Normalisierung möglich, was den Fokus weg von Ressourcenintensität auf Sachbilanzebene hin zu einem vergleichenden Index zwischen LCA-Wirkungskategorien verschieben würde.

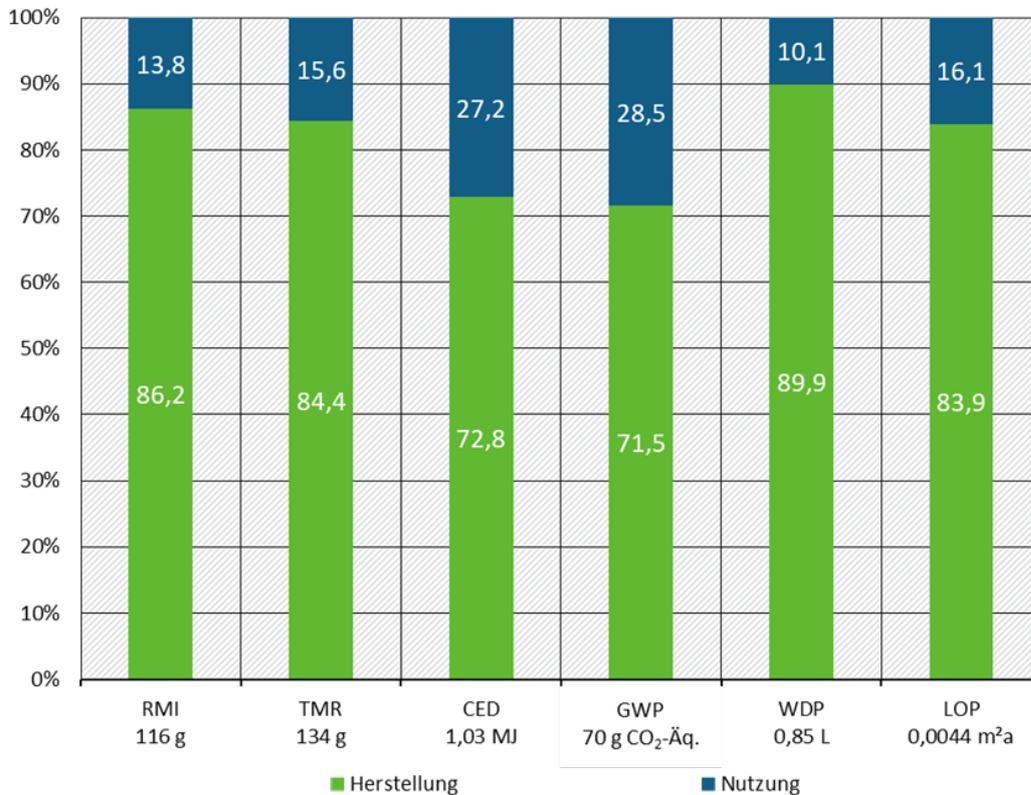
Abbildung B-14 konzentriert sich daher vergleichend für alle in diesem Forschungsvorhaben betrachteten Indikatoren auf die Aufteilung der berechneten Ressourcenintensitäten und Wirkkategorien nach Lebenszyklusphasen und nennt nochmal die finalen Endwerte der durchgeführten Berechnungen für die Fallstudie Videokonferenz.

Es ist deutlich zu erkennen, dass über alle Indikatoren hinweg die **Herstellungsphase dominant** ist. Im Falle der Rohstoffindikatoren RMI (Primärrohstoffeinsatz) und TMR (Gesamtprimärmaterialaufwand) macht die Herstellungsphase 86 % bzw. 84 % aus.

Die Indikatoren CO₂-Fußabdruck und kumulierter Energieaufwand weisen im Vergleich eine etwas höhere Signifikanz der Nutzungsphase gegenüber der Herstellungsphase auf.

Bei den Indikatoren WDP (Wasserfußabdruck) und LOP (Landnutzungspotenzial) dominiert die Herstellungsphase noch etwas mehr als bei den beiden Rohstoffindikatoren.

Abbildung B-14: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-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 = CO₂-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

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

Tabelle B-16: Zusammenfassung der berechneten Ressourcenindikatoren und des CO₂-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase – Tabelle zu Abbildung B-14

Indikatoren	Herstellung	Nutzung
RMI (in g)	100 (86,16%)	16 (13,84%)
TMR (in g)	113 (84,37%)	21 (15,63%)
CED (in MJ)	0,75 (72,84%)	0,28 (27,16%)
GWP (in g CO ₂ -Äq.)	50 (71,52%)	20 (28,48%)
WDP (in L)	0,76 (89,94%)	0,09 (10,06%)
LOP (in m ² a)	0,0037 (83,91%)	0,0007 (16,09%)

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

Information- und Telekommunikationstechnologien haben bereits heute die Arbeits- und Forschungswelt, aber auch den privaten Bereich, stark verändert und ermöglichen mittels Videokonferenzen oder webbasierten Arbeitsplattformen interkontinentale Kooperationen

sowie die Etablierung globaler Communities, unabhängig vom Standort der Personen (Cuhls *et al.*, 2009).

Die Fallstudie beschäftigt sich mit der Frage, mit welcher Ressourcenintensität und ausgewählten anderen Umweltwirkungen diese Form des digitalen Wandels in unserer Gesellschaft einhergeht. Sie betrachtet vor diesem Hintergrund eine einstündige Videokonferenz inklusive der dafür benötigten IKT-Endgeräte, ihrer Herstellung und Energiebedarfe bei der Datenbereitstellung und -übertragung. Der Fokus der Auswertung liegt dabei auf den verwendeten Rohstoffen, wobei die Betrachtung zwischen mengenmäßig relevanten und im Verhältnis zur Verfügbarkeit digitalisierungsrelevanten Rohstoffen unterscheidet. Hierbei wird, wie bereits in anderen Publikationen (Kamiya, 2020; Gröger *et al.*, 2021) ersichtlich, dass der Großteil der Ressourcenintensität auf die Herstellungsphase der Endgeräte beim Anwendenden entfällt. Im Vergleich der einzelnen Rohstoffe ergibt sich kein einheitliches Bild, da der Bedarf an bestimmten Rohstoffen wie beispielsweise Lithium durch eine Komponente des Betrachtungssystems (in diesem Fall der Laptop) dominiert wird. Die Ergebnissensitivität bezüglich der Herstellung der Rechenzentren wurde über eine Abschätzung mittels ADP und GWP auf Basis der Daten aus Gröger *et al.* (2021) durchgeführt. Auch wenn Rechenzentren einen relevanten Ressourcenfußabdruck aufweisen, ist dieser im Kontext der hier betrachteten Anwendung sehr gering (0,5 bzw. 0,7 % bezogen auf die gesamte Herstellungsphase).

Zur Einordnung der Ergebnisse im Kontext der Fallstudie ist besonders die Datenlage in Bezug auf den Energiebedarf der Internetnutzung zu erwähnen. Hierbei unterscheiden sich die in der Literatur verfügbare Informationen nicht nur aufgrund ihres Alters stark (Umweltbundesamt, 2018, Gröger *et al.*, 2021; Ong *et al.*, 2012; Obringer *et al.*, 2021; Vandromme *et al.*, 2014; Kugler, o. D.). Es finden sich zudem verschiedene Ansätze zur Ermittlung des „Strombedarfs des Internets“. Insgesamt vermittelt der Stand der Literatur den Eindruck, dass hier weiterer Forschungsbedarf besteht und es wesentlich ist, aktuelle Daten als Berechnungsgrundlage zu verwenden (siehe auch Kapitel zur Ressourcen- und Energieintensität von Rechenzentren und Datenübertragung). Auch wenn die Ressourcenintensität der Nutzungsphase im Rahmen dieser Fallstudie eine untergeordnete Rolle im Vergleich zur Herstellungsphase spielt, ist es im Kontext steigender Datenübertragungsmengen wesentlich, ein genaueres Bild des Energiebedarfs im Bereich der Datenübertragung und -verarbeitung zu gewinnen.

Die Fallstudie zeigt weiterhin, wie wesentlich eine ressourcenschonende Herstellung der IKT-Endgeräte ist und welche Rolle im Umkehrschluss dem Thema Kreislaufwirtschaft, insbesondere Lebensdauer der Geräte, Reparatur, Wiederverwendung und Recycling der Materialien, zukommt – besonders vor dem Hintergrund einer fortschreitenden Digitalisierung der Arbeitswelt. Zukünftig ist zu erwarten, dass es keine Frage von Homeoffice oder Präsenzarbeit ist, sondern sich vielmehr neue hybride Formen der Zusammenarbeit ergeben werden, die sich aus Homeoffice, mobilem Arbeiten und Videokonferenzen zusammensetzen. Dennoch werden auch weiterhin persönliche Treffen, Workshops und Dialoge, insbesondere für kreative Prozesse, notwendig sein (Rief, 2021).

B.3.2 Fallstudie Smart-Home-System

B.3.2.1 Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung

Im Jahr 2018 fielen etwa 25 % des Energiebedarfs der Europäischen Union in Privathaushalten an, wovon wiederum zwei Drittel Heizzwecken zuzuschreiben sind (Pohl *et al.*, 2021). Smart-Homes und deren potenzielle energetischen Vorzüge gegenüber Haushalten ohne sensorüberwachtes und vernetztes Energiemanagement sind daher ein oft angeführtes Beispiel

für das Ressourceneinsparungspotenzial der Digitalisierung. Smart-Homes können in diesem Zusammenhang als „Häuser, in denen ein Kommunikationsnetz Sensoren, Geräte, Steuerungen und andere Vorrichtungen miteinander verbindet, um eine Fernüberwachung und -steuerung durch die Bewohner und andere Personen zu ermöglichen“ definiert werden (Pohl *et al.*, 2021).

Smart-Homes ermöglichen eine effizientere und nutzeroptimierte Steuerung der Haushaltsgeräte und Haustechnik. Ein smartes Energiemanagementsystem regelt beispielsweise die Temperatur in Abhängigkeit davon, ob gelüftet wird, ob Personen anwesend sind oder unter Berücksichtigung der aktuellen Wettervorhersage. Rollläden und Markisen können automatisch bei starker Sonneneinstrahlung heruntergefahren werden. Eine kürzlich veröffentlichte Studie, die sich mit den Klimaeffekten der Digitalisierung beschäftigt, kommt zu dem Schluss, dass 2030 8 - 9 % der Primärenergieemissionen durch intelligente Energiemanagementtechnologien vermieden werden können (Bitkom, 2020).

Laut einer Bitkom-Studie vom September 2022 nutzen bereits rund 25 % der Bundesbürger*innen smarte Heizkörperthermostate. Im Vergleich dazu waren es 2021 erst 17 % und 2020 15 %. Ein Fünftel der Bevölkerung nutzt smarte WLAN-Steckdosen, um den Energieverbrauch zu reduzieren und 13 % messen ihren Verbrauch über intelligente Zählsysteme. Insgesamt haben 43 % der deutschen Haushalte mindestens eine Smart-Home-Anwendung im Einsatz. 53 % der Nutzenden von smarten Thermostaten berichten über einen gesunkenen Energieverbrauch. Gleichzeitig fürchten rund die Hälfte der Personen ohne Smart-Home-Anwendungen Sicherheitslücken oder Hacker-Angriffe. Das Thema IT-Sicherheit und Datensicherheit spielt bei den meisten Smart-Home-Nutzenden eine bedeutende Rolle.

Smart-Home-Technologien entwickeln sich zurzeit mit rasanter Geschwindigkeit. Insgesamt stehen die Deutschen Smart-Home-Anwendungen und deren Entwicklungen sehr offen gegenüber. Rund 80 % der Befragten können sich vorstellen, in einem smarten Haus zu wohnen, welches erkennt, wann ein Wasserschaden droht und das Wasser automatisch abstellt oder bei Unfällen automatisch einen Notruf absetzt. Zukünftig werden immer mehr Smart-Home-Anwendungen in Haushalten zu finden sein. Neben den Annehmlichkeiten und erhöhter Sicherheit sollen Smart-Home-Systeme auch für eine deutliche Senkung des Energieverbrauches sorgen, besonders im Bereich der Wärme- und Warmwassererzeugung (Bitkom, 2022).

B.3.2.2 Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie

Im Folgenden wird beschrieben, was eine „typische“ Smart-Home-Ausstattung umfasst, um anschließend die Ressourcenintensität zu bewerten. Über die Betrachtung der Ressourcenintensität eines Smart-Homes hinaus wird in dieser Fallstudie auch ermittelt, nach welchem Zeitraum sich der zusätzliche Herstellungsaufwand für Smart-Home-Einrichtungen amortisieren kann, beziehungsweise nach welchem Zeitraum die hierfür emittierten Treibhausgase kompensiert sein könnten.

Grundlage für die Berechnung der Ressourcen- und Umweltimplikationen ist ein Einfamilienhaus mit 100 m² Wohnfläche. Der jährliche Strombedarf soll 4.000 kWh pro Jahr betragen, die benötigte Wärmeenergie 36.000 MJ pro Jahr.

Die Lebenszyklusbetrachtung umfasst die Rohstoffentnahme, Produktion der Komponenten, und die Nutzungsphase nach Einbau über den Zeitraum von 5 Jahren, bis die ersten Komponenten nicht mehr funktionsfähig sind beziehungsweise ersetzt werden müssen. Die Entsorgung und gegebenenfalls die Neuanschaffung einzelner zu ersetzender Komponenten sowie der Einbau des Smart-Home-Systems und die anfallenden Transporte in den einzelnen Lebenszyklusphasen finden keine Berücksichtigung in der Lebenszyklusbetrachtung. Grund hierfür ist die angenommene dominante Ressourcen- und Umweltrelevanz der

Rohstoffentnahme, Produktion und Nutzungsphase gegenüber der Entsorgung (Louis *et al.*, 2015).

B.3.2.3 Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie

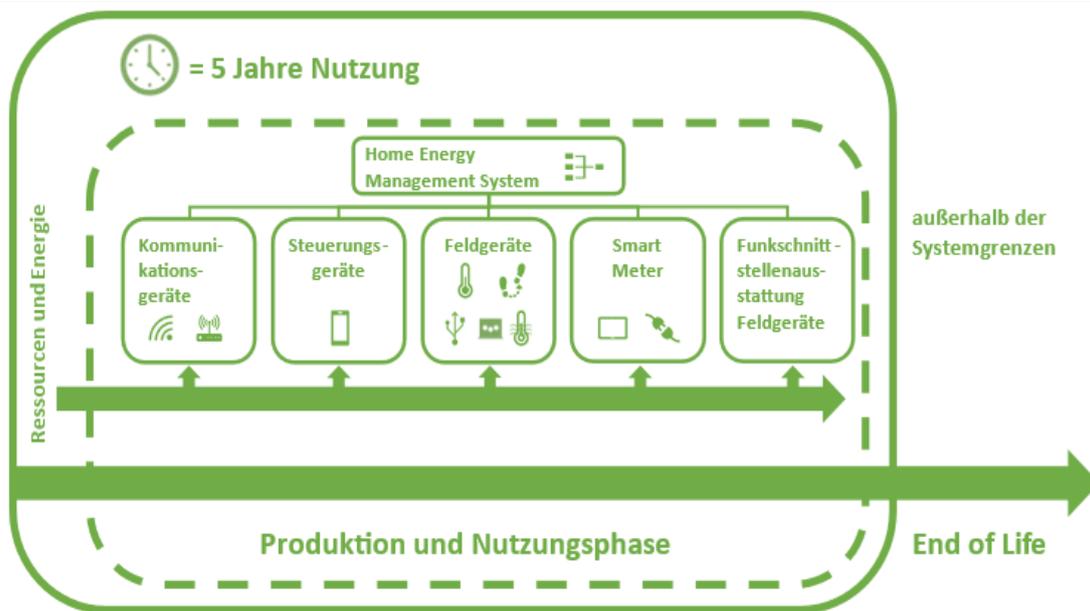
Für den Anwendungsfall des Smart-Home-Systems wurde folgende Untersuchungseinheit gewählt:

Herstellung und 5-jährige Nutzung eines Smart-Home-Systems für ein Einfamilienhaus mit einem jährlichen Strombedarf von 4.000 kWh und einem jährlichen Heizbedarf von 36.000 MJ

Im späteren Verlauf ist mit dem Begriff Basisszenario Grid die hier definierte Untersuchungseinheit unter Berücksichtigung des deutschen Strommixes gemeint.

Abbildung B-15 skizziert den betrachteten Untersuchungsrahmen. Im Folgenden wird genauer beschrieben, welche Komponenten und Rahmenbedingungen für die Fallstudie berücksichtigt wurden.

Abbildung B-15: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“*



*Annahme in der Berechnung: Zehnminütige Nutzung des Smartphones für die Steuerung der Smart-Home-Anwendung pro Tag.

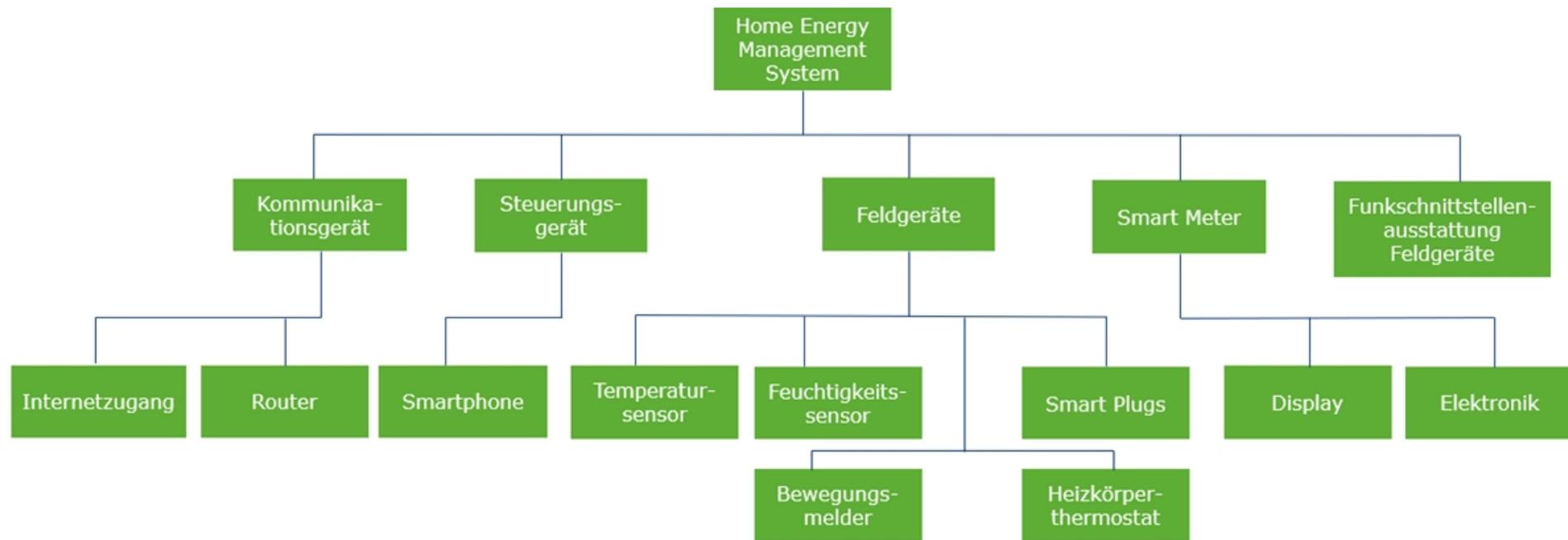
Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

B.3.2.3.1 Komponenten und betrachtetes Smart-Home-System

Die Berechnungen zur Rohstoffintensität und weiterer Indikatoren basiert auf einem Beispieleinfamilienhaus, das mit entsprechenden Komponenten ausgestattet wird, um die Kommunikation einzelner Geräte über eine zentrale Steuereinheit miteinander zu vernetzen. Dieses so genannte Smart-Home-System besteht somit aus dem Zusammenspiel von mehreren digitalen und analogen Komponenten.

Abbildung B-16 zeigt den generellen Zusammenhang der einzelnen Komponenten, aus denen sich das zu bilanzierende Smart-Home-System aufbaut.

Abbildung B-16: Komponenten des Smart-Home-Systems für die Fallstudie „Fünffährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, basierend auf Louis *et al.* (2015)

Die jeweilige Material- und Produktzusammensetzung der in Abbildung B-16 angeführten Komponenten wird in Tabelle B-17 detailliert dargestellt. Diese Mengenangaben bilden die Basis für die Abschätzung der Ressourcenintensität sowie weiterer Umweltwirkungen.

Tabelle B-17: Material- und Produktzusammensetzung der Smart-Home-Komponenten für die Fallstudie „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“

Geräte	Komponente	Quelle
Smart Meter		
Elektronik	Kupfer 14,3 g Aluminium 14,3 g Kabel 5 g Leiterplatte 75 cm ²	(Louis <i>et al.</i> , 2015)
Display	(1 Zoll) 0.059 p	(Louis <i>et al.</i> , 2015)
Feldgerät		
Temperatursensor	PVC 100 g Aluminium 17,82 g Leiterplatte 30 cm ²	(Louis <i>et al.</i> , 2015)
Smart plugs (15 Stück)	38,25 g Messing 1.500 g PVC Diode 15 g RFID chip 15 g Leiterplatte 450 cm ²	(Louis <i>et al.</i> , 2015)
Feuchtigkeitssensor	PVC 100 g Aluminium 17,82 g Leiterplatte 30 cm ²	Von Temperatursensor übernommen
Bewegungsmelder	PVC 100 g Aluminium 17,82 g Leiterplatte 30 cm ²	Von Temperatursensor übernommen
Heizkörperthermostate (8 Stück)	Unabhängig von Smart-Home, Ressourcen fließen nicht in Betrachtung ein	
Zusatzausstattung Feldgeräte		
Temperatursensor	RFID chip 1 g Mikrocontroller 1 g Kabel 5 g	(Gröger, 2020)
Feuchtigkeitssensor	RFID chip 1 g Mikrocontroller 1 g Kabel 5 g	(Gröger, 2020)
Bewegungsmelder	RFID chip 1 g Mikrocontroller 1 g Kabel 5 g	(Gröger, 2020)

Geräte	Komponente	Quelle
Heizkörperthermostate (8 Stück)	Display (1 Zoll/Stück) 0,059 p/Stück Leiterplatte 30 cm ² /Stück RFID chip 1 g/Stück Mikrocontroller 1 g/Stück	(Gröger, 2020)

Kommunikationsgerät

Internetzugang	1 p	(Louis <i>et al.</i> , 2015)
Router	1 p	(Louis <i>et al.</i> , 2015)

Steuerungsgerät

Smartphone	0,043 p	(Statista, 2022e)
------------	---------	-------------------

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

B.3.2.4 Rahmenbedingungen der Nutzungsphase

Das Smartphone, welches als Steuerungsgerät fungiert, wird mit einer 10-minütigen Nutzung für die Steuerung der Smart-Home-Anwendungen pro Tag angenommen. Insgesamt wird ein Smartphone in Deutschland rund 230 min täglich genutzt (Statista, 2022d). Die 5-jährige Nutzungsdauer des Smartphones orientiert sich am Gesamtbetrachtungszeitrahmen der Untersuchungseinheit, welche wiederum auf einer Studie zu potenziellen positiven Umweltwirkungen durch den Einsatz von Smart-Home-Systemen fußt (Pohl *et al.*, 2021). Vernetzte Komponenten sind jederzeit erreichbar und benötigen durchgängig Strom. Die jeweils angenommenen Leistungsaufnahmen der Komponenten für die Betrachtung der Nutzungsphase sind in Tabelle B-18 dargestellt.

Tabelle B-18: Leistungsaufnahmen der Smart-Home-Komponenten für die Fallstudie „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“

Komponente	Leistungsaufnahme	Quelle
Kommunikationsgerät	4,2 W	(Louis <i>et al.</i> , 2015)
Smartphone	0,086 Wh/Tag	3227 mAh (12,41 Wh) Akkukapazität (iPhone 13), 1x täglich laden (Hristov, 2022)
Smart Plug	4 W/Stück	(Louis <i>et al.</i> , 2015)
Smart Meter	20 W	(Louis <i>et al.</i> , 2015)

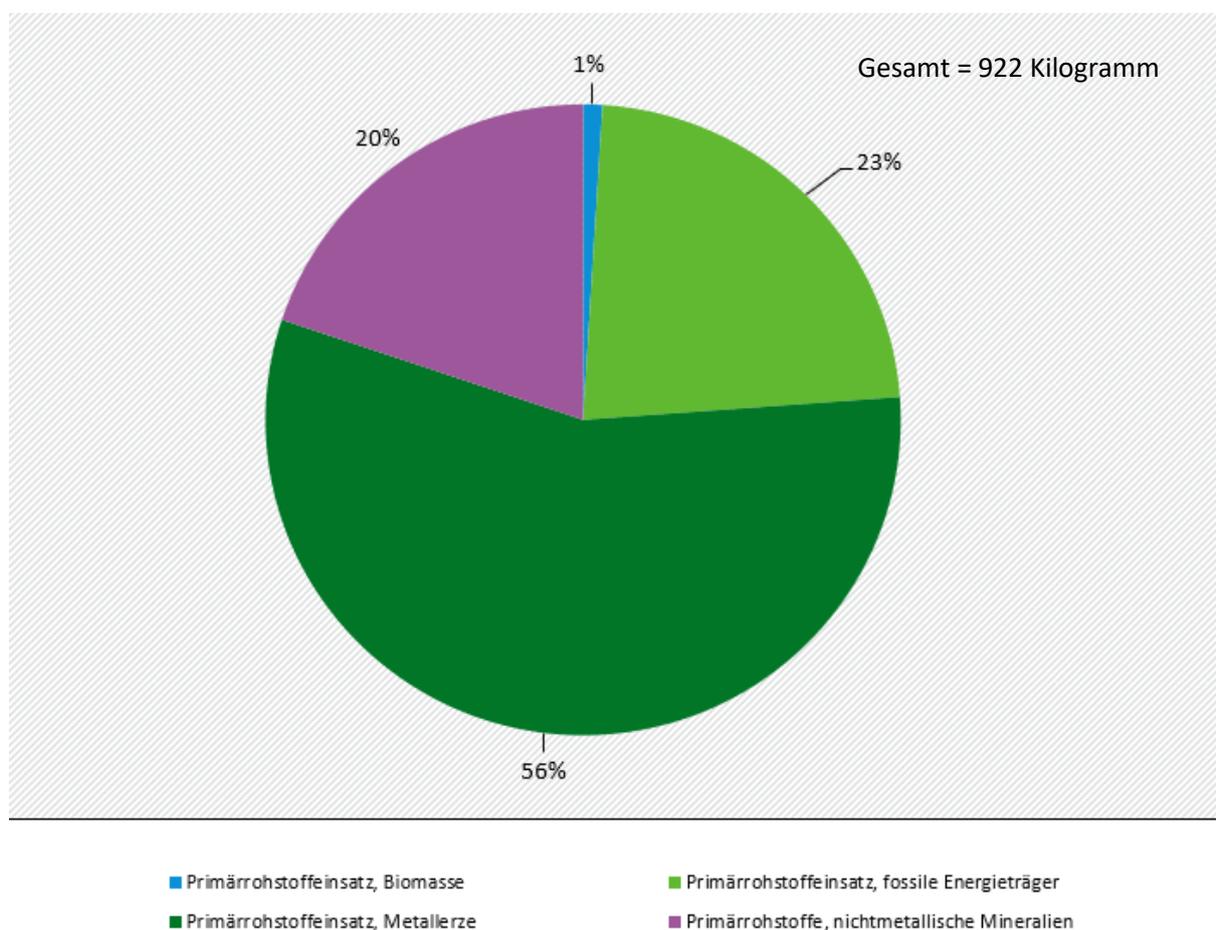
B.3.2.5 Ergebnisse zur Ressourcenintensität

B.3.2.5.1 Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme

B.3.2.5.1.1 Herstellungsphase

Für die Herstellung des zuvor beschriebenen Smart-Home-Systems wurde ein **Primärrohstoffeinsatz (RMI) von 922 kg** berechnet. Der durch die Modellierung errechnete **Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR) beträgt 1.035,7 kg**. Abbildung B-17 zeigt die Anteile des RMI nach Rohstoffgruppen.

Abbildung B-17: Anteile der Rohstoffgruppen am Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellung eines Smart-Home-Systems zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in Prozent*



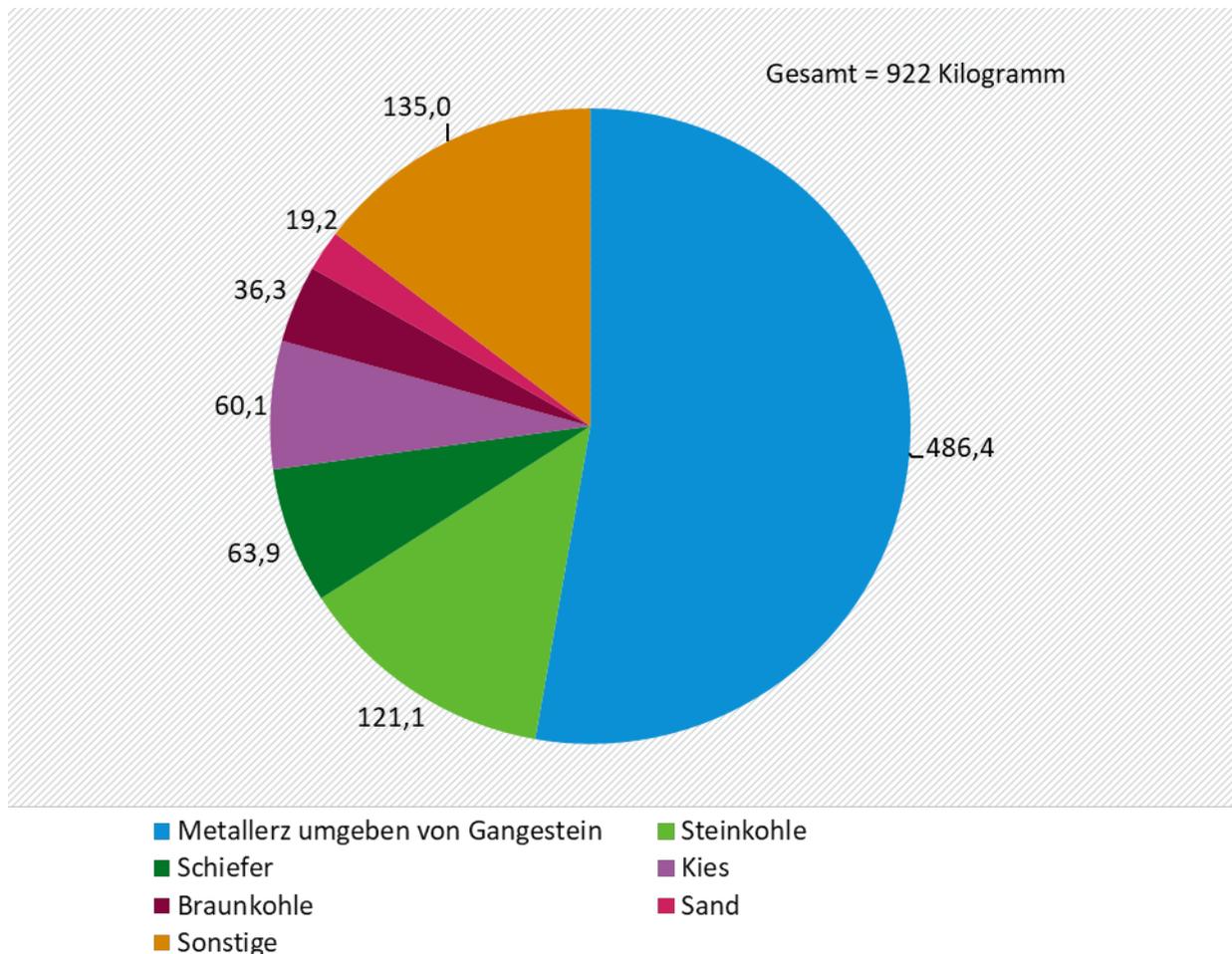
* Die Abbildung zeigt gerundete Zahlen

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 B-18) des gesamten Primärrohstoffbedarfs fossile und mineralische Rohstoffe. Die Rohstoffintensität der Herstellungsphase (Abbildung B-18) ist rein massentechnisch betrachtet durch die Entnahme von Ganggestein geprägt. Diese beträgt das Vierfache im Vergleich zum mengenmäßig nächstwichtigen Rohstoff, nämlich der Steinkohle. 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.

Abbildung B-18: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Fünfjährige 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.

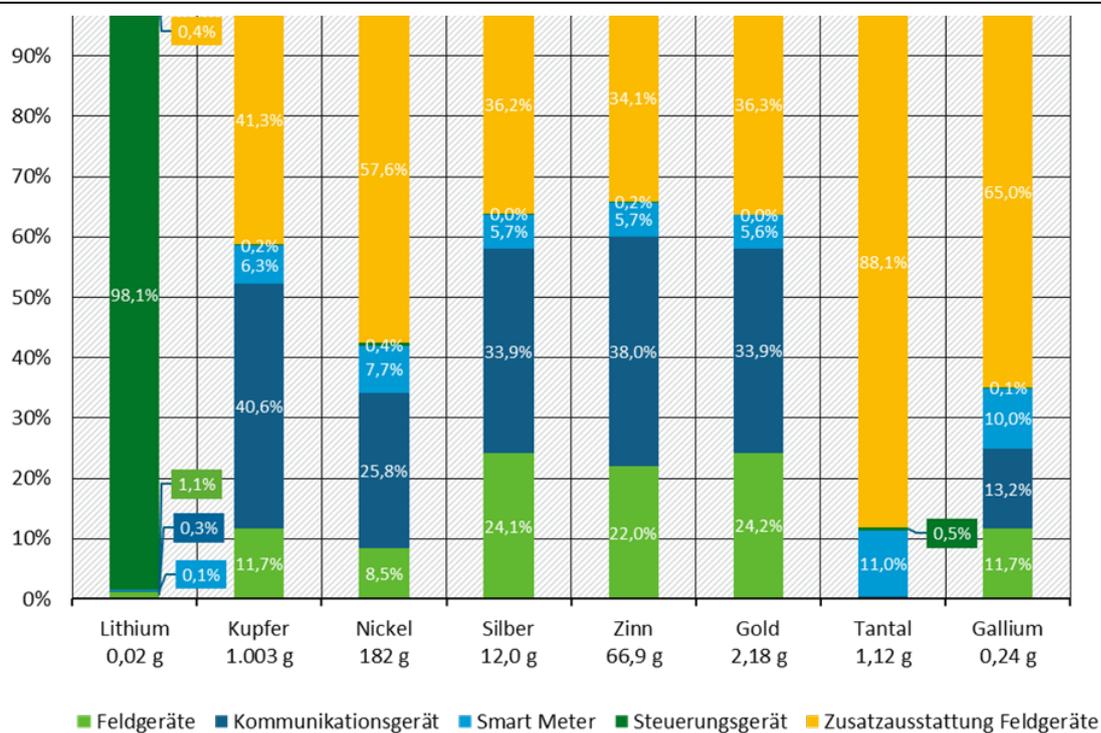
Daneben wurden für das Smart-Home-System auch ausgewählte digitalisierungsrelevante Rohstoffe untersucht. Dabei fällt auf, dass Lithium nahezu vollständig im Steuerungsgerät genutzt wird. Da das Smart-Home-System über das Smartphone gesteuert wird, kann der Lithiumbedarf auf den Akku des Smartphones zurückgeführt werden. Neben Lithium weist Tantal ebenfalls eine sehr einseitige Verteilung auf. Nahezu 90 % stammen aus der Zusatzausstattung der Feldgeräte. Tantal ist ein wichtiger Bestandteil von Kondensatoren, die in diesem Fall für die Funkschnittstelle der Smart-Home-Komponenten mit dem Steuerungsgerät notwendig sind.

2009 hat die Europäische Union das Ziel eines flächendeckenden Einsatzes von Smart Metern erklärt, welches bis zum Jahr 2020 80 % aller Verbraucher*innen erfüllt haben sollen. Dies gilt jedoch lediglich für Haushalte mit einem Strombedarf von mehr als 6.000 kWh (Gähns *et al.*, 2021). Ein durchschnittlicher Zweipersonenhaushalt benötigt etwa 2.500 kWh und liegt somit deutlich unterhalb dieses Grenzwertes. Angenommen jeder Haushalt in Deutschland verfügt

langfristig über ein Smart-Home-System zum besseren Energiemonitoring, entspräche dies einem Bedarf von rund 41.000.000 Smart-Home-Systemen (BiB, 2022).

Bezogen auf die Entnahmemenge besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe (**Gesamtmenge: 1.267,46 g**) nimmt Kupfer die wichtigste Rolle ein. Zur Herstellung des hier skizzierten Smart-Home-Systems wurde umgerechnet rund 1 kg Kupfer benötigt. Bezogen auf die jährliche Gesamtentnahme von Kupfer macht dies lediglich 0,000000021 % aus bzw. auf alle deutschen Haushalte hochskaliert 0,09 %. Unter den digitalisierungsrelevanten Ressourcen ist der Bedarf für das Smart-Home-System im Verhältnis zur jährlichen Gesamtentnahme der Rohstoffe für Gold am kritischsten. Würden innerhalb eines Jahres alle deutschen Haushalte ein Smart-Home-System installieren wollen, würden 2,98 % der jährlichen Goldentnahmemengen hierfür notwendig sein. Im Vergleich dazu wären für Lithium lediglich 0,0007 % der jährlichen Gesamtentnahme zur Deckung aller deutschen Haushalte notwendig. Daher lässt sich bezüglich der Menge und aufgrund der Tatsache, dass die meisten Menschen bereits Smartphones besitzen, kein kritischer Bedarf an Lithium ableiten.

Abbildung B-19: 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.

Tabelle B-19: Anteile ausgewählter digitalisierungsrelevanter Rohstoffe zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünffährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in Gramm nach Geräten – Tabelle zu Abbildung 19

Rohstoffe	Gerät	[g]
Lithium	Feldgeräte	0,000175
Lithium	Kommunikationsgerät	0,000047
Lithium	Smart Meter	0,000010
Lithium	Steuerungsgerät	0,015775
Lithium	Zusatzausstattung Feldgeräte	0,000066
Kupfer	Feldgeräte	117,094363
Kupfer	Kommunikationsgerät	407,025614
Kupfer	Smart Meter	62,914400
Kupfer	Steuerungsgerät	1,909437
Kupfer	Zusatzausstattung Feldgeräte	413,720776
Nickel	Feldgeräte	15,417197
Nickel	Kommunikationsgerät	46,911271
Nickel	Smart Meter	14,096265
Nickel	Steuerungsgerät	0,783781
Nickel	Zusatzausstattung Feldgeräte	104,919129
Silber	Feldgeräte	2,898026
Silber	Kommunikationsgerät	4,078378
Silber	Smart Meter	0,683460
Silber	Steuerungsgerät	0,005300
Silber	Zusatzausstattung Feldgeräte	4,353771
Zinn	Feldgeräte	14,691942
Zinn	Kommunikationsgerät	25,422588
Zinn	Smart Meter	3,831726
Zinn	Steuerungsgerät	0,136679
Zinn	Zusatzausstattung Feldgeräte	22,792057
Gold	Feldgeräte	0,528775
Gold	Kommunikationsgerät	0,739213
Gold	Smart Meter	0,123052
Gold	Steuerungsgerät	0,000624
Gold	Zusatzausstattung Feldgeräte	0,791471
Tantal	Feldgeräte	0,002003

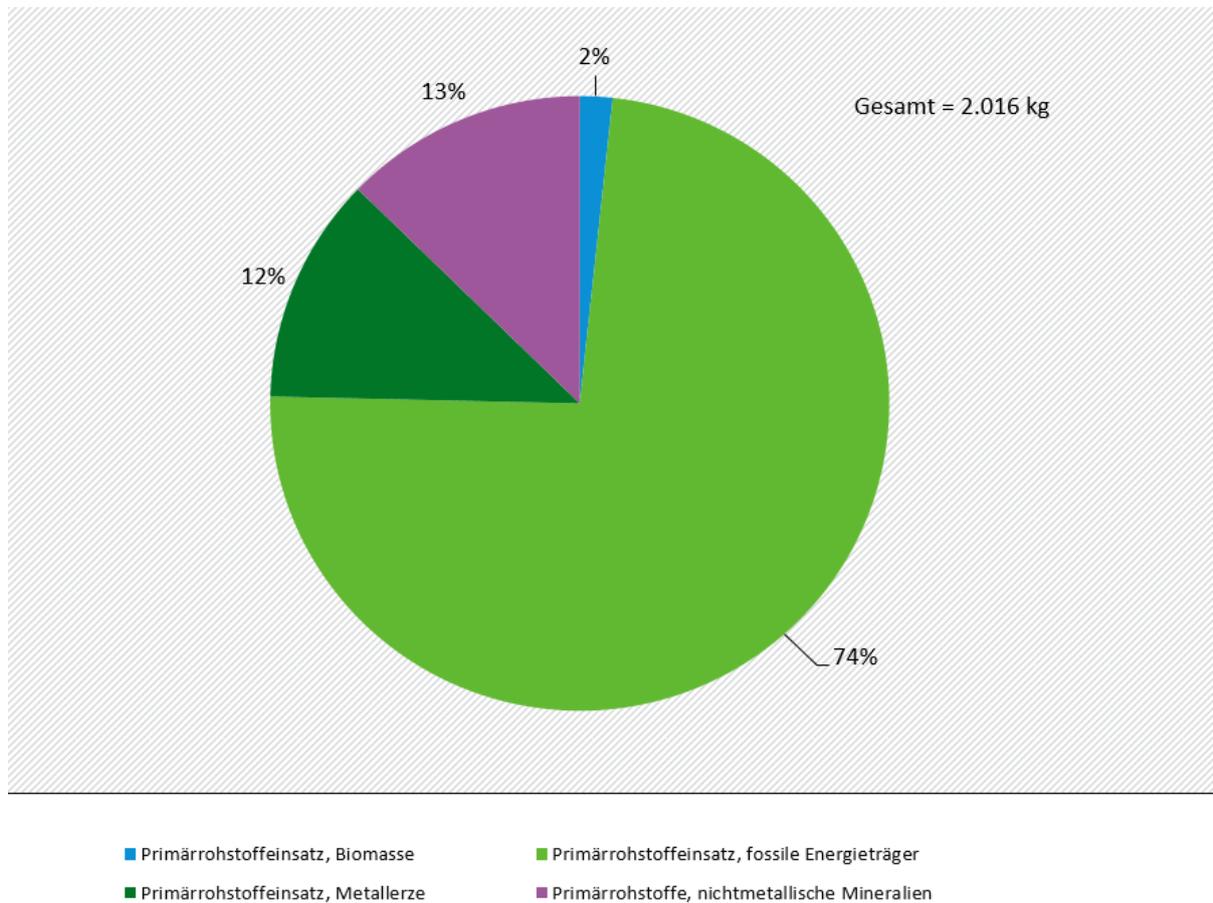
Rohstoffe	Gerät	[g]
Tantal	Kommunikationsgerät	0,001941
Tantal	Smart Meter	0,122945
Tantal	Steuerungsgerät	0,005523
Tantal	Zusatzausstattung Feldgeräte	0,982913
Gallium	Feldgeräte	0,027937
Gallium	Kommunikationsgerät	0,031670
Gallium	Smart Meter	0,024030
Gallium	Steuerungsgerät	0,000293
Gallium	Zusatzausstattung Feldgeräte	0,155849

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

B.3.2.5.1.2 Nutzungsphase

Für die Nutzungsphase des Smart-Home-Systems wurde ein **Primärrohstoffeinsatz von 2.016 kg** (Basisszenario Grid) berechnet, welcher durch den Stromverbrauch der Endgeräte bedingt wird. Der durch die Modellierung errechnete **Gesamtprimärmaterialaufwand** beläuft sich auf **2.663,1 kg** (Basisszenario Grid). Die Herstellung der Komponenten macht demnach circa ein Drittel und die Nutzung zwei Drittel des Rohstoffbedarfs aus. Abbildung B-20 zeigt die Anteile der verschiedenen Rohstoffgruppen am Gesamtbedarf der Nutzungsphase. Während die Anteile des Primärrohstoffeinsatzes der Herstellung vorrangig aus Metallerzen stammen, ist die Nutzungsphase vorrangig (74 %) vom Bedarf an fossilen Energieträgern geprägt. Massenmäßig an erster Stelle liegt Braunkohle, diese macht mehr als das Dreifache gegenüber dem nächstwichtigsten Primärrohstoff Steinkohle aus. Hierin zeigt sich die weiterhin wichtige Rolle der Braunkohle im deutschen Strommix. Ein Rückgang dieses Primärrohstoffeinsatzes ist aufgrund der Energiewende zukünftig zu erwarten.

Abbildung B-20: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase des Smart-Home-Systems zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfstufige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ nach Rohstoffgruppen in Prozent



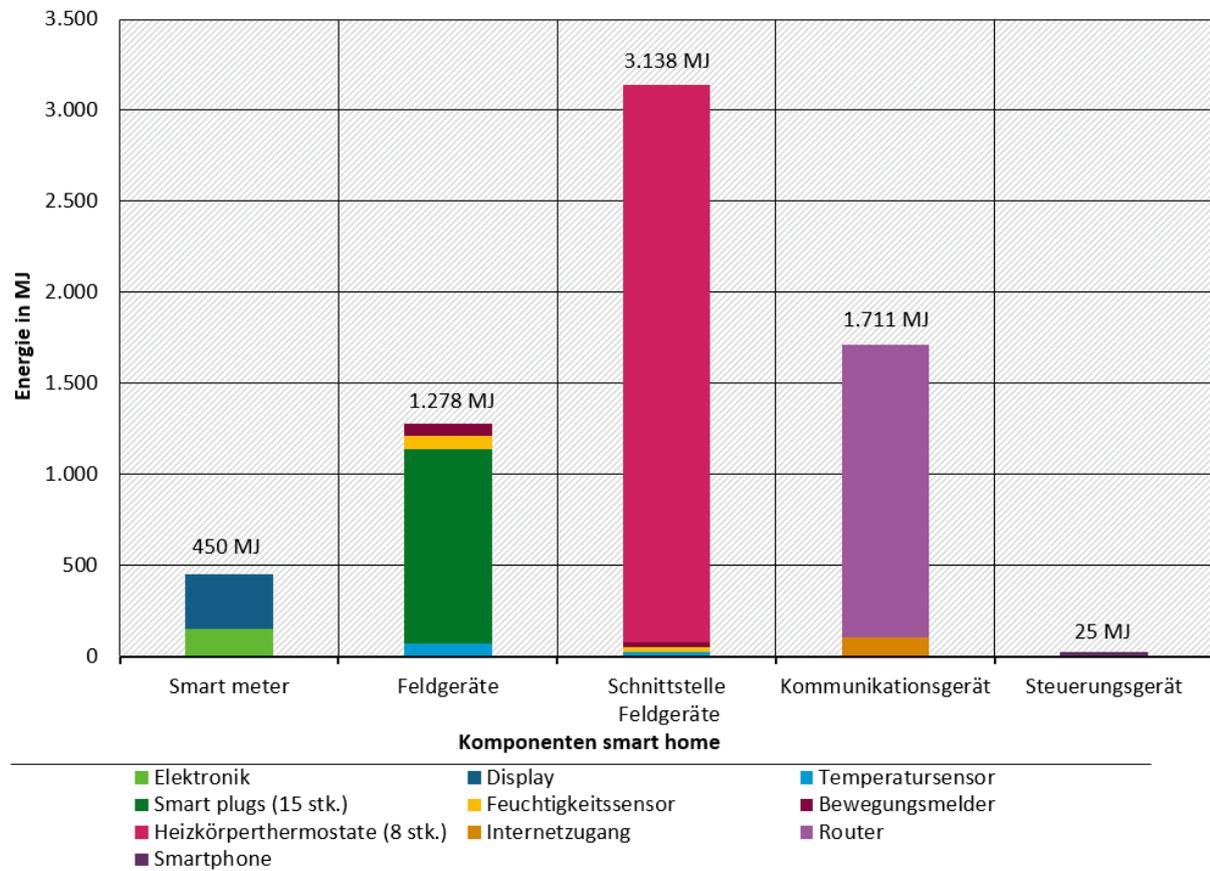
Quelle: Eigene Berechnungen (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

B.3.2.5.2 Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Fußabdruck

Smart-Home-Systeme haben neben der Steigerung des Komforts den Anspruch den Energiebedarf eines Gebäudes zu senken. Für die Bewertung des Einspareffektes muss der Energieaufwand für die Bereitstellung der Technologie ermittelt werden; sowohl für die Produktion als auch die Dauer der Nutzung des Systems. Liegt der Energieaufwand in Summe unter dem Energiebedarf des Gebäudes ohne Smart-Home-System, wurde eine Energieeinsparung erzielt. Basierend auf (Louis *et al.*, 2015) machen die Produktion und die Nutzung etwa 99 % der verursachten Emissionen des Smart-Home-Systems aus, weshalb die Betrachtung des Break-even-points ein *End-of-life* Szenario ausklammert.

Der Kumulierte Energieaufwand (KEA) dient zur Bemessung des energetischen Aufwands über den Lebenszyklus eines Produkts. Der kumulierte Energieaufwand in der Herstellungsphase für das betrachtete Smart-Home-System wurde mit 6.602 MJ berechnet. Die einzelnen Beiträge zum kumulierten Energieaufwand werden pro Komponente in Abbildung B-21 dargestellt. Die Produktion der Komponenten macht demnach rund 18 % der jährlich benötigten **40.795 MJ**-Heizenergie für das beispielhafte Einfamilienhaus aus; bezogen auf den Energiebedarf im fünfjährigen Betrachtungszeitraum sind es knapp 4 %.

Abbildung B-21: Kumulierter Energieaufwand des Smart-Home-Systems zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfstufige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in der Herstellungsphase nach Komponenten in Megajoule



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

Tabelle B-20: Kumulierter Energieaufwand des Smart-Home-Systems zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in der Herstellungsphase nach Komponenten in Megajoule – Tabelle zu Abbildung B-21

Gerät	Komponenten	[MJ]
Smart meter	Elektronik	152,33
Smart meter	Display	297,77
Feldgeräte	Temperatursensor	68,87
Feldgeräte	Smart plugs (15 stk.)	1.071,42
Feldgeräte	Feuchtigkeitssensor	68,87
Feldgeräte	Bewegungsmelder	68,87
Schnittstelle Feldgeräte	Temperatursensor	25,59
Schnittstelle Feldgeräte	Feuchtigkeitssensor	25,59
Schnittstelle Feldgeräte	Bewegungsmelder	25,59
Schnittstelle Feldgeräte	Heizkörperthermostate (8 stk.)	3.061,21
Kommunikationsgerät	Internetzugang	101,82
Kommunikationsgerät	Router	1.608,72
Steuerungsgerät	Smartphone	25,26

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

B.3.2.5.2.1 Analyse verschiedener Szenarien im Hinblick auf den KEA

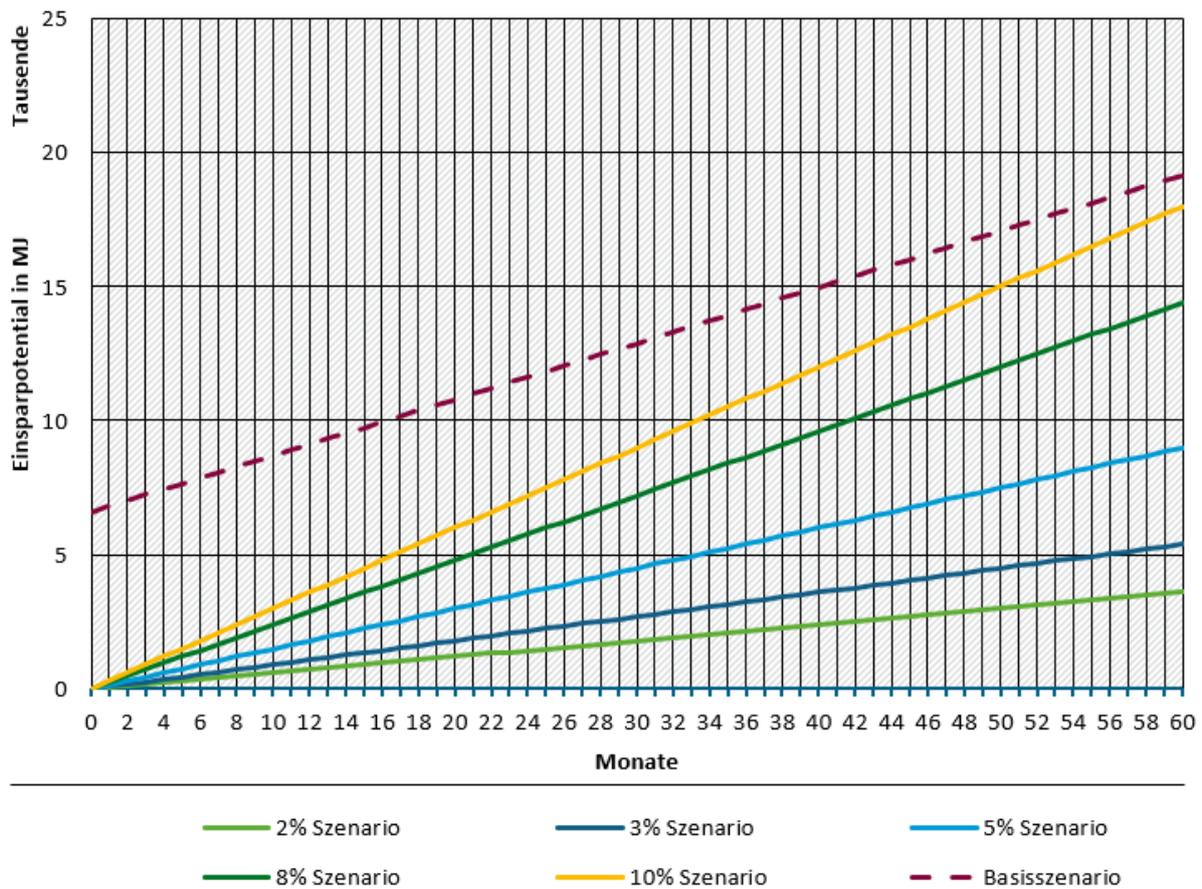
Der kumulierte Energieaufwand (KEA) der fünfjährigen Nutzungsphase für das betrachtete Smart-Home-System wurde mit **40.795 MJ** (Basisszenario Grid) berechnet. Um die erhofften energetischen Vorteile einer Smart-Home-Ausstattung bewerten zu können, wurden fünf Szenarien betrachtet, die sich in der Höhe der Energieeinsparung voneinander unterscheiden. Ein wesentlicher Einspareffekt lässt sich lediglich mit Blick auf gesparte Heizenergie feststellen, der Strombedarf reduziert sich durch Einsatz von Smart Metern um durchschnittlich 1 % (Gähns *et al.*, 2021). Eine stärkere Reduktion des Energiebedarfes ergibt sich durch das so genannte *Smart Heating*. Hierbei erfassen Sensoren die Raumtemperatur und steuern automatisch die Thermostate der Heizkörper. Für eine durchschnittliche Raumtemperatur von 20 – 21° Celsius reicht die Thermostatstufe 3 aus. Ein energetisch nachteiliges Nutzverhalten durch starkes Aufdrehen der Thermostate beispielsweise auf Stufe 5 und ein damit verbundener hoher Energieaufwand kann vermieden werden. Je konstanter die Raumtemperatur ist, desto weniger müssen die Heizkörper an Energie aufwenden, um die Raumtemperatur anzuheben. Durch *Smart Heating* wird diese ausbalancierte Moderation des Aufheizens erreicht.

Abbildung B-22 zeigt fünf verschiedene Szenarien, in denen durch das Smart-Home-System Energie eingespart werden kann. Diese Szenarien kreuzen je nach Höhe der Einsparung nach einem gewissen Zeitraum den Energieaufwand für die Produktion und Nutzung des Smart-Home-Systems, welches durch die gestrichelte Linie eingezeichnet ist. Ab diesem Zeitpunkt wird mehr Energie eingespart, als durch die Herstellung der Komponenten aufgewendet wurde.

Das 2 % Szenario geht von einer Energieeinsparnis von 2 % im Jahr aus. Bei 36.000 MJ Heizenergie entspricht dies einer Einsparung von 720 MJ. Durch den zusätzlichen Strombedarf

der Komponenten kommen jährlich jedoch rund 2.500 MJ hinzu, sodass auf ein Jahr betrachtet keine Energie eingespart wird, sondern rund 1.800 MJ zusätzlich gebraucht werden. Die Spanne zwischen genutzter Energie und eingesparter Energie wächst somit kontinuierlich über den Betrachtungszeitraum von fünf Jahren. Dies gilt ebenso für das 3 % Szenario und das 5 % Szenario. Innerhalb von fünf Jahren erzielt keines der Szenarien eine energetische Einsparung. Das 10 % Szenario würde nach 73 Monaten den Break-even-point erreichen, das 8 % Szenario nach 221 Monaten.

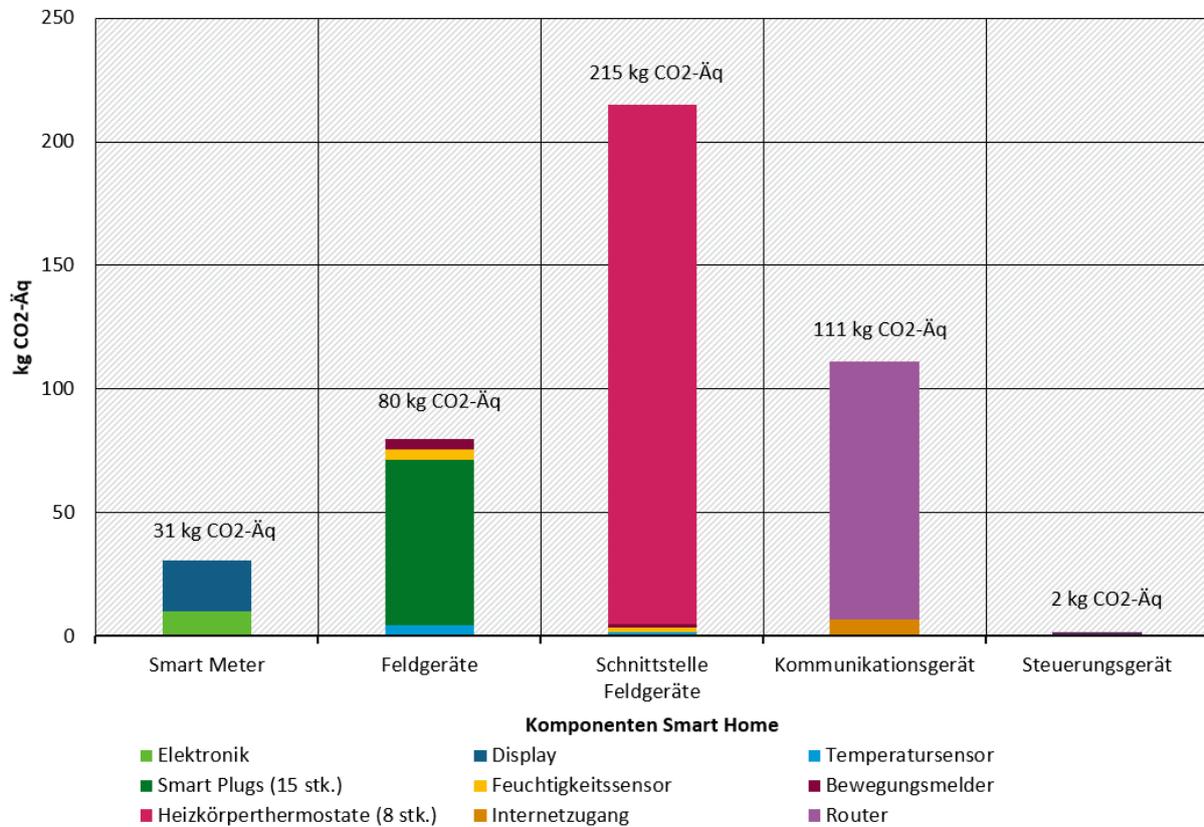
Abbildung B-22: Vergleich des Energieeinsparpotenzials der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ mit Szenarien zur Energieeinsparung in Megajoule



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

Durch den Einsatz von Smart-Home-Systemen sollen, vergleichbar mit dem Energiebedarf, weniger Treibhausgase emittiert werden. Abbildung B-23 zeigt die jeweiligen Beiträge zum Treibhausgaspotenzial des bilanzierten Smart-Home-Systems pro Komponente. Für das betrachtete Smart-Home-System fallen Emissionen in Höhe von **438,37 kg CO₂-Äq.** für die Herstellung an. 209,96 kg CO₂-Äq. werden durch die Schnittstellenfunktion der Heizkörperthermostate verursacht.

Abbildung B-23: Treibhausgasemissionen des Smart-Home-Systems zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in der Herstellungsphase in kg CO₂-Äq.



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

Tabelle B-21: Treibhausgasemissionen des Smart-Home-Systems zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Fünffährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ in der Herstellungsphase in kg CO₂-Äq. – Tabelle zu Abbildung B-23

Gerät	Komponenten	[kg CO ₂ -Äq]
Smart meter	Elektronik	9,84
Smart meter	Display	20,73
Feldgeräte	Temperatursensor	4,28
Feldgeräte	Smart Plugs (15 stk.)	67,11
Feldgeräte	Feuchtigkeitssensor	4,28
Feldgeräte	Bewegungsmelder	4,28
Schnittstelle Feldgeräte	Temperatursensor	1,65
Schnittstelle Feldgeräte	Feuchtigkeitssensor	1,65
Schnittstelle Feldgeräte	Bewegungsmelder	1,65
Schnittstelle Feldgeräte	Heizkörperthermostate (8 stk.)	209,96
Kommunikationsgerät	Internetzugang	6,66
Kommunikationsgerät	Router	104,63
Steuerungsgerät	Smartphone	1,63

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

Analyse verschiedener Szenarien im Hinblick auf THG-Emissionen

Abbildung B-24 zeigt fünf Szenarien, in denen durch das hier betrachtete Smart-Home-System Energie eingespart werden kann. Dies kann in Treibhausgaseinsparungen umgerechnet werden, da die Nutzbarmachung von Energie meistens mit Prozessen gelingt, die THG emittieren. Diese Szenarien kreuzen je nach Höhe der Einsparung nach einem gewissen Zeitraum den THG-Aufwand resultierend aus der Produktions- und Nutzungsphase des Smart-Home-Systems, welches durch die gestrichelte Linie eingezeichnet ist. Ab diesem Zeitpunkt werden theoretisch mehr Treibhausgase eingespart als durch Herstellung und Nutzung der Komponenten emittiert wurde.

Zum jährlichen angenommenen Stromverbrauch von 4.000 kWh und Heizbedarf von 36.000 MJ kommen durch die Nutzung der Smart-Home-Ausstattung jährlich zusätzliche 737,6 kWh Strom hinzu. Laut einer Studie des Umweltbundesamtes aus dem Jahr 2021 liegt die Energieeinsparung bei Nutzung von Smart Metern zumeist im niedrigen einstelligen Bereich (Gähns *et al.*, 2021). Eine Senkung des Energiebedarfes kann vor allem durch *Smart Heating* erreicht werden (Pohl *et al.*, 2021). Für die Berechnung der Szenarien wurde daher angenommen, dass sich der Strombedarf von 4.000 kWh pro Jahr vor Inbetriebnahme der Smart-Home-Komponenten um lediglich 1% reduziert. In Summe erhöht sich somit der Strombedarf, da die zusätzlichen Komponenten bereits 737,6 kWh pro Jahr benötigen. Das Basisszenario fußt demnach auf der THG-Menge für die Produktion der Komponenten zuzüglich der Nutzung der Komponenten. Die Nutzungsphase wurde sowohl mit Zugrundelegung des deutschen Strommixes 2021 als auch mit dem deutschen Grünstrommix 2021 untersucht.

Im Hinblick auf die THG-Emissionen macht dies einen erheblichen Unterschied pro kWh:

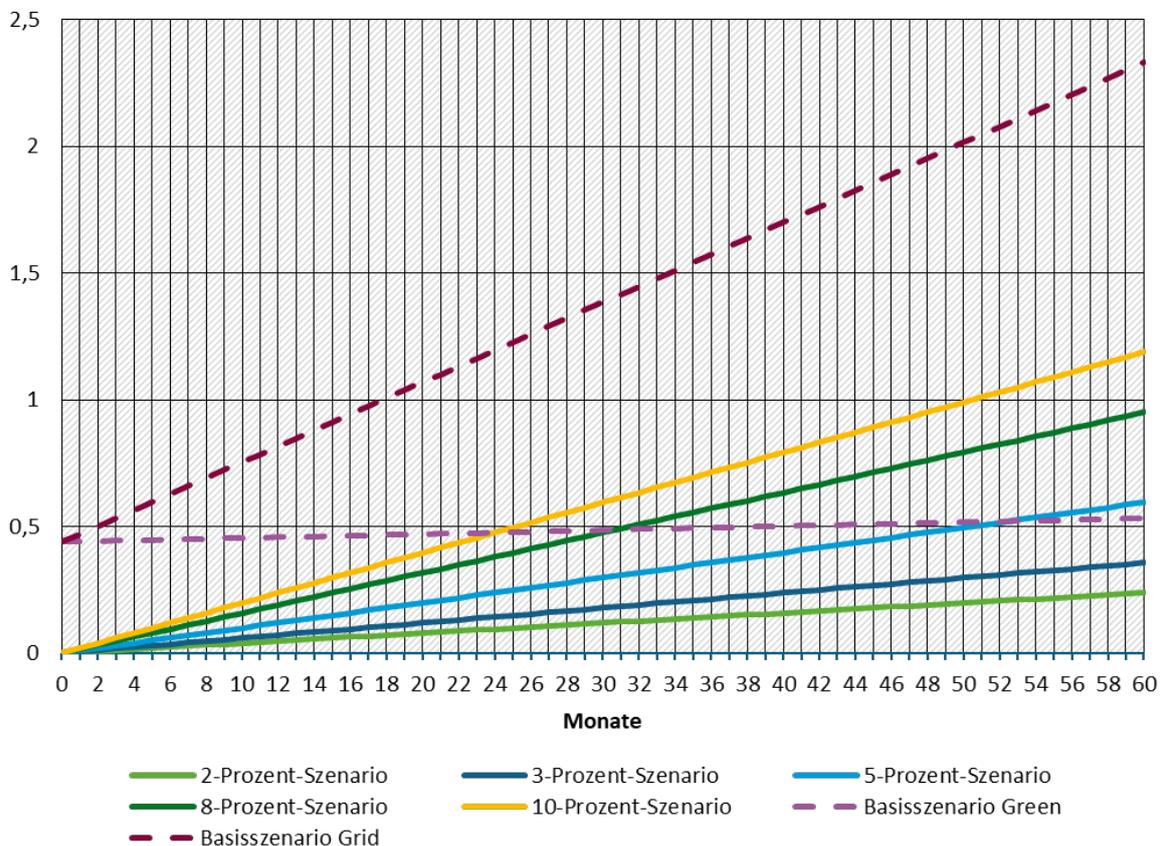
- ▶ Strommix DE: 542,3 g CO₂-Äq./kWh
- ▶ Grünstrommix DE: 26,8 g CO₂-Äq./kWh

Die Berechnungen des Basisszenarios Grid (berücksichtigt den deutschen Strommix) ergeben **2.321,8 kg CO₂-Äq** Emissionen und ein KEA von **40.795 MJ**.

Die Reduktionsszenarien haben eine Spannweite von 2 % - 10 % und beziehen sich auf die Reduzierung der Heizenergie. Eine 2 %-ige Heizenergieeinsparung bedeutet demnach 720 MJ Einsparung pro Jahr durch „intelligentes“ Heizen. Wenn zum Heizen Erdgas verwendet wird, fallen pro MJ 66 g CO₂-Äq. an (direkte und Vorkettenemissionen).

Je nachdem ob der Strom als Grünstrommix oder als deutscher Strommix angenommen wird, verschiebt sich der Break-even-point erheblich. Wird mit dem Grünstrommix 2021 gerechnet, wird der Break-even-point des 8 %- und 10 %-Reduktionsszenarios nach rund 2,5 Jahren erreicht. Das 5 %-Szenario bleibt knapp innerhalb des Betrachtungszeitraumes von 60 Monaten (Break-even bei Monat 51). Wird weniger als 5 % Heizenergieeinsparung angenommen, kann keine THG-Einsparung innerhalb von fünf Jahren erzielt werden. Das 2 %-Szenario und 3 %-Szenario verfehlen das Ziel und erhöhen die THG-Emissionen in Summe sogar. Beim Basisszenario „Grid“ wird der deutsche Strommix verwendet. Hier entfernen sich alle fünf Szenarien mit jedem vergangenen Monat weiter von einer THG-Einsparung. Für das betrachtete Smart-Home-System fallen Emissionen in Höhe von **1.883,43 kg CO₂-Äq**. In der Nutzungsphase an.

Abbildung B-24: Vergleich der Treibhausgasemissionen der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ mit Szenarien zur Treibhausgaseinsparung in Tonnen CO₂-Äq



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

B.3.2.5.2.2 Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial

Ähnlich den Ergebnissen von RMI/TMR, GWP und KEA im Basisszenario Grid zeigt sich auch beim Wasserfußabdruck (WDP) und Landnutzungspotenzial (LOP) ein deutlicher Überhang hinsichtlich der Nutzungsphase, was in der Dauer von 5 Jahren begründet liegt. Die Berechnungen ergaben:

- ▶ WDP Herstellung: **4,5 m³** gegenüber WDP Nutzung: **10,1 m³**
- ▶ LOP Herstellung: **33,3 m²a** gegenüber LOP Nutzung: **89,8 m²a**

Ein Zusammenhang zwischen wasserintensivem Abbau von Lithium für Akkus und dem WDP der Herstellung kann nicht eindeutig identifiziert werden. Vielmehr orientiert sich der WDP am Gewicht der Komponenten. Je schwerer die Komponenten desto höher fällt der WDP aus. Die geringe Allokationsmenge des Akkus im Smartphone zur funktionalen Einheit kann ein Erklärungsansatz dafür sein, weshalb der WDP des Steuerungsgerätes nicht stärker hervortritt.

B.3.2.5.2.3 Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial

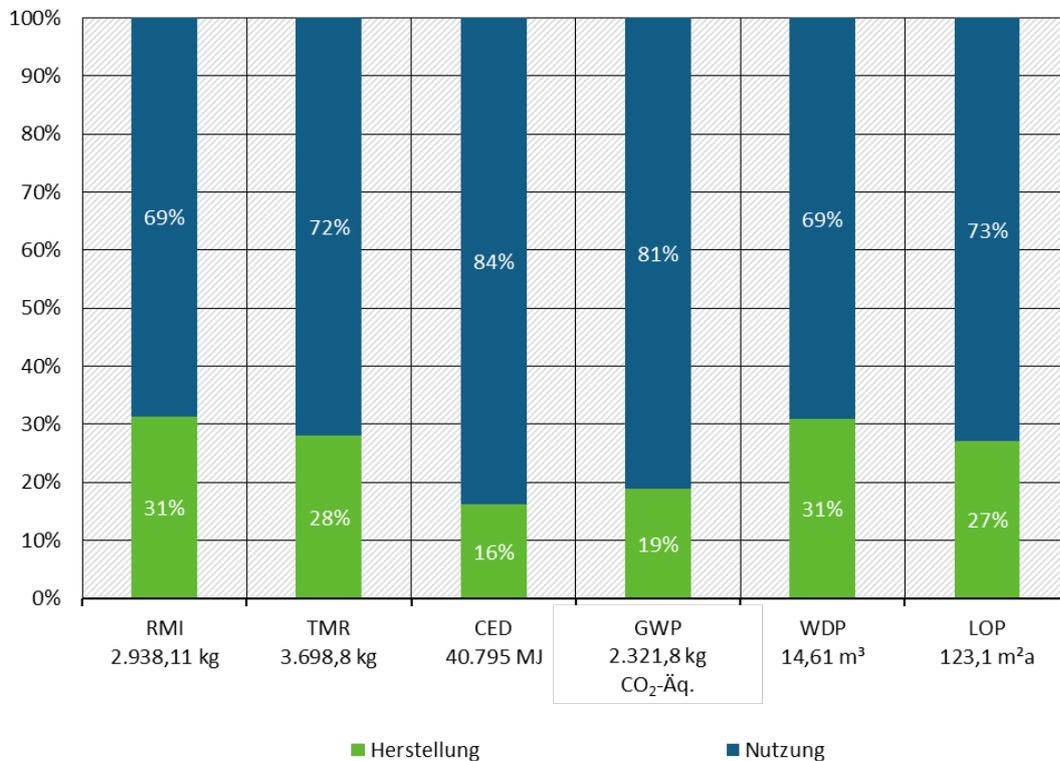
Pohl *et al.* (2022) haben einen integrativen Ansatz bei der Betrachtung von Umwelteffekten und Nutzerverhalten verfolgt und eine Analyse für *Smart Heating*-Systems (SHS) durchgeführt. In der Studie wurden die anwendungsspezifischen Umweltauswirkungen von SHSs untersucht und in die Gesamtbewertung ihrer Rolle für eine Transformation hin zu nachhaltigen Verbrauchsmustern integriert. Hierzu wurde die Umweltperformance von 375 SHSs in Deutschland analysiert. Dabei wurden die LCAs mit verschiedenen nutzungsspezifischen Effekten, wie Produktauswahl oder Individualverhalten erweitert. Dieser Ansatz kombiniert *Life Cycle* Modellierung und Verhaltensforschung. Bezüglich der Treibhausgasemissionen ist festzuhalten, dass SHSs im Durchschnitt nicht zu signifikanten Vorteilen führen, aber in bestimmten Fällen große Einsparungen oder zusätzliche Belastung verursachen können. Dies hängt insbesondere sowohl von der Anzahl der Geräte des SHS (d. h. Auswahl der Produkte) als auch von der Heiztemperatur (d. h. dem Heizverhalten) ab (Pohl *et al.*, 2022).

Für Smart-Home-Systeme gilt, wie für alle digital vernetzten Produkte, ein zusätzlicher Ressourcenbedarf aufgrund des aufwändigeren Herstellungsprozesses gegenüber analogen Produkten. Diesen Nachteil können Smart-Home-Systeme unter gewissen Annahmen in der Nutzungsphase ausgleichen, indem durch die Kombination einzelner Verbrauchsdaten, Wetterdaten und weiterer Daten eine optimale Systemsteuerung berechnet wird. Die Energieeinsparung, beispielsweise bei der Heizungssteuerung (weniger kühlen im Sommer, weniger heizen im Winter), muss den Mehraufwand in der Produktion inklusive des Energiebedarfes für die Steuerung und der Überwachung der Systeme übersteigen. Die Auswertung der erhobenen Studien zeigt eine weit gefächerte Spannweite an Ergebnissen. Während dem Komfort dienende Anwendungen, wie Bewegungssensoren, den Energiebedarf in Summe erhöhen, finden sich Energiesparmöglichkeiten vor allem durch *Smart Heating*. Marktperspektivisch ergeben sich durch Smart-Home-Systeme neben Komfortsteigerung kaum positive Effekte zur Entlastung der Umwelt durch Energie-/Treibhausgaseinsparpotenziale. Der ganzheitliche Einsatz von Smart-Home-Systemen ist politisch gewünscht. Der regional positive Effekt bedarf jedoch weiterer Untersuchung und ist stark abhängig vom individuellen Nutzerverhalten.

B.3.2.6 Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie

Da die Nutzungsphase über einen Zeitraum von fünf Jahren kontinuierlich Strom bedarf, übersteigt die Nutzungsphase die Herstellungsphase in allen sechs betrachteten Ressourcenintensitäts- und Umweltkategorien (siehe Abbildung B-25). Hierbei ist zu beachten, dass der GWP der Nutzungsphase mit dem deutschen Strommixfaktor aus dem Jahr 2021 angesetzt ist und sich die Emissionsintensität des deutschen Strommixes in den kommenden fünf Jahren weiterhin verringern wird. Da jedoch bereits nach einer Nutzungsdauer von einem Jahr der GWP der Nutzungsphase 46 % beträgt, während derjenige der Herstellung 54 % ausmacht, kann davon ausgegangen werden, dass ein geringerer Strommixfaktor den Überhang der Nutzungsphase nicht mehr abmildern wird.

Abbildung B-25: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Fünffährige 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 = CO₂-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

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

Tabelle B-22: Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“ absolut nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase – Tabelle zu Abbildung B-25*

Indikator	Herstellung	Nutzung
RMI	922 kg	2.016 kg
TMR	1.036 kg	2.662 kg
CED	6.602 MJ	34.193 MJ
GWP	438,37 kg CO ₂ -Äq	1.883,43 kg CO ₂ -Äq
WDP	4,5 m ³	10,1 m ³
LOP	33,3 m ² a	89,8 m ² a

* Die Tabelle zeigt gerundete Zahlen

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

Die Digitalisierung von Privathaushalten wird mit Smart-Home-Systemen verstärkt. Sie bieten Komfortsteigerung, Datenvisualisierung und zeigen Einsparpotenziale auf. Die Wahl, eine Fallstudie zur Thematik Smart-Homes zu verfassen, begründet sich im Energiebedarfsanteil von Wohnungen und Häusern am Gesamtenergiebedarf. Der Anteil lag 2018 bei 25 % in der gesamten Europäischen Union. Smart-Home-Anwendungen versprechen eine intelligente Steuerung mit dem Potenzial Energie zu sparen. Hierzu wurde ein Smart-Home-System betrachtet und auf seine Ressourcenintensität hin untersucht. Einzelne Komponenten basieren auf Materiallisten aus veröffentlichter Fachliteratur, die zusammengenommen für die jeweilige Komponente stehen. Unsicherheiten bleiben bezüglich der Vollständigkeit der Materialien sowie der Nichtberücksichtigung des Zusammenbaus, wenn einzelne Materialien eine Komponente ergeben. Andere Komponenten konnten als fertiges Produkt aus der Datenbank entnommen werden. Rohstoffe und Emissionsfaktoren zu den einzelnen Komponenten stammen aus der Datenbank von Ecoinvent 3.8. Die verschiedenen Szenarien verdeutlichen, dass Energieeinsparungen in der Nutzungsphase von 5 % oder mehr die Treibhausgasemissionen im Vergleich zu einem nicht mit smarten Komponenten ausgestatteten Haus reduzieren können, vorausgesetzt, es wird Grünstrom während der Nutzungsphase verwendet. Allerdings bleibt eine Einsparung an THG vollständig aus, sobald der deutsche Strommix zugrunde gelegt wird. Das eine Energieersparnis von mindestens 5 % eintritt, ist jedoch nicht gesichert und hängt stark vom individuellen Nutzverhalten ab.

Der Ressourcenbedarf an materiellen Rohstoffen ist in Bezug auf benötigte Displays und Leiterplatten mit anderen elektronischen Alltagsgegenständen wie Mobiltelefonen, Fernsehern und Laptops vergleichbar. Eine explizite Verknappung durch Smart-Home-Systeme lässt sich aus den Ergebnissen nicht ableiten.

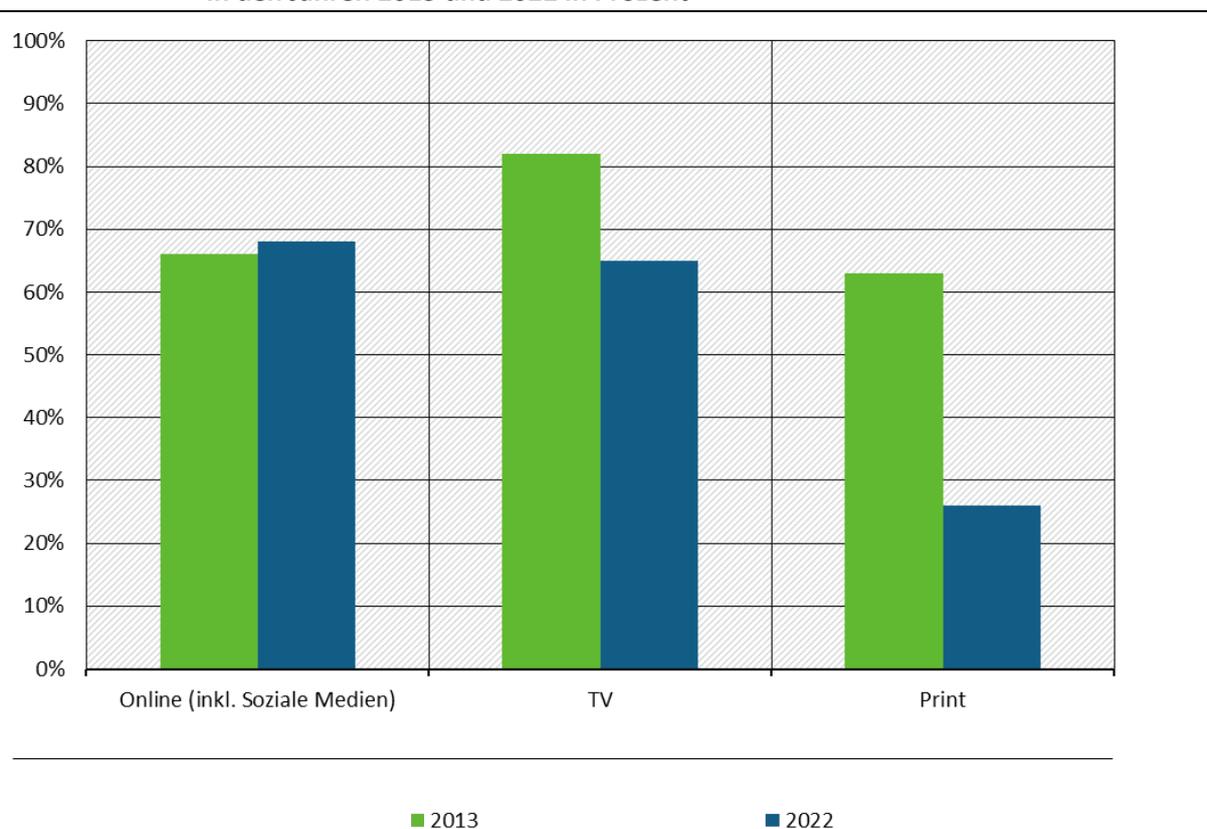
B.3.3 Fallstudie digitale Medien

B.3.3.1 Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung

Ein Großteil der Deutschen nutzt mittlerweile statt klassischen Medien digitale Formen, um Nachrichten und andere Informationen zu konsumieren (BVDW, 2018; Newman *et al.*, 2022). Seit kurzem hat der Gebrauch digitaler Medien sogar den Fernseher als meist genutzte Nachrichtenquelle der Deutschen abgelöst (Newman *et al.*, 2022). Inzwischen informieren sich 92 % der Deutschen mehrmals wöchentlich online über die aktuellen Geschehnisse – das

meistgenutzte Nachrichtenportal in Deutschland ist tagesschau.de (Newman *et al.*, 2022). Zudem ist ein steigender Anteil von Nutzenden bereit, für digitale Nachrichtenangebote zu bezahlen (Newman *et al.*, 2022). Beim Nachrichtenmagazin *Der Spiegel* ist inzwischen fast jedes zweite Abonnement digital und die Wochenzeitung *Die Zeit* berichtet einen Anstieg digitaler Abonnements von 43 % gegenüber dem Vorjahr (Newman *et al.*, 2022). Zum Lesen von Büchern nutzen 37 % der Deutschen inzwischen auch digitale E-Books, wobei 10 % davon angeben, diese sogar überwiegend zu nutzen (Bitkom, 2022). Geschätzt wird an diesen Angeboten vor allem die Möglichkeit, dass E-Books sofort digital verfügbar sind und es inzwischen neben Möglichkeiten zum Kauf auch Leihangebote gibt, bei denen Bücher zeitlich begrenzt digital bereitgestellt werden.

Abbildung B-26: Anteilige Nutzung von unterschiedlichen Quellen für Nachrichten in Deutschland in den Jahren 2013 und 2022 in Prozent



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach Newman *et al.* (2022)

Tabelle B-23: Anteilige Nutzung von unterschiedlichen Quellen für Nachrichten in Deutschland in den Jahren 2013 und 2022 in Prozent – Tabelle zu Abbildung B-26

Jahr	Online (inkl. Soziale Medien)	TV	Print
2013	66%	82%	63%
2022	68%	65%	26%

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

In beiden Bereichen lässt sich beobachten, dass die digitalen Lösungen vor allem vom jüngeren Publikum stark nachgefragt werden (Bitkom, 2022; Newman *et al.*, 2022). Zudem besteht ein zunehmender Trend dazu, kleine und mobile Geräte für den Konsum von Medien aller Arten zu nutzen (Newman *et al.*, 2022). Solche Geräte sind portabel und in der Regel mit mobilem

Internetempfang ausgestattet, wodurch die Möglichkeit besteht, Medien nicht nur zuhause oder am Arbeitsplatz, sondern auch auf Zugfahrten, in Cafés oder anderen Situationen zu nutzen. Dies führt dazu, dass die Menschen heutzutage im Alltag mehr lesen als vor einigen Jahren. Es wird bewusst und unbewusst digital gelesen, hochfrequenter und selektiver sowie mit Bildern durchsetzt (Riethmüller, 2022). Die Nutzung von digitalen Medien gegenüber analogen nimmt weltweit zu. So ist zwischen 2016 und 2018 die Zeit, die täglich mit Lesen von Online-Presse verbracht wurde, von 50 auf 59 Minuten gestiegen (Bayindir & Paisley, 2019; BMBF, 2022).

Vor diesem Hintergrund drängt sich die Frage auf, welche Rohstoffbedarfe und Umweltfolgen mit digitalen Medien assoziiert werden können. Dem soll im Rahmen der vorliegenden Fallstudie nachgegangen werden.

B.3.3.2 Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie

Der Lebenszyklus von Medienprodukten und -dienstleistungen beginnt mit der Generierung und Produktion von Inhalten durch Recherche, Redaktion und assoziierten Tätigkeiten. Diese Schritte können einen erheblichen Einfluss auf die Umweltwirkungen digitaler Medienprodukte haben (Achachlouei *et al.*, 2015). Im Fokus dieses Vorhabens soll jedoch eine Betrachtung der digitalen Anwendung in Abgrenzung zu klassischen Medien (hauptsächlich Print) stehen, für die ebenfalls die notwendige Vorarbeit der Inhaltserstellung erfolgt. Daher wird die Erarbeitung von journalistischen Artikeln und anderen Medienprodukten als außerhalb der Betrachtungsgrenzen der vorliegenden Studie angesehen. Was hingegen im Rahmen dieses Vorhabens betrachtet werden soll, sind die mit dem digitalen Bereitstellen und Abrufen verbundenen Prozesse sowie die hierfür benötigten Endgeräte. Interessant ist hierbei vor allem, dass die zur Verfügung gestellte Leistung oftmals über multifunktionale Geräte wie Smartphones oder Laptops abgerufen wird, welche die notwendigen Datenpakete, die über ein internetbasiertes Netzwerk bereitgestellt werden, empfangen und die Inhalte schlussendlich anzeigen (Aigner, 2018). Ein wichtiger Aspekt der Untersuchung liegt daher darin, wie diese multifunktionalen Geräte sinnvoll in Betracht gezogen werden können und welcher Anteil der mit ihrer Herstellung und Nutzung verbundenen Rohstoffanforderungen und Umweltauswirkungen auf die Nutzung für den Konsum digitaler Medien entfällt. Hierzu ist es notwendig, spezifische Nutzungsprofile für ebendiese Geräte zu erstellen und sinnvolle Annahmen zu ihrer Lebensdauer zu treffen. Auf Grundlage dieser Profile werden angemessene Teile der Herstellung und Nutzung dieser Geräte dem spezifischen Anwendungsfall zugeordnet. Dies wird durch die Einbeziehung der Rohstoffanforderungen und Umweltauswirkungen der notwendigen digitalen Infrastruktur und Rechenzentren beim Konsum digitaler Medien ergänzt. Dies ermöglicht es, einen Einblick in den ökologischen Fußabdruck solcher Dienste zu gewinnen. Wie zuvor erläutert, werden die genutzten Übertragungsnetze und Rechenzentren nur in Form ihres Energieaufwands für die Datenübertragung in die Betrachtung einbezogen. Die Sensitivität der Ergebnisse hinsichtlich dieser Vereinfachung wird abschließend über eine Annäherung betrachtet. Der Stromverbrauch der Server- und Übertragungsnetznutzung wird jedoch über einen aus der Fachliteratur hergeleiteten Berechnungsschlüssel für die Nutzungsphase in das Modell mit integriert (Malmodin *et al.*, 2014; Gröger *et al.*, 2021).

Die Entsorgung der End- und Heimvernetzungsgeräte findet in der hier durchgeführten Betrachtung keine Berücksichtigung (siehe Kapitel zum Fokus auf Herstellungs- und Nutzungsphase). Auf Basis bisheriger Studien ist davon auszugehen, dass Produktion und Nutzungsphase dominant in ihrer Umweltwirkung gegenüber der Entsorgung der Geräte sind (Prakash *et al.*, 2012; Joshi *et al.*, 2021). Zudem ist dem aktuellen Wissenstand nach ungewiss, ob und wie eine Entsorgung dieser Geräte stattfindet, da nur ein geringer Teil der IT-Endgeräte in Deutschland über den dafür vorgesehenen Entsorgungsweg einer Verwertung zugeführt wird.

B.3.3.3 Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie

B.3.3.3.1 Untersuchungseinheit

Für die Fallstudie wurde folgende Untersuchungseinheit gewählt:

Download und 30-minütiges Lesen eines Online-Nachrichtenartikels auf einem geeigneten Endgerät

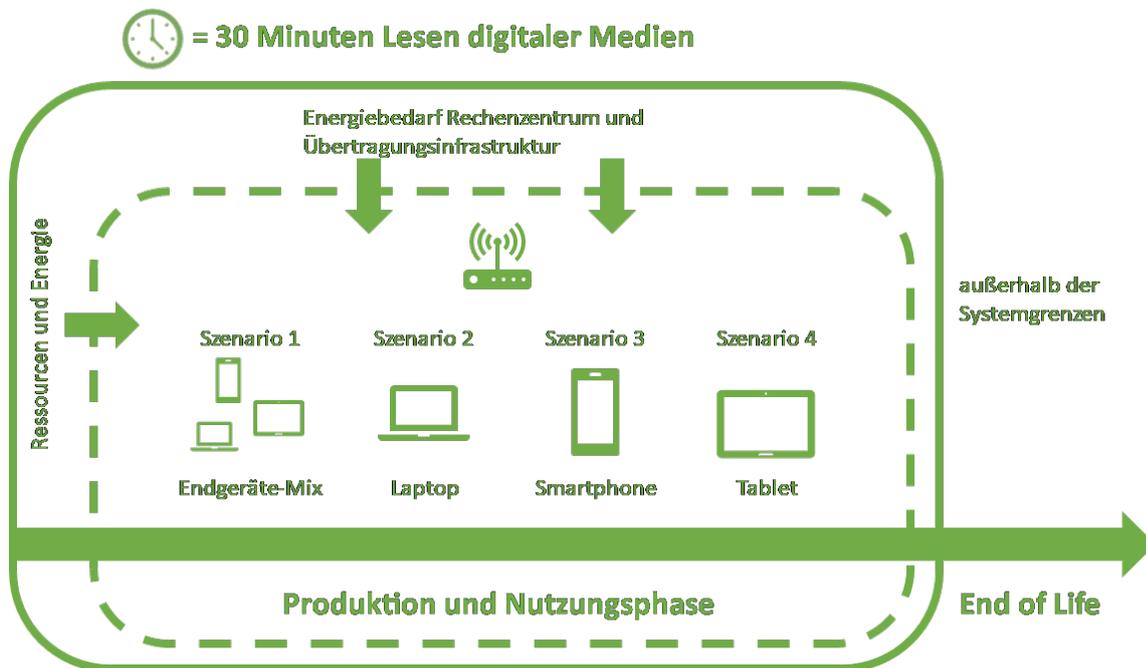
Das Lesen eines Online-Nachrichtenartikels wurde als geeigneter Anwendungsfall für die Betrachtungen dieser Studie identifiziert, da es sich hierbei wie aufgezeigt um eine weit verbreitete Art des Konsums digitaler Medien handelt. Zudem wurde im Rahmen der Recherchen, welche der Erarbeitung der Studie vorausgingen, festgestellt, dass für diesen Anwendungsfall eine solide Grundlage an notwendigen Daten vorhanden ist, um den Anwendungsfall hinreichend genau mit den im Rahmen der Studie verwendeten Methoden abbilden zu können.

Die Auswahl des Endgeräts wurde in der Untersuchungseinheit bewusst nicht im Detail festgelegt, um die Möglichkeit zur Untersuchung verschiedener Szenarien zu gewährleisten und den unterschiedlichen verfügbaren Endgeräten auf Seiten der Leserschaft gerecht zu werden. Als Bezugszeit für das Lesen des Artikels wurden 30 Minuten gewählt, da diese Zeitdauer als eine angemessene and realitätsnahe Vergleichsbasis scheint, um einen längeren Online-Artikel zu lesen und so auch in vergleichbaren Anwendungsfällen in der Literatur gefunden werden konnte (vgl. z. B. Moberg *et al.*, 2007). Bezüglich der Übertragungsnetze und Rechenzentren wird angenommen, dass der Anwendungsfall sich geografisch auf Deutschland beschränkt

B.3.3.3.1.1 Komponenten und betrachtete Systeme

Das zu betrachtende System kann in zwei Bereiche gegliedert werden. Einerseits die End- und Netzwerkzugangsgeräte, welche die Lesenden besitzen und für die Anwendung nutzen, und andererseits das Übertragungsnetzwerk und das Rechenzentrum, über das die Artikel heruntergeladen bzw. in dem die digitalen Artikel abgespeichert und online verfügbar gemacht werden. Abbildung B-27 zeigt übersichtsartig den untersuchten Betrachtungsrahmen.

Abbildung B-27: 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

End- und Netzwerkzugangsgeräte der Lesenden

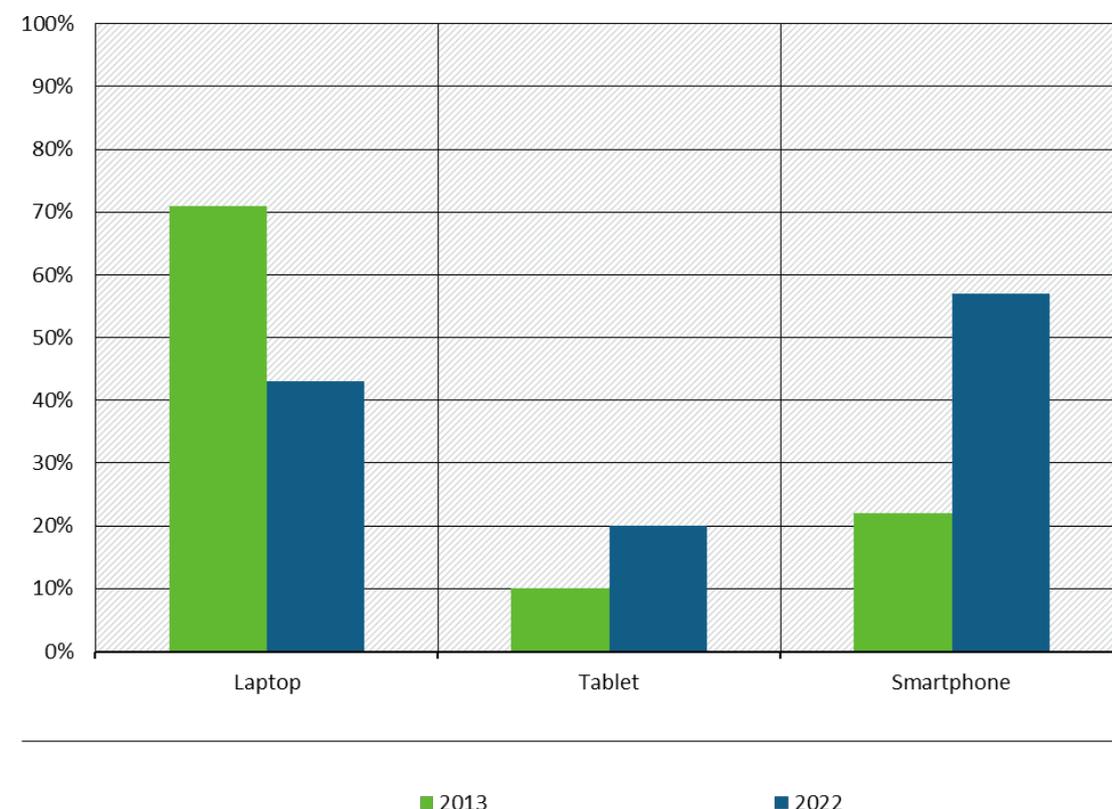
Um einen digitalen Nachrichtenartikel abrufen und anzeigen zu können, müssen Lesende über ein geeignetes Endgerät sowie ein Netzwerkzugangsgerät verfügen. Das Netzwerkzugangsgerät ist klassischerweise ein Router, der in einer Wohnung oder einem Haus die mobilen Endgeräte kabellos mit Internetzugang versorgt²⁴. Zur Betrachtung des Anwendungsfalls sind für den Router sowohl der Anteil der Herstellungsphase, welcher der Untersuchungseinheit zugeschrieben werden kann, als auch die Leistungsaufnahme für den Betrieb während der Lesedauer zu betrachten. Für den Router wurde eine Gesamtlebensdauer von vier Jahren angenommen. Diese Annahme ist eine Schätzung des Durchschnitts aufgrund von Informationen, die darauf hinweisen, dass Router in der Regel eine Lebensdauer von zwei bis drei Jahren haben, während High-End-Router bis zu zehn Jahren halten können (Jaeger, 2022). Es wird hierbei davon ausgegangen, dass High-end Router im privaten Gebrauch eher die Ausnahme darstellen. Für die Leistungsaufnahme des Routers während des Betriebs wurde ein Wert von 0,013 kWh angenommen, welcher aus Gröger (2020) entnommen wurde. Ein Router läuft oftmals durchgehend, um jederzeit Zugriff auf das Internet bereitstellen zu können. Jedoch wird nicht zwingend durchgehend auch auf das Internet zugegriffen, daher wird im Rahmen der Studie für die tägliche Nutzung des Routers angenommen, dass der Router 250 Minuten pro Tag genutzt wird. Diese Annahme ermittelt sich aus Angaben zur täglichen Internetnutzung verschiedener Altersgruppen für das Jahr 2022 (Statista, 2022c). Ihr wurde zu Grunde gelegt,

²⁴ Für die Fallstudie wurde vorrangig eine Festnetz-Internetverbindung angenommen, mittels derer alle der betrachteten Endgeräte für digitales Lesen geeignet sind. Eine überschlägige Betrachtung für eine mobile Datenverbindung wurde für das Smartphone-Szenario ebenfalls erstellt.

dass digitale Medien von einer jüngeren Zielgruppe potenziell eher genutzt werden als von Personen über 50 Jahren.

Neben dem Router gibt es mehrere Endgeräte, auf welchen das Lesen digitaler Medien stattfinden kann. Die vorliegende Untersuchung konzentriert sich hierbei auf die drei meistgenutzten Endgeräte, die in der analysierten Literatur am häufigsten vorkamen: Laptops, Smartphones und Tablets. Wie in Abbildung B-28 zu erkennen, hat sich unter diesen Geräten die Nutzung in den letzten zehn Jahren stark gewandelt. Wurde damals noch hauptsächlich über den Laptop digital gelesen, stellt inzwischen das Smartphone das wichtigste Gerät zum digitalen Lesen dar. Auch die Bedeutung von Tablets beim digitalen Lesen hat sich im Betrachtungszeitraum verdoppelt.

Abbildung B-28: Nutzung von Endgeräten zum Abrufen von Online-Nachrichtenartikeln in Deutschland in den Jahren 2013 und 2022 in Prozent



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach Newman *et al.* (2022)

Tabelle B-24: Nutzung von Endgeräten zum Abrufen von Online-Nachrichtenartikeln in Deutschland in den Jahren 2013 und 2022 in Prozent – Tabelle zu Abbildung B-28

Jahr	Laptop	Tablet	Smartphone
2013	71%	10%	22%
2022	43%	20%	57%

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

Im Rahmen der Untersuchung finden alle drei Geräte Berücksichtigung. Hierzu werden insgesamt vier Szenarien erstellt, welche die Unterschiede in potenziellem Rohstoffbedarf und Umweltfolgen abbilden. Je Endgerät wird ein Szenario erstellt, welches die Nutzung dieses Endgeräts zum digitalen Lesen um Anwendungsfall untersucht. Zudem wird ein zusätzliches

Szenario erstellt, welches eine gemischte Nutzung aller drei Geräte im Anwendungsfall annimmt. Für dieses Szenario wurde für jedes Endgerät ein Anteil an der Nutzung berechnet, welcher sich auf die in Abbildung B-28 dargestellten Anteile der heutigen Nutzung bezieht und diese auf 100 % skaliert. Tabelle B-25 zeigt die in diesem Szenario angenommenen Anteile der jeweiligen Endgeräte.

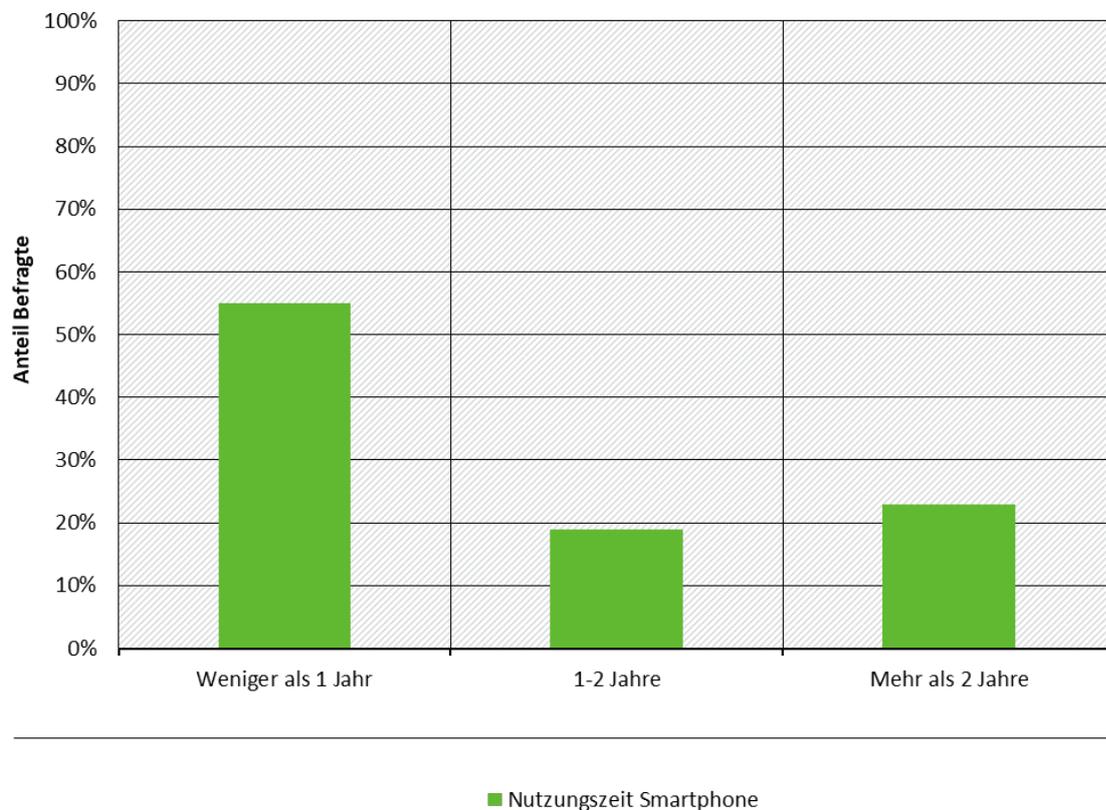
Tabelle B-25: Nutzungsanteile der betrachteten Produktsysteme in der Sachbilanz zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Prozent

Endgerät	Anteil Nutzung in 2023 - Anteil am Produktsystem der Endgeräte für Szenario „Endgeräte-Mix“ dieser Fallstudie
Smartphone	57% → 47,5%
Laptop	43% → 35,8%
Tablet	20% → 16,7%

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

Um in allen Szenarien den Anteil der Herstellungsphase der Endgeräte, welcher der Untersuchungseinheit zugeschrieben werden kann, zu integrieren, sind Annahmen über die Lebensdauer sowie das Nutzungsverhalten dieser Geräte notwendig. Hierbei wurde für das Smartphone eine Lebensdauer von 2,5 Jahren angenommen. Dieser Wert ergibt sich aus der Erwägung, dass klassische Mobilfunkverträge in Deutschland eine Vertragslaufzeit von zwei Jahren haben und Nutzende mit einem neuen Mobilfunkvertrag oftmals auch ein neues Smartphone erhalten. Um dem Umstand gerecht zu werden, dass einige Nutzende ihr Gerät auch über zwei Jahre hinaus nutzen, wurde der angenommene Wert in dieser Untersuchung nach oben angepasst. Die Annahme fügt sich passend in die Ergebnisse von Befragungen ein, wonach weniger als ein Viertel der Smartphone-Nutzenden ihr Gerät länger als zwei Jahre besitzt (Statista, 2023) (vgl. Abbildung B-29).

Abbildung B-29: Ergebnisse der Umfrage: „Wie lange haben Sie bereits das Smartphone, dass Sie derzeit privat nutzen?“ in Prozent



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

Tabelle B-26: Ergebnisse der Umfrage: „Wie lange haben Sie bereits das Smartphone, dass Sie derzeit privat nutzen?“ in Prozent – Tabelle zu Abbildung B-29

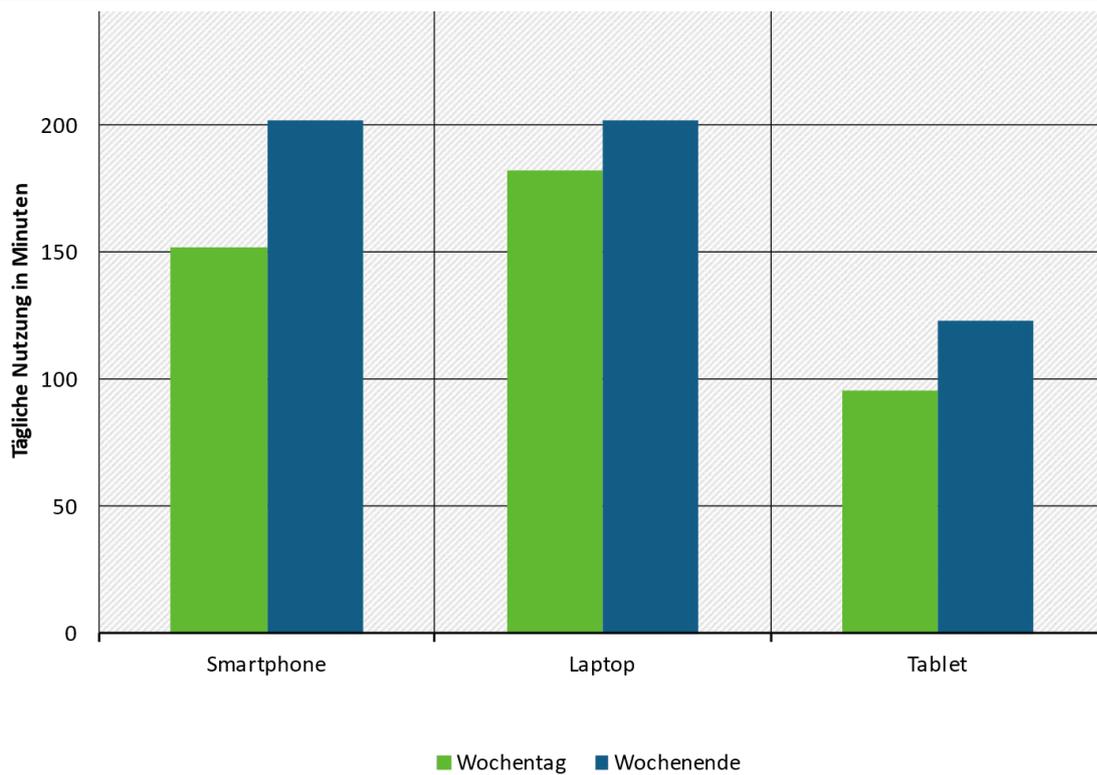
	Weniger als 1 Jahr	1-2 Jahre	Mehr als 2 Jahre
Nutzungszeit Smartphone	55%	19%	23%

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

Für Laptops und Tablets wurde eine andere Lebensdauer angenommen, da diese Geräte in der Regel nicht an Mobilfunkverträge gekoppelt sind und deren Nutzungsdauer daher deutlich höher ausfällt. Im Falle von Tablet-Computern geben Publikationen Hinweise darauf, dass sie in der Regel über drei Jahre und länger genutzt werden (Belkhir & Elmeligi, 2018). In der vorliegenden Studie wurde für das Tablet daher eine Lebensdauer von 3,5 Jahren angenommen. Für den Laptop wurde die Annahme der Lebensdauer weiter erhöht und auf vier Jahre gesetzt, da Laptops durchschnittlich mit einem höheren Anschaffungspreis als die anderen Geräte verbunden sind und daher davon ausgegangen wird, dass diese noch länger genutzt werden, bis sich die Anwender*innen dazu entschließen sich ein neues Gerät anzuschaffen.

Bezüglich der täglichen Nutzung der Endgeräte wurde auf Daten einer Studie zur Nutzung digitaler Geräte und Angebote in Deutschland zurückgegriffen. In dieser Studie wurde, getrennt danach, ob es sich um einen Wochentag oder einen Tag des Wochenendes handelt, die durchschnittliche Mediennutzung der Deutschen im Jahr 2017 erhoben. Die Ergebnisse sind in Abbildung B-30 dargestellt. Die angenommene Lebensdauer der Endgeräte ergibt sich aus der Summe der durchschnittlichen Nutzungsdauer über die angenommenen Nutzungstage hinweg.

Abbildung B-30: Tägliche Nutzung digitaler Endgeräte in Deutschland im Jahr 2017 in min/d



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach BVDW (2018)

Tabelle B-27: Tägliche Nutzung digitaler Endgeräte in Deutschland im Jahr 2017 in min/d – Tabelle zu Abbildung B-30

Tag	Smartphone [min/d]	Laptop [min/d]	Tablet [min/d]
Wochentag	152	182	96
Wochenende	202	202	123

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 nach BVDW (2018)

Für die Leistungsaufnahme der Endgeräte wurden Literaturwerte verwendet, welche in Tabelle B-28 dargestellt sind. Die verwendeten Werte stimmen mit Erkenntnissen überein, wonach Smartphones und Tablets im Vergleich zu Laptops bei der Nutzung für den Nachrichtenkonsum deutlich weniger Energie verbrauchen (Schien *et al.*, 2013).

Tabelle B-28: Leistungsaufnahme in Wattstunden der betrachteten Geräte zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ pro Stunde

Gerät	Leistungsaufnahme	Quelle und ergänzende Informationen
Laptop	8,4 Wh	Prakash <i>et al.</i> (2016)
Tablet	3,2 Wh	0,0286 kWh Akkukapazität (iPad 10. Generation), 9 Stunden Batterielaufzeit (Apple, 2022)
Smartphone	2 Wh	0,0124 kWh Akkukapazität (iPhone 13), 1x täglich laden (Hristov, 2022)
Router	13 Wh	Gröger (2020)

Um abschließend für die untersuchten End- und Netzwerkzugangsgeräte einen Überblick über die Annahmen in den verschiedenen Szenarien zu geben, ist in Tabelle B-28 noch einmal eine Zusammenfassung dargestellt.

Tabelle B-29: Überblick der Annahmen zu den End- und Netzwerkzugangsgeräten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“

Untersuchte Endgeräte	Angenommene Lebensdauer [Jahre]	Wöchentliche Nutzungsdauer [Minuten]	Leistungsaufnahme pro Stunde [Wh]	Anteil in Produktmix Szenario*
Smartphone	2,5	1164	2,0	47,5%
Laptop	4	1314	8,4	35,8%
Tablet	3,5	726	3,2	16,7%
Router	4	250	13	100%

* vgl. Tabelle B-25

Übertragungsnetzwerk und Rechenzentrum

Zur Berücksichtigung der Rohstoffbedarfe und Umweltfolgen der Nutzung von Übertragungsnetzen und Rechenzentren ist zunächst zu bestimmen, welche zu übertragende Datenmenge mit dem Anwendungsfall assoziiert werden kann. Moberg *et al.* (2007) nennen für einen Onlineartikel, dessen Lektüre 30 Minuten bedarf, eine zu übertragende Datenmenge von 5 MB. Aigner (2018) unterscheidet zwischen Datenmengen für E-Books (2,5 MB), Online-Magazinen (29,5 MB) und Online-Zeitungen (11,5 MB). Da die in diesem Vorhaben betrachtete Untersuchungseinheit vom Lesen eines langen bzw. einiger kurzer Zeitungsartikel ausgeht, ist die notwendige Datenmenge, um ein ganzes Magazin oder eine ganze Zeitung zu übertragen, als unverhältnismäßig hoch zu betrachten. Daher wird für die vorliegende Untersuchung eine zu übertragende Datenmenge von 5 MB für die Untersuchungseinheit angenommen.

Um die Leistungsaufnahme der Datenübertragung zu berücksichtigen, wird auf die Green Cloud Computing Studie (Gröger *et al.*, 2021) zurückgegriffen, in welcher für einen exemplarischen Datenstrom auf einer Wegstrecke von ca. 500 km innerhalb Deutschlands ein Energiebedarf von 1,6 Wh/GB für eine VDSL-Verbindung angegeben wird.

Die Zurechnung der Leistungsaufnahme im Rechenzentrum gestaltet sich schwierig, da Rechenzentren sich untereinander stark in ihrem Energiebedarf und der bereitgestellten

Leistung unterscheiden können. Deshalb empfiehlt es sich, für Einzelfallbetrachtungen Primärdaten zum spezifisch genutzten Rechenzentrum zu erheben. Im Rahmen dieser generellen Untersuchung muss eine Annahme zum Rechenzentrum getroffen werden. Eine weitere Schwierigkeit besteht darin, dass im hier untersuchten Anwendungsfall lediglich eine einzelne Datenabfrage vom Rechenzentrum notwendig ist und während der 30-minütigen Nutzung kein dauerhafter Datenaustausch mit dem Rechenzentrum stattfindet. Daher ist die sonst oft übliche Allokation der Rohstoffbedarfe und Umweltfolgen des Rechenzentrumsbetriebs über die Nutzungsdauer nicht zweckmäßig. Da aufgrund der Einzelabfrage mit einer im Verhältnis zu anderen digitalen Anwendungen geringeren Datenmenge nicht von einer großen Relevanz des Rechenzentrums für die Gesamtergebnisse der Fallstudie auszugehen ist, wird hier auf eine generische Annahme aus der Literatur von 1 kWh/GB (Malmodin *et al.*, 2014; Aigner, 2018) als Leistungsaufnahme des Rechenzentrums zurückgegriffen. Im Vergleich zu verschiedenen analysierten wissenschaftlichen Publikationen und zu anderen Fallstudien dieser Publikation, in welchen der Energiebedarf des Rechenzentrums über die Nutzungsdauer auf den Anwendungsfall allokiert werden kann, ist dieser Wert als relativ hoch anzusehen. Gerade dieser Umstand ist jedoch willentlich integriert, um vor dem Hintergrund der erwarteten geringen Relevanz dieses Faktors eine zusätzliche Unterschätzung des Werts zu vermeiden.

B.3.3.4 Ergebnisse zur Ressourcenintensität

B.3.3.4.1 Rohstoffe und ungenutzt Materialentnahme

B.3.3.4.1.1 Herstellungsphase

Je nach genutztem Endgerät und dem respektiv angenommenem Nutzungsprofil lässt sich der dem Anwendungsfall zurechenbare Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand der Herstellung der End- und Netzwerkzugangsggeräte der Lesenden berechnen. Tabelle B-30 zeigt die sich für die verschiedenen untersuchten Produktsysteme bei den Lesenden ergebenden Werte, die im Projekt berechnet wurden. Da die Indikatoren Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand positiv miteinander korrelieren, ist die sich ergebende Rangfolge der untersuchten Szenarien bei beiden Indikatoren identisch. Der geringste Wert ergibt sich jeweils für die Nutzung des Smartphones zum Lesen digitaler Medien. Der höchste Wert wird erreicht, wenn der Laptop zum digitalen Lesen genutzt wird. Dieses Ergebnis ist insoweit interessant, da das angenommene Nutzungsprofil des Laptops von einer längeren wöchentlichen Nutzungsdauer als beim Smartphone ausgeht und auch die angenommene Lebensdauer des Endgeräts deutlich höher ist, auf die sich die gesamten Einflüsse allokiert lassen. Trotzdem lässt sich dem Anwendungsfall für die Nutzung des Laptops ein höherer Wert dieser beiden Indikatoren zurechnen. Dies liegt daran, dass ein Laptop in der Herstellung in der Regel mit einem erheblich höheren Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand assoziiert werden kann als ein Smartphone.

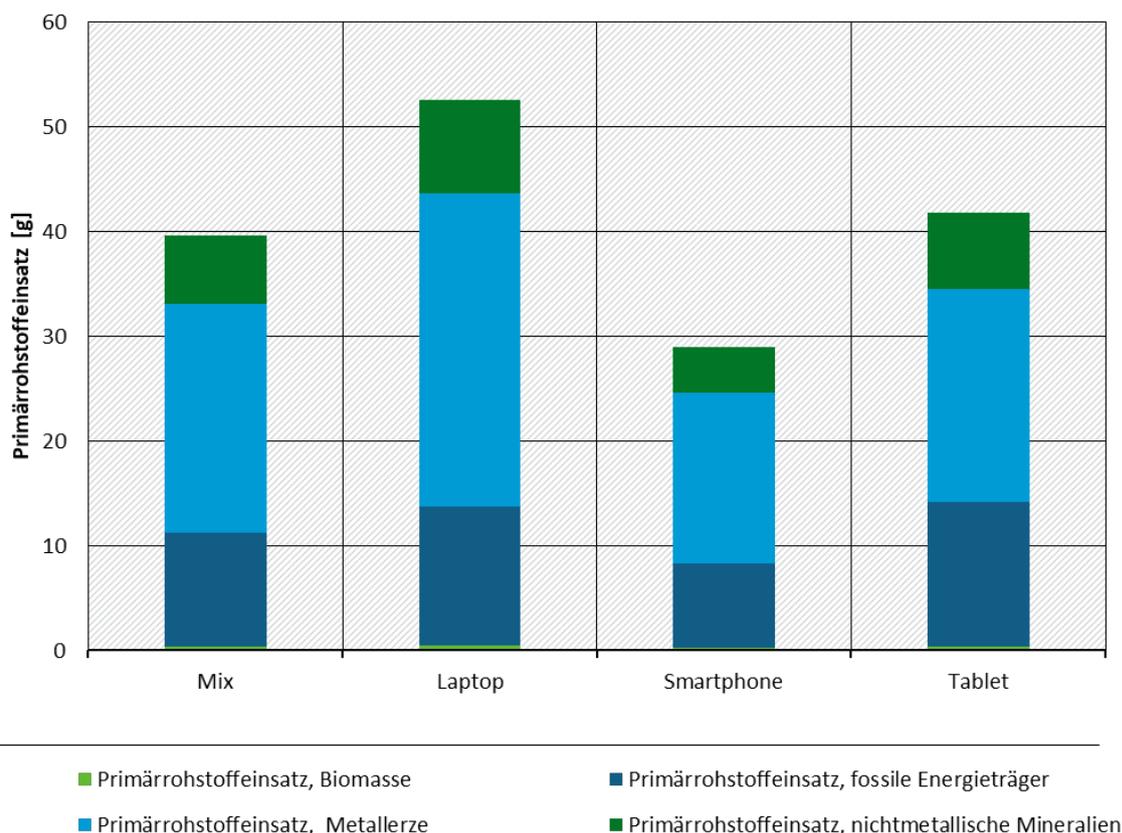
Tabelle B-30: Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ unterschieden nach genutztem Endgerät in Gramm

Produktsystem	Primärrohstoffeinsatz [g]	Gesamtprimärmaterialaufwand [g]
Mix	39,6	44,9
Laptop	52,6	59,4
Smartphone	29,0	32,7
Tablet	41,8	48,5

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

In Abbildung B-31 sind die Anteile am Primärrohstoffeinsatz der Herstellung nach Rohstoffarten dargestellt. Es zeigt sich, dass Metallerze den größten Anteil stellen, gefolgt von fossilen Energieträgern und nichtmetallischen Mineralien. Biomasse spielt für den Primärrohstoffeinsatz der Herstellung wie zu erwarten eine untergeordnete Rolle.

Abbildung B-31: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Herstellung der Endgeräte zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm



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

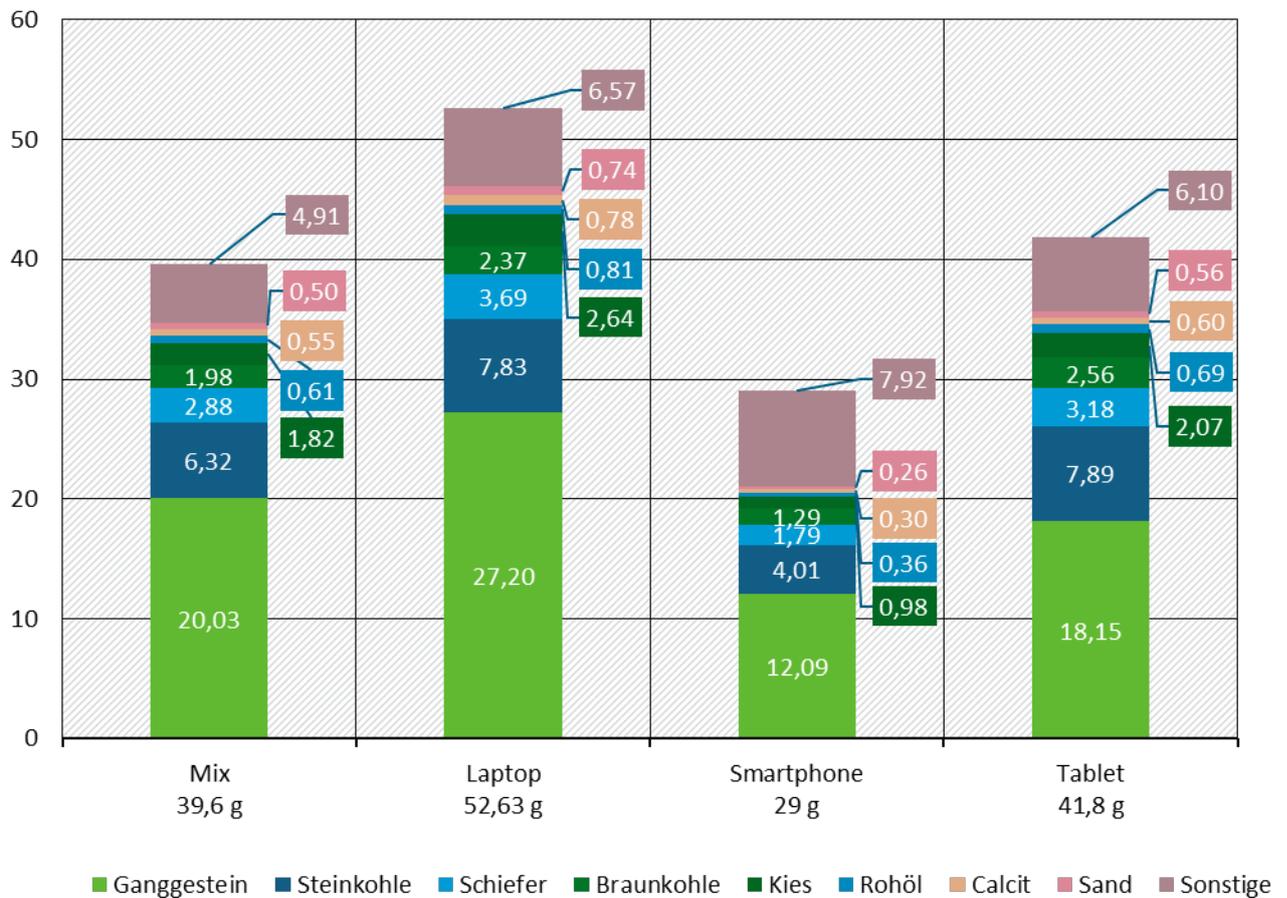
Tabelle B-31: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Herstellung der Endgeräte zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm – Tabelle zu Abbildung B-31

Herstellung [g]	Primärrohstoffeinsatz, Biomasse	Primärrohstoffeinsatz, fossile Energieträger	Primärrohstoffeinsatz, Metallerze	Primärrohstoffeinsatz, nichtmetallische Mineralien
Mix	0,34	10,87	21,87	6,50
Laptop	0,45	13,28	29,88	8,96
Smartphone	0,24	8,02	16,38	4,38
Tablet	0,40	13,83	20,33	7,27

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

Abbildung B-32 zeigt den Primärrohstoffeinsatz von mineralischen und fossilen Rohstoffen 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 Betrachtung der einzelnen Elementarflüsse ist die Rohstoffintensität der Herstellungsphase rein massentechnisch vorrangig durch die Entnahme von Ganggestein geprägt. Zudem sind – in dieser Reihenfolge – Steinkohle, Schiefer, Braunkohle, Kies, Rohöl, Calcit und Sand massenmäßig relevante Inputs der Herstellung. Die hiervon verwendeten Mengen schwanken je nach betrachtetem Endgerät zum digitalen Lesen und sind in Abbildung B-32 dargestellt. Vergleicht man diese Ressourcen exemplarisch mit den Bestandteilen eines Smartphones (entnommen aus Rizo *et al.*, 2019) zeichnet sich ab, dass bei den genannten Stoffen (mit Ausnahme von Sand, welcher als relevante Komponente von Glas Bestandteil eines klassischen Smartphones ist) nicht davon auszugehen ist, dass sie in entsprechender Menge in den IKT-Endgeräten selbst vorhanden sind, sondern die Produktionsvorkette und Energienutzung für den Einsatz der entsprechenden Ressourcen verantwortlich ist.

Abbildung B-32: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm



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

Tabelle B-32: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm – Tabelle zu Abbildung B-32

Rohstoffart	Mix [g]	Laptop [g]	Smartphone [g]	Tablet [g]
Ganggestein	20,03	27,20	12,09	18,15
Steinkohle	6,32	7,83	4,01	7,89
Schiefer	2,88	3,69	1,79	3,18
Braunkohle	1,98	2,37	1,29	2,56
Kies	1,82	2,64	0,98	2,07
Rohöl	0,61	0,81	0,36	0,69
Calcit	0,55	0,78	0,30	0,60
Sand	0,50	0,74	0,26	0,56
Sonstige	4,91	6,57	7,92	6,10

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

Neben den massenmäßig am meisten aufgewendeten Rohstoffen bei der Herstellung des betrachteten Produktsystems sind auch Rohstoffe von Interesse, deren Bedarf zwar nominell niedrig erscheint, die jedoch aufgrund ihrer Relevanz für die Digitalisierung von Interesse sind. Diese digitalisierungsrelevanten Rohstoffe umfassen auch eine Reihe sogenannter kritischer Rohstoffe, deren Kritikalität sich aus einer Kombination von wirtschaftlicher Bedeutung für die EU und Versorgungsrisiko ergibt (Europäische Kommission, 2020). Hintergründe zu den verschiedenen Rohstoffkategorien und eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise bei der Auswertung sind in Kapitel B.5 zu finden. Die für den vorliegenden Anwendungsfall errechneten Mengen sind in Tabelle B-33 dargestellt. Auch bei diesen Rohstoffen ist ersichtlich, dass der Anwendungsfall unter Annahme der Nutzung eines Smartphones den geringsten Bedarf in allen untersuchten Rohstoffgruppen aufweist, wohingegen die Nutzung eines Laptops mit dem höchsten Bedarf für die Herstellung assoziiert werden kann.

Tabelle B-33: Erforderliche Menge digitalisierungsrelevanter Rohstoffgruppen zur Herstellung der Endgeräte zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Milligramm

Rohstoffgruppe	Mix	Laptop	Smartphone	Tablet
Kritische digitalisierungsrelevante Rohstoffe	26	41	13	35
... davon seltene Erden	0,06	0,07	0,05	0,08
... davon Platingruppenmetalle	0,0005	0,0006	0,0004	0,0005
Andere digitalisierungsrelevante Rohstoffe	81	112	57	82

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

Betrachtet man hiervon wiederum ausgesuchte Rohstoffe im Detail und wie ihr Bedarf durch die Nutzung der verschiedenen Endgeräte beeinflusst wird, ergibt sich das Bild wie in Tabelle B-34 dargestellt. Für 30 Minuten digitales Lesen fallen neben Lithium und Kupfer, die für alle Fallstudien als relevante Rohstoffe betrachtet werden, weitere sechs Rohstoffe spezifisch für den Anwendungsfall besonders ins Gewicht. Diese Auswahl erfolgte durch eine Gegenüberstellung der für den Anwendungsfall benötigten Ressourcenmenge und deren globaler jährlicher Produktion/Entnahme. Generell kann auch auf diesem Level der Betrachtungstiefe der Laptop mit den höchsten Rohstoffbedarfen für den Anwendungsfall assoziiert werden. Jedoch kann für den Rohstoff Tantal auch beobachtet werden, dass das Tablet und der Endgerätemix mit höheren Bedarfen aufwarten. Tantal ist ein wichtiger Bestandteil von Kondensatoren, wie sie beispielsweise für die Leiterplatten in den Endgeräten benötigt werden.

Tabelle B-34: 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	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 Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Insgesamt lässt sich für den Bedarf an Rohstoffen und ungenutzter Materialentnahme erkennen, dass die Nutzung eines Laptops zum digitalen Lesen die höchsten Werte für die Rohstoffintensität aus der Herstellung aufweist. Dies ist jedoch bei spezifischer Betrachtung einzelner Rohstoffe nicht unbedingt der Fall.

B.3.3.4.1.2 Nutzungsphase

Das halbstündige Lesen von digitalen Medien bedingt je nach betrachtetem Endgerät und den durchgeführten Berechnungen in diesem Vorhaben einen **Primärrohstoffeinsatz zwischen 6,8 g und 8,6 g** in der Nutzungsphase. Dieser wird in allen untersuchten Szenarien hauptsächlich durch den Energiebedarf der End- und Netzwerkzugangsgeräte der Lesenden bedingt. Der durch die Modellierung errechnete Gesamtprimärmaterialaufwand beläuft sich je nach Endgerät auf zwischen **9,0 g und 11,3 g**.

Tabelle B-35: Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase je Szenario und Netzwerkkomponente zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm

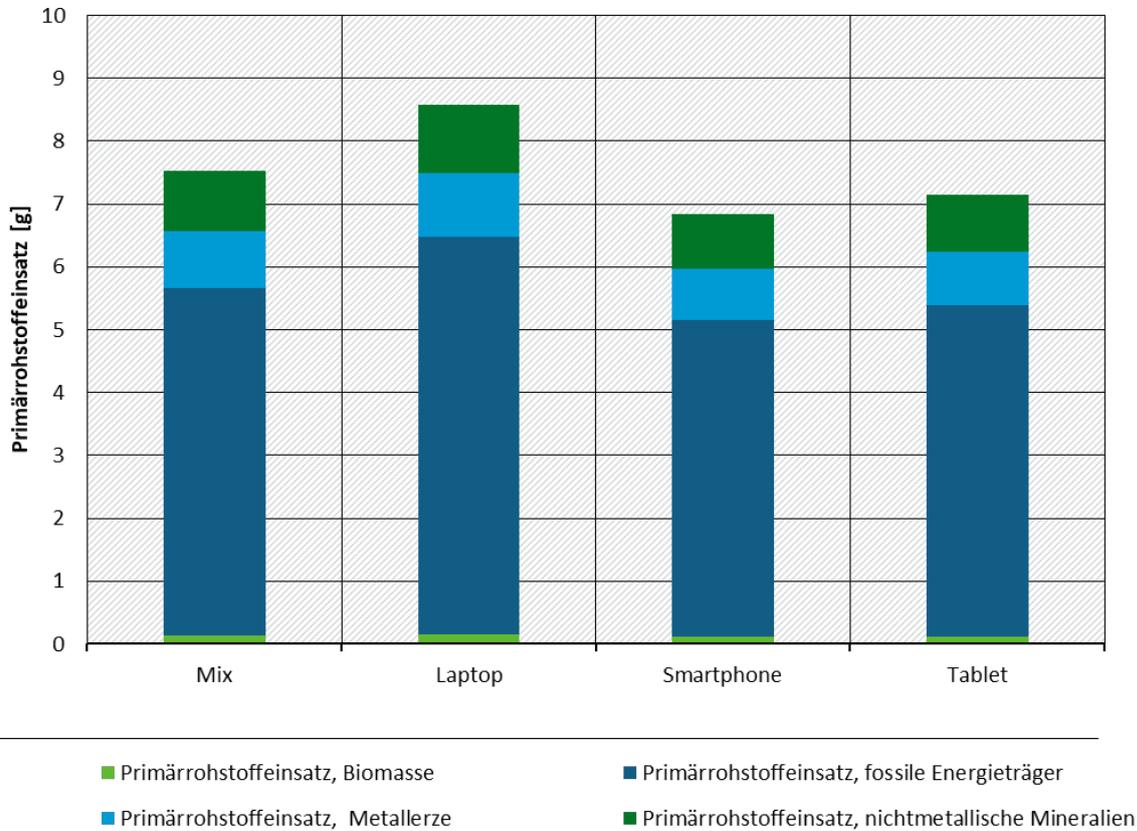
	Mix	Laptop	Smartphone	Tablet
Energiebedarf Router	3,55	3,55	3,55	3,55
Rechenzentrum	2,73	2,73	2,73	2,73
Energiebedarf Endgerät	1,23	2,30	0,55	0,87
Übertragungsnetzwerk	0,004	0,004	0,004	0,004

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

Abbildung B-33 zeigt die Anteile der verschiedenen Rohstoffarten am Gesamtwert des Primärrohstoffeinsatzes der Nutzungsphase. Der Primärrohstoffeinsatz wird in der Nutzung lediglich durch die Strombedarfe der End- und Netzwerkzugangsgeräte sowie der Internetnutzung bedingt. Daher sind die Anteile durch den zugrundeliegenden Strommix

geprägt. Der deutsche Strommix ist stark durch die Verwendung fossiler Energieträger geprägt. Hieraus ergibt sich deren anteilige Dominanz am Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase.

Abbildung B-33: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm



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

Tabelle B-36: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in Gramm – Tabelle zu Abbildung B-33

Nutzung [g]	Primärrohstoffeinsatz, Biomasse	Primärrohstoffeinsatz, fossile Energieträger	Primärrohstoffeinsatz, Metallerze	Primärrohstoffeinsatz, nichtmetallische Mineralien
Mix	0,13	5,53	0,90	0,96
Laptop	0,15	6,32	1,02	1,09
Smartphone	0,12	5,03	0,82	0,87
Tablet	0,12	5,27	0,85	0,91

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

B.3.3.4.2 Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Fußabdruck

Die Ergebnisse für den CO₂-Fußabdruck und kumulierten Energieaufwand sind in Tabelle B-37 aufgelistet. Die Nutzung eines Laptops oder Tablets zum digitalen Lesen kann für beide Indikatoren mit dem höchsten Wert assoziiert werden, wohingegen sich für den Produktmix und das Smartphone geringere Werte ergeben. Der kumulierte Energieaufwand wie auch der CO₂-Fußabdruck sind maßgeblich durch die Herstellungsphase geprägt, welche bei beiden Indikatoren für alle untersuchten Endgeräte einen deutlich höheren Wert erzielt als die Nutzungsphase.

Tabelle B-37: Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Fußabdruck zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in kg CO₂-Äq. und Megajoule

Genutztes Endgerät	CO ₂ -Fußabdruck [kg CO ₂ -Äq.]	Kumulierter Energieaufwand [MJ]
Mix	0,029	0,47
Laptop	0,035	0,56
Smartphone	0,023	0,37
Tablet	0,035	0,56

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

Beide Indikatoren weisen durch die Verwendung fossiler Energieträger und dadurch bedingte Treibhausgasemissionen im Allgemeinen eine hohe Korrelation auf (Valente *et al.*, 2018).

B.3.3.4.3 Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial

In Tabelle B-38 sind die errechneten Ergebnisse für den Wasserfußabdruck und das Landnutzungspotenzial des untersuchten Anwendungsfalls abgebildet. Erneut ist die Nutzung eines Laptops mit den höchsten und die des Smartphones mit den geringsten potenziellen Umweltfolgen verbunden. Die Ergebnisse beider Indikatoren sind maßgeblich durch die Herstellungsphase beeinflusst, welche beim Wasserfußabdruck je nach genutztem Endgerät für mindestens 85 % des errechneten Ergebnisses verantwortlich ist und beim Landnutzungspotenzial für mindestens 70 %. In beiden Kategorien resultieren die Hauptanteile jeweils aus der Herstellung der technischen Komponenten, welche in den Endgeräten verbaut sind.

Tabelle B-38: Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ in cm³ und cm²a

Genutztes Endgerät	Wasserfußabdruck [cm ³]	Landnutzungspotenzial [cm ² a]
Mix	450	16
Laptop	630	21
Smartphone	280	12
Tablet	540	17

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

B.3.3.4.4 Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial

Die vor dieser Untersuchung zu erwartenden Umwelteffekte durch den steigenden Konsum digitaler Medien sind keineswegs eindeutig. Einerseits kann im Vergleich zu klassischen Printmedien davon ausgegangen werden, dass durch die digitale Verteilung journalistischer und publizistischer Erzeugnisse erhebliche Mengen von Papier und Druckerfarbe sowie Energie eingespart werden, welche zur Herstellung klassischer Druckerzeugnisse notwendig sind. Andererseits sind auch digitale Prozesse durch die Herstellung der Endgeräte sowie die Bereitstellung und den Betrieb von Datennetzwerk und Rechenzentren mit erheblichen Rohstoffbedarfen und Umweltfolgen verbunden. Zudem ist zu vermuten, dass durch die niedrighschwellige und oft kostenfreie Verfügbarkeit von Onlinemedien die Nachfrage nach Medien insgesamt verstärkt wird, was potenziell die zu erwartenden Umweltbelastungen erhöht.

Aus den Ergebnissen dieser Fallstudie lassen sich keine generellen Schlüsse für das Umweltentlastungspotenzial des Anwendungsfalls ziehen, da kein direkter Vergleich zum potenziellen Referenzszenario (im vorliegenden Fall: Lesen von klassischen Print-Publikationen) gezogen wurde. Aus der Literatur lassen sich jedoch Vergleiche bezüglich des CO₂-Fußabdrucks von digitalem Lesen und analoger Referenzszenarien ausmachen (vgl. hierzu z. B. Moberg *et al.*, 2007; Aigner, 2018). Hier deuten die Ergebnisse darauf hin, dass das Lesen digitaler Medien mit einem geringeren CO₂-Fußabdruck assoziiert werden kann als der Konsum konventioneller Print-Produkte.

Bezüglich der Ausgestaltung des Anwendungsfalls digitale Medien kann die vorliegende Studie jedoch Aussagen über das Umweltentlastungspotenzial treffen. So wurde analysiert, dass die Herstellung der genutzten End- und Netzwerkzugangsgereäte einen entscheidenden Einfluss auf den Rohstoffbedarf und die Umweltfolgen des Anwendungsfalls hat. Das Potenzial des Anwendungsfalls zur Umweltentlastung hängt daher auch davon ab, welche Geräte für die Anwendung genutzt werden und wie es um das Nutzungsprofil der Geräte bestellt ist. Hierbei scheinen größere Geräte wie Laptops und Tablets mit höheren Rohstoffbedarfen und Umweltfolgen einherzugehen als kleinere Geräte wie Smartphones – trotz der Unterschiede in ihrer Nutzungsdauer. Welcher Teil der Aufwände der Herstellung eines Endgeräts dem einzelnen Anwendungsfall zugerechnet werden kann, ist jedoch immer von der individuellen Nutzung abhängig. Wird ein Endgerät mit hoher Frequenz und für viele verschiedene Anwendungsfälle genutzt, reduziert sich die Menge der Aufwände, welche der einzelnen Nutzung zugerechnet werden können, drastisch. Daher deuten die Ergebnisse der vorliegenden Studie darauf hin, dass das Umweltentlastungspotenzial des Anwendungsfalls erhöht werden kann, indem kleine und multifunktionale Geräte zum Lesen von digitalen Medien genutzt werden.

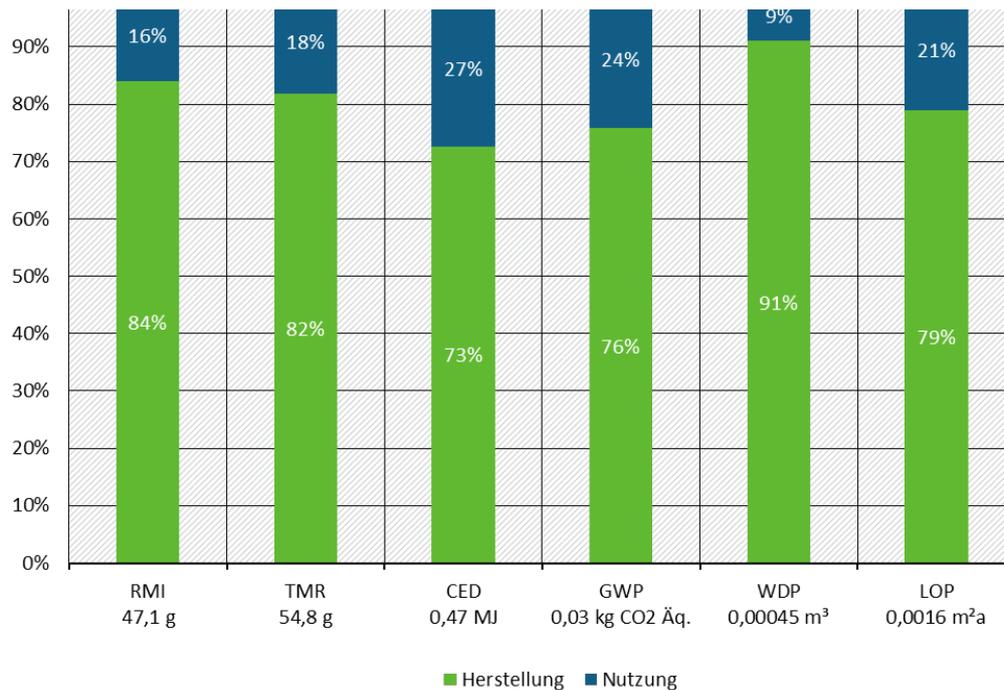
B.3.3.5 Schlussbetrachtungen und Fazit zur Fallstudie

Da die betrachteten Indikatoren in unterschiedlichen Einheiten bemessen werden und teilweise verschiedene Schutzbereiche betreffen, ist ein direkter Vergleich zwischen den Kategorien nur über Umwege wie den einer Normalisierung möglich, was den Fokus weg von Ressourcenintensität auf Sachbilanzebene hin zu einem vergleichenden Index zwischen LCA-Wirkungskategorien verschieben würde. Abbildung B-34 konzentriert sich daher exemplarisch für das Endgeräte-Mix Szenario vergleichend für alle betrachteten Indikatoren auf die Aufteilung der berechneten Ressourcenintensitäten und Wirkkategorien nach Lebenszyklusphasen. Es ist deutlich zu erkennen, dass über alle Indikatoren hinweg die Herstellungsphase dominant ist. Während für den CO₂-Fußabdruck und den kumulativen Energiebedarf die Nutzenphase noch

den relevantesten Anteil unter allen untersuchten Indikatoren erreicht, nimmt sie beim Wasserfußabdruck mit weniger als 10 % einen geringen Einfluss auf das Gesamtergebnis des Indikators.

Wie bereits zuvor erläutert, quantifiziert die Fallstudie keine Abfall- oder Recyclingprozesse. Auf Basis bisheriger Studien kann jedoch angenommen werden, dass der Beitrag im Vergleich zu Herstellung aber auch Nutzung wenig relevant ist.

Abbildung B-34: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase*



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

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

Tabelle B-39: Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „30 Minuten Lesen digitaler Medien“ absolut und in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase – Tabelle zu Abbildung B-34

Indikator	Herstellung	Nutzung
RMI: 47,1 g	39,56 (84%)	7,54 (16%)
TMR: 54,8 g	44,736 (82%)	9,964 (18%)
CED: 0,47 MJ	0,3401 (73%)	0,1279 (27%)
GWP: 0,03 kg CO ₂ -Äq.	0,0228 (76%)	0,0072 (24%)
WDP: 0,00045 m ³	0,0004095 (91%)	0,0000405(9%)
LOP: 0,0016 m ² a	0,001264 (79%)	0,000336 (21%)

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

Das digitale Lesen von Nachrichten, aber auch Magazinen und anderen Publikationen ist inzwischen aus dem Alltag der meisten Deutschen nicht mehr wegzudenken. Vor diesem Hintergrund beschäftigt sich die vorliegende Studie mit der Frage, mit welcher Ressourcenintensität und ausgewählten anderen Umweltwirkungen diese Form des digitalen Wandels in unserer Gesellschaft einhergeht. Die errechneten Rohstoffbedarfe und potenziellen Umweltfolgen für die Untersuchungseinheit mögen für sich allein nicht hoch erscheinen. Jedoch ist davon auszugehen, dass der betrachtete Anwendungsfall in Deutschland täglich millionenfach auftritt, denn an einem durchschnittlichen Wochentag konsumieren 77 % der Deutschen per Laptop, 69 % per Smartphone und 35 % per Tablet digitale Medien (BVDW, 2018). Rechnet man überschlägig den Primärrohstoffeinsatz des Anwendungsfalls mit dem Endgeräte-Mix hoch auf den wöchentlichen Bedarf in Deutschland (84 Mio. Einwohner), wenn beispielsweise 75 % der Deutschen täglich 30 Minuten digital Lesen, ergibt sich ein Primärrohstoffeinsatz von 20.771,1 t pro Woche (für Herstellung und Nutzung kombiniert). Es ist bei der Interpretation dieser Zahl jedoch zu berücksichtigen, dass ein Großteil dieses Rohstoffbedarfs auf die Produktionsphase der Endgeräte entfällt. Digitale Endgeräte sind in vielen deutschen Haushalten inzwischen omnipräsent – es ist davon auszugehen, dass viele dieser Geräte auch ohne den Anwendungsfall zum digitalen Lesen von Nachrichten nachgefragt werden würden. Jedoch müssen, um die Rohstoffbedarfe und Umweltfolgen digitaler Anwendungen sinnvoll zu bilanzieren, auch die Folgen der Herstellungsphase anteilig den einzelnen Verwendungen zugeschrieben werden, da die Summe der Verwendungen im Endeffekt die Notwendigkeit der Herstellung eines Endgeräts bedingt.

Zur Einordnung der Ergebnisse sind die Limitationen der vorliegenden Studie zu berücksichtigen. Da kein konkreter Anwendungsfall aus der Realität, sondern ein konstruierter, für das Untersuchungsvorhaben möglichst repräsentativer Anwendungsfall betrachtet wurde, beruhen viele der Inputwerte der verwendeten Modellierung auf Durchschnittswerten und Annahmen. Zudem wurde, um die vorliegenden Ergebnisse nicht mit erhöhter Unsicherheit zu belasten, auf die Berücksichtigung und Allokation der Herstellung von Übertragungsnetzen und Rechenzentren verzichtet. Die Ergebnissensitivität bezüglich der Herstellung der Rechenzentren wurde über eine Abschätzung mittels ADP und GWP auf Basis der Daten aus Gröger *et al.*, (2021) durchgeführt. Auch wenn Rechenzentren einen relevanten Ressourcenfußabdruck aufweisen, ist dieser im Kontext der hier betrachteten Anwendung sehr gering (0,6 % für ADP, bzw. 0,8 % für

GWP bezogen auf die gesamte Herstellungsphase des Endgeräte-Mix²⁵). Weiterhin kann eine überschlägige Abschätzung für die Verwendung von mobilem Internet statt der heimischen Festnetz-Internetverbindung auf Basis bestehender Untersuchungen getroffen werden (Gröger *et al.*, 2021). Für das Smartphone-Szenario wurde ermittelt, dass der Energiebedarf für die Datenübertragung mit einer Festnetz-Internetverbindung 0,01 % des Gesamtergebnisses (Primärrohstoffeinsatz) ausmacht. Unter Verwendung des energieintensiveren mobilen 4G-Netzes entfallen für dieselbe Menge übertragener Daten rund 0,1 % des Primärrohstoffeinsatz auf die Datenübertragung.

Die Nachfrage nach digitalen Nachrichten ist ungebrochen hoch. Zudem lassen sich zukünftig weitere Entwicklungspotenziale für digitales Lesen erkennen. Im Jahr 2018 gaben 35 % der Deutschen an, E-Books zu lesen (BVDW, 2018). Insgesamt lesen jedoch 85 % der Deutschen regelmäßig Bücher (Bitkom, 2022). Es ist zu erwarten, dass sich mit generell fortschreitender Digitalisierung von Prozessen auch diese Anwendung weiter ausbreiten wird. Vor diesem Hintergrund werden neben Fragen nach Rohstoffbedarfen und potenziellen Umweltfolgen auch zunehmend andere Aspekte digitalen Medienkonsums in den Fokus rücken.

B.3.4 Fallstudie *E-Grocery*: Online-Lebensmittelhandel

B.3.4.1 Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung

Die deutsche Supermarktkette REWE gibt auf ihrem Onlineauftritt an, dass ihr Lieferservice die Energie- und Umweltbilanz von Lebensmitteleinkäufen positiv beeinflusst, da eingehende Bestellungen zu einer Liefertour zusammengefasst werden können und so die resultierende Energiebilanz des Lebensmitteltransports geringer ausfällt, als wenn jede Kundin und jeder Kunde mit dem Pkw selbst zum nächstliegenden Markt der Kette fahren würde²⁶. Tatsächlich haben deutsche Städte mit einer zunehmenden Umweltbelastung durch innerstädtischen Verkehr zu kämpfen und gemessen am Verkehrsaufkommen des motorisierten Individualverkehrs in Deutschland (2017) entfällt laut amtlicher Statistik knapp ein Fünftel (17,5 %) des Verkehrs auf Einkaufsfahrten (BMDV, 2017). Insofern die streckenoptimierten Touren der Lebensmittel-Lieferservices Einkaufsfahrten von Kundschaft ersetzen, bietet die Lieferung von Lebensmitteln anstelle des Einkaufs vor Ort im Supermarkt durchaus die Chance, den Verkehr in den Städten merkbar zu reduzieren (Hardi & Wagner, 2019).

Insgesamt ist der Umsatz mit Lebensmitteln im deutschen Onlinehandel nicht zuletzt durch die Covid-19 Pandemie in den letzten Jahren stark angestiegen. Lag der Umsatz im Jahr 2019 noch bei 1.595 Mio. Euro, wurden im Jahr 2021 bereits 3.912 Mio. Euro umgesetzt (Statista, 2022a). Sollte sich dieses Wachstum weiter fortsetzen, könnten Lebensmittel-Lieferdienste bald ein fester Bestandteil der Lebensmittelversorgung vieler deutscher Haushalte sein. Laut einer Studie könnte *E-Grocery* bis zum Jahr 2030 in Deutschland einen Marktanteil von 10 bis 15 % erreichen (Adam, 2022).

²⁵ Verglichen wurden ADP und GWP der Herstellung des Endgeräte-Mix Szenarios mit den Werten, welche die zum Vergleich verwendete Studie für die Herstellung eines Rechenzentrums auf eine halbe Stunde Videokonferenznutzung angibt. Für den vorliegenden Anwendungsfall ist der allokierte Wert der Rechenzentrumsherstellung überschätzt, da bei einer Videokonferenz ständig mit dem Rechenzentrum kommuniziert wird, wohingegen beim digitalen Lesen lediglich eine Abfrage pro gelesenen Artikel stattfindet. Es ist also davon auszugehen, dass die tatsächliche Relevanz der Herstellung des Rechenzentrums für den hier untersuchten Anwendungsfall noch geringer ist als hier abgeschätzt.

²⁶ <https://www.rewe.de/nachhaltigkeit/nachhaltig-einkaufen/transport-und-verarbeitung/> (Stand: 25. Januar 2023)

Online-Lebensmittelhandel als spezieller Anwendungsfall des Onlinehandels

Die typische Online-Lebensmittelbestellung besteht aus einer breiten Angebotspalette, welche neben trockenen Lebensmitteln und verschiedenen Haushaltsartikeln auch gefrorene und frische Lebensmittel beinhaltet (Siragusa & Tumino, 2021). Daher muss das Vertriebsnetz der Online-Lebensmittelhändler auf die spezifischen Bedürfnisse der zu transportierenden Waren zugeschnitten sein und unterscheidet sich an vielen Stellen von dem des klassischen Onlinehandels. Im Gegensatz zu diesem befinden sich die Lager, in welchen die Bestellungen zusammengestellt und ausgeliefert werden, in der Regel in urbanen Ballungszentren, um die Transportdistanz zur Kundschaft zu minimieren (Hays *et al.*, 2005; Siragusa & Tumino, 2021). Auch werden im Online-Lebensmittelhandel selten externe Kurierdienste mit dem Transport der Güter beauftragt, sondern eigene Transportflotten betrieben, welche speziell auf den Transport von Lebensmittel ausgelegt sind (durch z.B. integrierte Kühlung). Die Retourenquote fällt im Online-Lebensmittelhandel deutlich geringer (ungefähr 1 %) aus als im klassischen Onlinehandel (Cairns, 2005).

Die Entwicklung der Branche gibt Anlass zu einem genaueren Blick auf Onlinelieferdienste für Lebensmittel. Zwar besteht ein Einsparpotenzial an Einzelfahrten, die Umwelt- und Nachhaltigkeitsaspekte dieses Geschäftsbereichs sind jedoch deutlich weitreichender. So können beispielsweise Logistik, Lager, Transport aber auch die Datenübertragung mehr oder weniger umwelt- und ressourcenschonend gestaltet sein.

B.3.5 Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie

Entsprechend der Vorgehensweise für die Fallstudien bezieht sich die Betrachtung des vorliegenden Anwendungsfalls rein auf die **digitale Lösung E-Grocery** und deren direkt assoziierte Prozesse. Das bedeutet, dass die Betrachtung des Anwendungsfalls an der Stelle ansetzt, an der die Vorketten von stationärem Lebensmittelhandel und *E-Grocery*-Angeboten (elektronischer Lebensmittelhandel) Unterschiede aufweisen. Die Betrachtungsgrenzen umfassen die Prozesse von der Ankunft der Ware im Lager bis zur Kommissionierung der Bestellung und Auslieferung an die Endkundschaft. Die Herstellung und Verpackung der Waren selbst sowie die Transporte und Lagerungen vor der Ankunft der Waren im Lager wurden nicht mitbetrachtet, da diese nicht als spezieller Teil der digitalen Lösung *E-Grocery* angesehen werden, sondern Teil der Lieferkette des etablierten Lebensmittelhandels sind. Die Nutzungs- und Lebensende-Phasen der ausgelieferten Produkte sind ebenso nicht Gegenstand dieser Betrachtung, da auch sie sich im digitalen Anwendungsfall nicht unterscheiden und somit nicht Teil des relevanten Untersuchungsgegenstand im Kontext des Vorhabens sind.

Systematisch kombiniert die Fallstudie bestehende Informationen von realen *E-Grocery*-Anwendungsfällen aus der Fachliteratur mit einer Reihe begründeter Annahmen, um ein Anwendungsszenario für einen *E-Grocery*-Einkauf zu erstellen, welches unter Nutzung von ökobilanziellen Methoden in ein Produktmodell überführt wird, um potenzielle Rohstoffbedarfe und Umweltfolgen des Szenarios zu berechnen. Da an einzelnen Stellen mehrere Optionen zur Gestaltung des Anwendungsszenarios bestehen, wurde in der vorliegenden Fallstudie mit zwei Szenarien gearbeitet, deren Ergebnisse vergleichend dargestellt werden.

B.3.5.1 Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie

B.3.5.1.1 Untersuchungseinheit

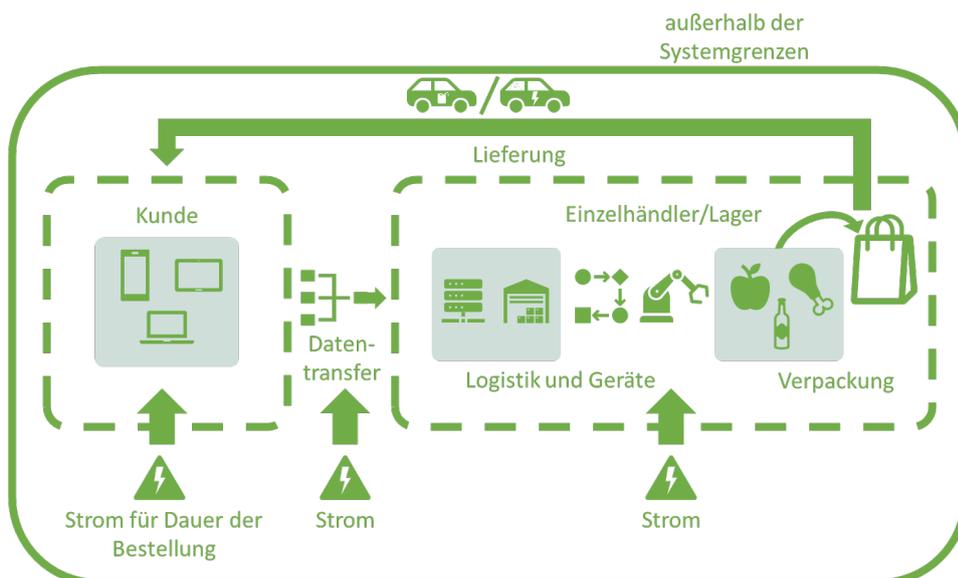
Für die Fallstudie Online-Lebensmittelhandel (*E-Grocery*) wurde folgende Untersuchungseinheit gewählt:

Onlinebestellung, Bereitstellung und Lieferung für eine Online-Lebensmittelbestellung

Hierbei wurde für die Zusammensetzung und Anzahl der Produkte des Warenkorbs ein Wert angenommen, wie er auf Basis verfügbarer Informationen und nach Einschätzung der beteiligten Experten*Expertinnen repräsentativ für eine klassische Online-Lebensmittelbestellung ist. Hierbei sei jedoch betont, dass die reale Zusammensetzung von Warenkörben bei der Online-Lebensmittelbestellung vielfältig ist und daher die Ergebnisse des angenommenen Warenkorbs nicht repräsentativ für alle Warenkörbe sind.

Wie eingangs erwähnt, wurden in der vorliegenden Fallstudie zwei Szenarien erstellt und ausgewertet. Da an relevanten Stellschrauben der Modellierung die Datenlage für eine belastbare Annahme eines Durchschnittswertes nicht als ausreichend angesehen wurde²⁷, wurde ein ressourcenschonendes Szenario, welches an besagten Stellschrauben bzw. Optionen einen Input mit voraussichtlich geringeren Umweltwirkungen annimmt, und ein ressourcenintensives Szenario, welches einen potenziell Ressourcen- und Umweltwirkungsintensiveren Prozess abbildet, entwickelt. Für Prozesse und Inputdaten, für die die Literatur entsprechend belastbare Informationen bot, wurde für beide Szenarien derselbe Wert angenommen. Die Diskrepanz der Ergebnisse der beiden Szenarien kann daher als Andeutung für einen möglichen Ergebnisraum (vergleichbar mit *best* und *worst case*-Szenarien) der Ressourcenbedarfe und Umweltfolgen verschiedener Lebensmittel-Lieferdienstangebote betrachtet werden.

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



²⁷ und beispielsweise bei der Auslieferung der Bestellung mehrere relevante Optionen bestehen (z. B. Auslieferung mit fossil betriebenen Lieferwagen oder mit elektronisch betriebenen Lieferwagen).

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

B.3.5.1.2 Komponenten und betrachtete Systeme

Zur Modellierung der relevanten Prozesse und zur Darstellung des Produktsystems wurde in erster Linie auf eine Publikation von Siragusa und Tumino (2021) zurückgegriffen (Tabelle B-40). Für diese Publikation wurden von der Autorenschaft Primärdaten zu Gebäudemerkmale, Warenströmen, Ausführungszeiten für Tätigkeiten und andere branchenspezifische Eingabedaten von Online-Lebensmittelhändlern in Italien gesammelt und zu einem Anwendungsfall kombiniert. Da die in dieser Publikation vorhandene Daten nicht ausreichend waren, um den Anwendungsfall im Rahmen dieser Fallstudie ausreichend zu modellieren, wurden sie mit einer Reihe von Annahmen bzw. Informationen aus grauer Literatur in den beiden Szenarien kombiniert.

Tabelle B-40: Aus der Literatur entnommene Input-Werte, die zur Modellierung der Fallstudie „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ verwendet wurden

Art der Nutzung	Wert	Einheit
Durchschnittl. Stückzahl pro Bestellung	65	Stück/Bestellung
Lager	5.000	m ²
Durchschnittliche Strecke pro Zustellroute	60	km
Durchschnittliche Anzahl von Auslieferungen pro Zustellroute	12	Lieferungen
Stromversorgung der Geräte, die während der Online-Aktivitäten der Kunden 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
Verbrauch der Lagerhäuser	82,06	kWh/m ³ a

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach Siragusa und Tumino (2021)

Bezogen auf Onlinekäufe ergeben sich Umweltwirkungen aus der IKT-Nutzung verbraucherseitig sowie nicht-verbraucherseitig zum großen Teil aus dem Energiebedarf in der Nutzungsphase (Gröger *et al.*, 2021). Verbraucherseitig ist hier die Leistungsaufnahme der für die Dauer der Bestellung genutzten Endgeräte zu berücksichtigen. Ebenso verfügt der Online-Einzelhandel über Endgeräte, um die Bestellungen anzunehmen und zu verarbeiten – auch hierfür ist die Leistungsaufnahme der Geräte für die Dauer der Bestellung zu berücksichtigen. Werte für die Leistungsaufnahmen der jeweiligen Endgeräte wurden aus der Literatur identifiziert und als Basis der Modellierung genutzt. Für die Nutzungsdauer der privaten Endgeräte, wie auch für die Endgeräte im Einzelhandel wurde jeweils eine Annahme getroffen, welche einen geringeren Wert für das ressourcenschonende Szenario (Annahme: übersichtlicher aufgebaute Webpage und effizienterer Einkaufsprozess) und einen höheren Wert für das ressourcenintensive Szenario vorsieht.

Um die Bestellseiten der Einzelhändler*innen auf den Endgeräten der Verbraucher*innen aufrufen zu können sowie zum Übertragen von Bestellungen an den Einzelhandel werden digitale Infrastrukturen und Kapazitäten in Rechenzentren genutzt. Beim Aufrufen der Seite und

Füllen und Absenden des Warenkorbs führen Kunden* Kundinnen mehrere *Web-Requests* (Websiteabfragen) durch. Der Energieverbrauch für einzelne *Web-Requests* ist schwer zu quantifizieren und hängt von vielen Faktoren ab, wie der genauen Art der Anfrage, der Größe der übertragenen Datenpakete, der Technologie der Server und Netzwerke, die verwendet werden, u. v. m. Da diese Faktoren zwischen den verschiedenen Websites der Einzelhändler*innen stark schwanken können und keine ausreichenden Primär- oder Literaturdaten zur Verfügung standen, wird an dieser Stelle mit unterschiedlichen Werten für die beiden Szenarien gearbeitet. Der höhere dieser Werte beruht auf einer Schätzung zum Strombedarf einer Suchanfrage bei Google, für das andere Szenario wurde ein um den Faktor 10 niedrigerer Wert angenommen. Im ressourcenschonenden Szenario wurde zudem ein effizienterer Websiteaufbau angenommen, sodass hier halb so viele *Web-Requests* für den Online-Einkauf angenommen wurden als im ressourcenintensiven Szenario. Die angenommenen Werte sind in Tabelle 43 aufgeführt.

Nach Eingang der Bestellung wird beim Einzelhändler*innen der Bearbeitungsprozess in Gang gesetzt, der das Zusammenstellen und Verpacken der Bestellung umfasst. Hierbei bestehen in realen Anwendungsfällen stark unterschiedliche Grade der Automatisierung. Um diesen Umstand zu berücksichtigen, wurden auch hier unterschiedliche Annahmen für die zwei Szenarien getroffen. Im ressourcenschonenden Szenario wird davon ausgegangen, dass die Kommissionierung der Bestellungen sowie das Wiederauffüllen der Waren in den Regalen in manueller Arbeit erfolgen, wohingegen im ressourcenintensiven Szenario die Nutzung eines Kommissionierers und eines Gabelstaplers für je fünf Minuten angenommen wurden. Bezüglich der Transportverpackung der Waren wurde angenommen, dass hierfür Papiertragetaschen zum Einsatz kommen, was derzeit dem Standard bei Online-Lebensmittelbestellung entspricht. Um dennoch verschiedene mögliche Intensitäten von Umweltwirkungen abzubilden, wird im ressourcenschonenden Szenario angenommen, dass zum Verpacken der Waren lediglich vier Papiertragetaschen zum Einsatz kommen, wohingegen im ressourcenintensiven Szenario von acht Papiertragetaschen ausgegangen wird.

Für die Auslieferung der Bestellungen kommen mehrere Optionen und Transportmittel in Frage. Besonders *E-Grocery*-Anbieter in urbanen Räumen, bei welchen eine geringe durchschnittliche Stückzahl an Artikeln pro Bestellung anfällt, bieten den Service die Lieferungen einzeln und innerhalb kurzer Zeit nach der Bestellung auszuliefern. Dies geschieht oft mit Lastenrädern oder kleineren elektrischen oder fossil betriebenen Pkw. Andere Anbieter haben feste Lieferfenster mit höherem zeitlichem Abstand zur Bestellung und weisen in der Regel höhere durchschnittliche Artikelzahlen pro Bestellung auf. Bestellungen werden dort in der Regel nicht einzeln ausgeliefert, sondern in Routen zusammengefasst. Hierbei kommen für die Auslieferung oft Lieferwägen oder kleine Trucks zum Einsatz, welche elektrisch oder fossil betrieben werden können. Andere Anbieter mischen Elemente der eben beschriebenen Lösungen. Um die Annahmen der beiden Szenarien mit der verwendeten durchschnittlichen Bestellmenge und Lieferstrecke aus Siragusa und Tumino (2021) zu harmonisieren, wurde angenommen, dass die Auslieferung in Routen erfolgt und hierzu ein kleiner Lieferwagen genutzt wird. Für den Lieferwagen wurde im ressourcenschonenden Szenario ein elektrischer Antrieb angenommen, wohingegen im ressourcenintensiven Szenario ein Diesel-Lieferwagen angenommen wurde. Mangels vergleichbarer Datensätze für beide Varianten, die sich in die Modellierweise der Fallstudie einfügen, wurden Datensätze für Pkws verwendet. Es ist daher davon auszugehen, dass Ressourcenbedarf und Umweltwirkungen der Lieferung potenziell leicht unterschätzt sind, da die Anzahl der Lieferungen pro Tour gleichbleibt.

Neben der beschriebenen Bestell- und Lieferschritte ist auch der Betrieb des Lagers, in welchem die Waren angenommen, gelagert und für die Auslieferung kommissioniert werden, in die Modellierung zu integrieren. Bisherige Erkenntnisse aus der Fachliteratur lassen erwarten, dass

durch den Betrieb des Lagers, welcher z. B. Wärmeenergie zum Heizen, wie auch elektrische Energie zur Durchführung digitaler Prozesse, zum Betrieb von Maschinen und zur Kühlung von verderblichen Waren umfasst, einen großen Teil der Umweltfolgen bedingen. Für Grundfläche und Energiebedarf pro Kubikmeter der Lager wurde in beiden Szenarien mit den von Siragusa und Tumino (2021) gesammelten Primärdaten gearbeitet. Da dort zur Höhe des Lagers keine Angaben gemacht wurden, wurde für das ressourcenschonende Szenario ein niedrigerer Wert (d. h. geringeres Gesamtvolumen) angenommen als im ressourcenintensiven Szenario (d. h. größeres Gesamtvolumen und somit höherer Energiebedarf pro m³).

Alle beschriebenen Inputwerte sind auch Tabelle B-40 und Tabelle B-41 zu entnehmen.

Tabelle B-41: 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 Tag	1000	500
Bestelldauer Endkunde	15 min	30 min
Nutzungsdauer IT Einzelhändler	1 min	5 min
Strombedarf Website-Request	0,03Wh	0,3 Wh
Anzahl Website-Requests/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 Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach Siragusa und Tumino (2021)

B.3.5.2 Ergebnisse zur Ressourcenintensität

B.3.5.2.1 Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme

Der errechnete Primärrohstoffeinsatz und der Gesamtprimärmaterialaufwand der beiden Szenarien sind in Tabelle B-42 dargestellt. Es wird ersichtlich, dass sich für beide Indikatoren die resultierenden Werte der beiden Szenarien deutlich unterscheiden. Das ressourcenintensive Szenario zeigt jeweils einen um über 200 % höheren Wert als das ressourcenschonende Szenario. Somit zeigt sich deutlich, dass die Höhe des Rohstoffbedarfs von E-Grocery-Angeboten maßgeblich von deren Ausgestaltung abhängt.

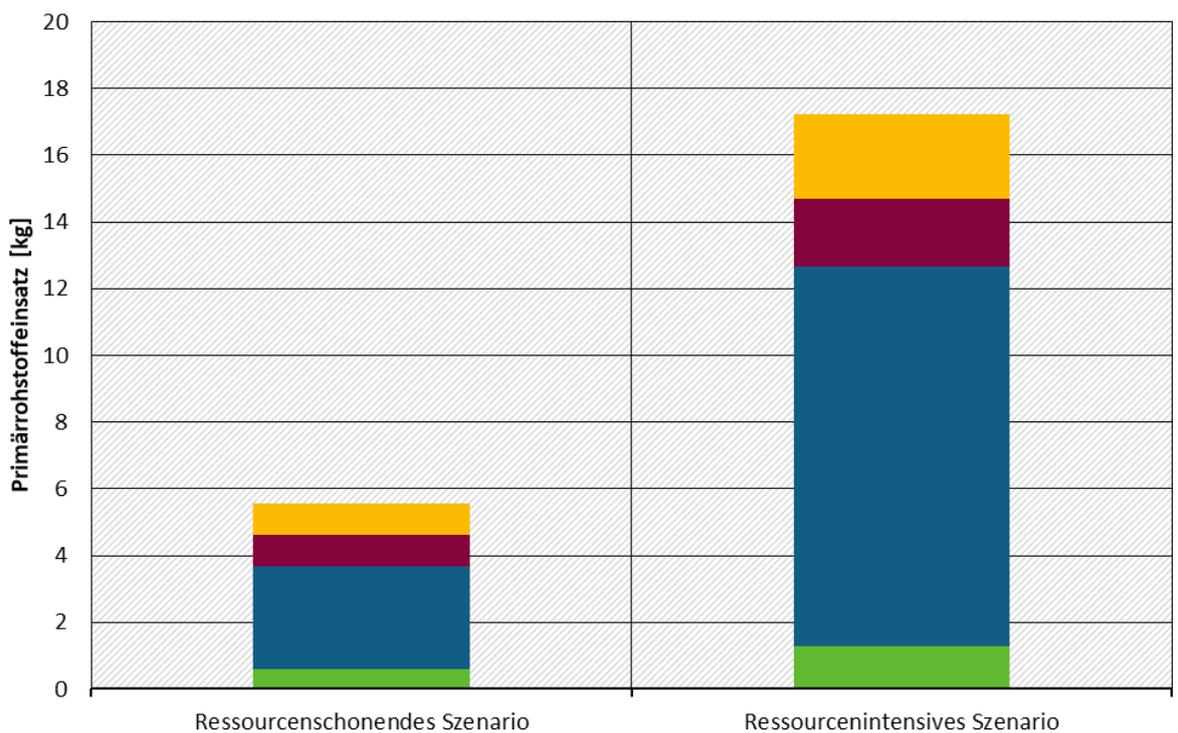
Tabelle B-42: Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand des ressourcenschonenden und ressourcenintensiven Szenarios zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Kilogramm

Szenario	Primärrohstoffeinsatz [kg]	Gesamtprimärmaterialaufwand [kg]
Ressourcenschonendes Szenario	5,6	7,4
Ressourcenintensives Szenario	17,2	22,9

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

Betrachtet man die Zusammensetzung des errechneten Primärrohstoffeinsatzes für die beiden Szenarien (Abbildung B-36) zeigt sich, dass ein Großteil des Primärrohstoffeinsatzes aus fossilen Quellen stammt, welcher in beiden Szenarien maßgeblich durch den Energiebedarf des Lagers verursacht wird. Im ressourcenschonenden Szenario wird prozentual ein größerer Anteil (11 %) des Bedarfs an fossilen Primärrohstoffen durch die Lieferung verursacht, die absolute Höhe des fossilen Primärrohstoffeinsatzes durch den Transport ist jedoch für beide Szenarien ähnlich (0,34 kg gegenüber 0,36 kg).

Abbildung B-36: Aufteilung des Primärrohstoffeinsatzes für das ressourcenschonende und -intensive Szenario zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Kilogramm



- Primärrohstoffeinsatz, Biomasse
- Primärrohstoffeinsatz, fossile Energieträger
- Primärrohstoffeinsatz, Metallerze
- Primärrohstoffeinsatz, nichtmetallische Mineralien

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

Tabelle B-43: Aufteilung des Primärrohstoffeinsatzes für das ressourcenschonende und -intensive Szenario zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Kilogramm – Tabelle zu Abbildung B-36

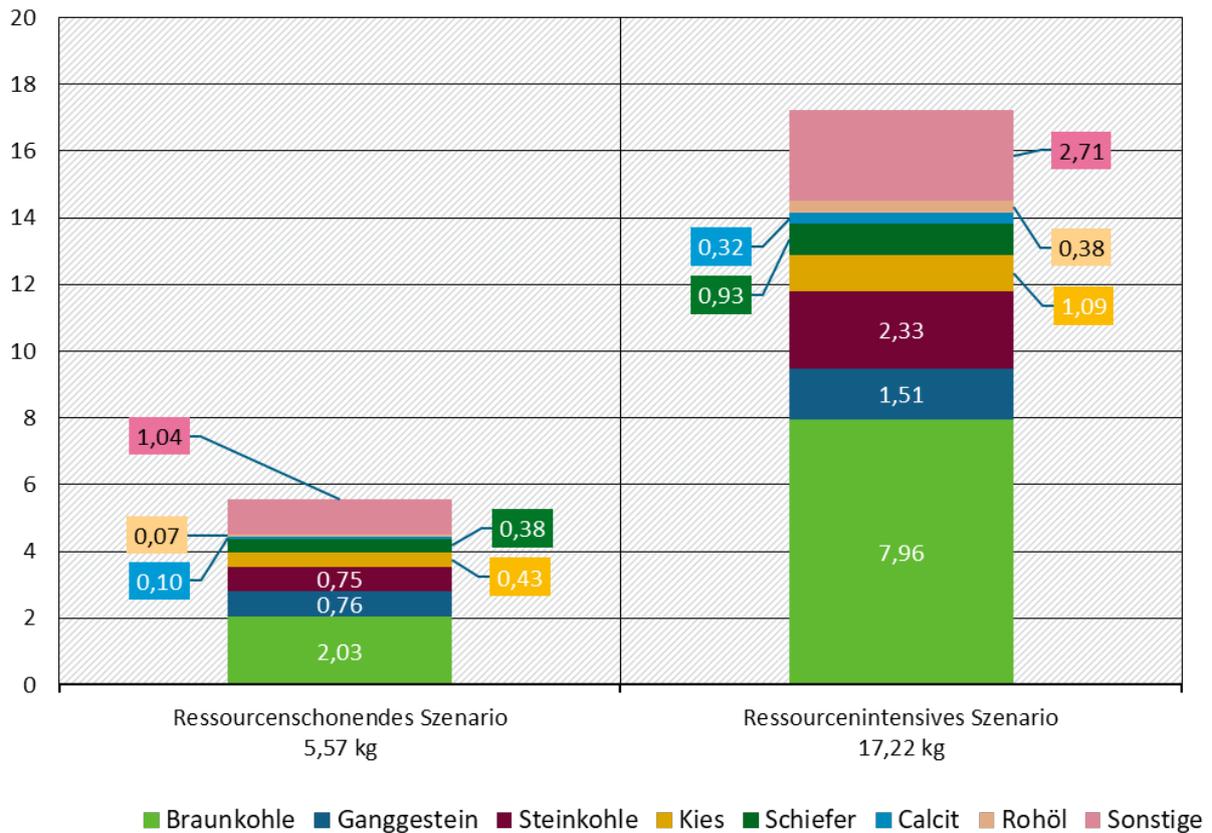
Rohstoffgruppe	Ressourcenschonendes Szenario [kg]	Ressourcenintensives Szenario [kg]
Primärrohstoffeinsatz, Biomasse	0,59	1,29
Primärrohstoffeinsatz, fossile Energieträger	3,07	11,37
Primärrohstoffeinsatz, Metallerze	0,97	2,02
Primärrohstoffeinsatz, nichtmetallische Mineralien	0,94	2,54

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

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 B-37) des gesamten RMIs aus und im ressourcenintensivem 87 % (14,9kg, vgl. Abbildung B-37). Bezogen auf ihre Masse sind in beiden Szenarien die Rohstoffe Braunkohle, Ganggestein, Steinkohle, Kies, Schiefer, Calcit und Rohöl am stärksten vertreten. Abbildung B-37 zeigt jeweils die Aufteilung der Massenbedarfe an Rohstoffen für beide Szenarien. Es ist deutlich zu erkennen, dass sonstige Rohstoffe in beiden Szenarien bei einer rein massenmäßigen Betrachtung der Inputs eine untergeordnete Rolle spielen.

Die unterschiedlichen Beiträge der einzelnen Komponenten des Produktsystems zum Primärrohstoffeinsatz sind zusammen mit denen für die weiteren Indikatoren abschließend in Abbildung B-38 dargestellt.

Abbildung B-37: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Kilogramm



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

Tabelle B-44: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Kilogramm – Tabelle zu Abbildung B-37

	Ressourcenschonendes Szenario [kg]	Ressourcenintensives Szenario [kg]
Braunkohle	2,03	7,96
Ganggestein	0,76	1,51
Steinkohle	0,75	2,33
Kies	0,43	1,09
Schiefer	0,38	0,93
Calcit	0,10	0,32
Rohöl	0,07	0,38
Sonstige	1,04	2,71

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

Da neben den massenmäßig relevanten Rohstoffen auch andere Rohstoffe relevant sein können, welche zwar in deutlich geringeren Mengen eingesetzt werden, jedoch aufgrund ihrer

Verfügbarkeit und Bedeutung für die Digitalisierung eine zentrale Rolle einnehmen, wurde auch die Gruppe besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe einer Betrachtung unterzogen. Tabelle B-45 zeigt die erforderliche Menge dieser Rohstoffe für beide Szenarien. Hier ist ersichtlich, dass sich im ressourcenintensiven Szenario ein im Verhältnis deutlich höherer Bedarf an diesen Ressourcen ergibt. Somit ist auch im Falle dieser ausgewählten Rohstoffe die Intensität deutlich von der Ausgestaltung des Anwendungsfalls abhängig.

Tabelle B-45: Erforderliche Menge digitalisierungsrelevanter Rohstoffgruppen in dem ressourcenschonenden und -intensiven Szenario zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Milligramm

Rohstoffgruppe	Aufwendung der Rohstoffgruppe pro Szenario [mg]	
	Ressourcenschonendes Szenario	Ressourcenintensives Szenario
Kritische digitalisierungsrelevante Rohstoffe	500	1.100
... davon seltene Erden	20	30
... davon Platingruppenmetalle	0,006	0,05
Andere digitalisierungsrelevante Rohstoffe	6.400	11.000

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

Tabelle B-46 zeigt für ausgewählte digitalisierungsrelevante Rohstoffe die eingesetzte Menge zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit. Als im Verhältnis zur verfügbaren Menge des Rohstoffs besonders relevant wurden Gallium, Scandium, Tantal, Lithium, Nickel und Kupfer identifiziert. Treibende Modellbestandteile für den Bedarf dieser Rohstoffe sind der Energiebedarf des Lagers, der Transport (allokierte Herstellung und Betrieb des Lieferwagens) und die Papiertragetaschen – hierbei sind die Anteile und Reihenfolge je nach betrachtetem Rohstoff unterschiedlich. Gerade im ressourcenschonenden Szenario fällt jedoch auf, dass der Transport bei allen ausgewählten digitalisierungsrelevanten Rohstoffen eine wichtige Rolle spielt. Zu erklären ist dies durch den erhöhten Bedarf digitalisierungsrelevanter Rohstoffe von E-Mobilität im Vergleich zum Verbrenner, welcher im ressourcenintensiven Szenario angenommen wurde.

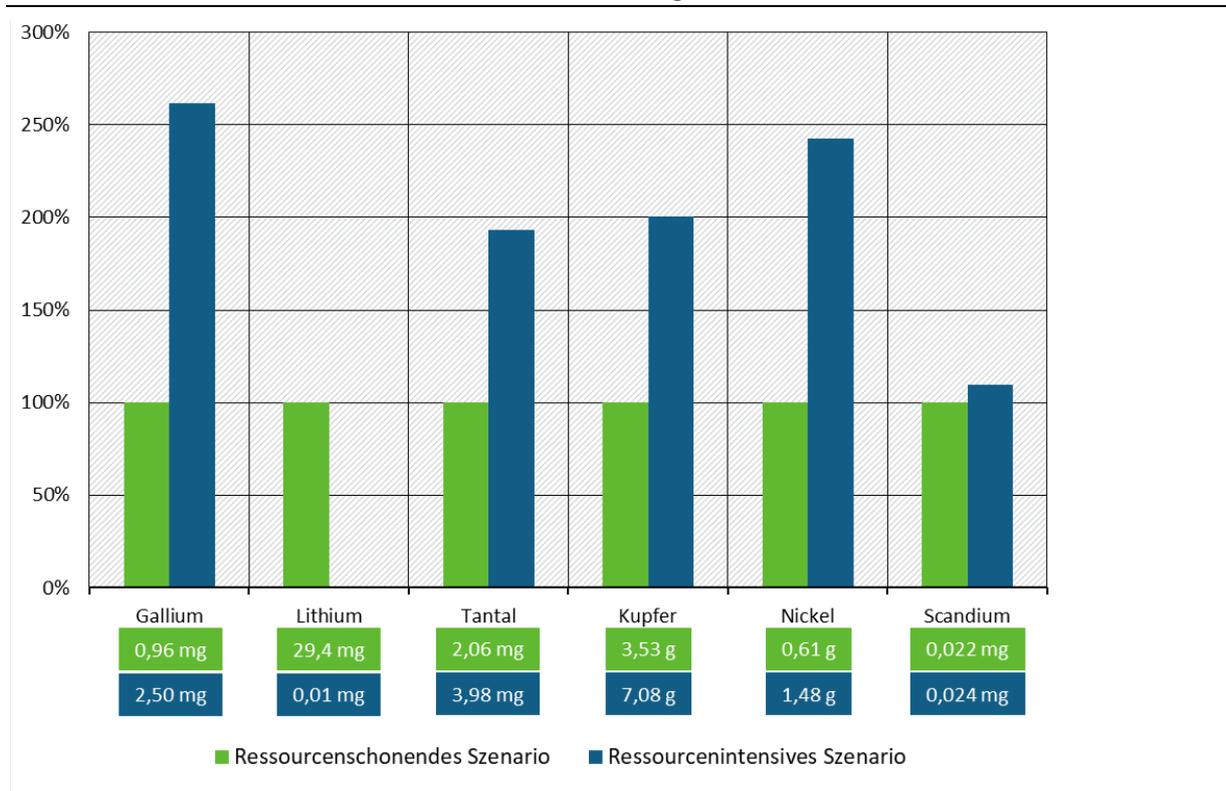
Tabelle B-46: Ausgewählte digitalisierungsrelevante Rohstoffe und ihre eingesetzte Menge zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in dem ressourcenschonenden und -intensiven Szenario in Milligramm

Rohstoff	Ressourcenschonendes Szenario	Ressourcenintensives Szenario
Gallium	0,96	2,50
Scandium	0,02	0,02
Tantal	2,06	3,98
Lithium	29,44	0,01
Nickel	610	1.480
Kupfer	3.530	7.080

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

Es ist erneut zu erkennen, dass sich die errechneten benötigten Mengen dieser Rohstoffe deutlich zwischen dem ressourcenschonenden Szenario und dem ressourcenintensiven Szenario unterscheiden. In Abbildung B-38 ist für die sieben Rohstoffe dieser Unterschied grafisch veranschaulicht, indem der berechnete Bedarf im ressourcenschonenden Szenario auf 100 % normiert wurde, um den Bedarf im ressourcenintensiven Szenario entsprechend verhältnismäßig darzustellen. Für sechs der sieben Rohstoffe ist der Bedarf im ressourcenintensiven Szenario deutlich erhöht, was besonders für Gallium und Nickel gilt. Für Lithium hingegen weist das ressourcenschonende Szenario einen deutlich höheren Bedarf auf. Dies ist dadurch zu erklären, dass im ressourcenschonenden Szenario für die Lieferung der Bestellung ein elektrisch betriebenes Fahrzeug angenommen wurde, dessen Batterie den erhöhten Bedarf an Lithium verursacht (über 99 % des errechneten Lithiumbedarf in diesem Szenario sind auf die Batterie zurückzuführen).

Abbildung B-38: 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 Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Tabelle B-47: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in dem ressourcenschonenden und -intensiven Szenario in Prozent – Tabelle zu Abbildung B-38

Rohstoff	Ressourcenschonendes Szenario	Ressourcenintensives Szenario
Gallium	100%	262%
Lithium	100%	0%
Tantal	100%	193%
Kupfer	100%	201%
Nickel	100%	243%
Scandium	100%	110%

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

B.3.5.2.2 Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Fußabdruck

Für beide Szenarien wurden aus der Modellierung Werte für den CO₂-Fußabdruck und den kumulierten Energieaufwand berechnet, welche in Tabelle B-48 dargestellt sind. Für beide Indikatoren beträgt das Ergebnis des ressourcenschonenden Szenarios ungefähr 30 % des Wertes für das ressourcenintensive Szenario. Dieses ähnliche Verhältnis der beiden Szenarien erklärt sich dadurch, dass CO₂-Fußabdruck und kumulierter Energieaufwand in der Regel aufgrund des vorherrschenden Energiemixes mit fossilen Energieträgern miteinander korrelieren.

Tabelle B-48: CO₂-Fußabdruck und kumulierter Energieaufwand des ressourcenschonenden und -intensiven Szenario zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“

Szenario	CO ₂ -Fußabdruck [kg CO ₂ -Äq.]	Kumulierter Energieaufwand [MJ]
Ressourcenschonendes Szenario	4,2	82,5
Ressourcenintensives Szenario	15,1	286,3

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

Sowohl der CO₂-Fußabdruck als auch der kumulierte Energieaufwand wird hierbei in beiden Szenarien hauptsächlich durch den Energiebedarf des Lagers beeinflusst. Dieser ist beim CO₂-Fußabdruck für 80 % bzw. 89 % der potenziellen Emissionen verantwortlich und steuert beim kumulierten Energieaufwand 74 % bzw. 85 % des Ergebniswerts bei. Relevant für die Ergebnisse dieser beiden Indikatoren sind weiterhin die Lieferung und die Verpackung (mit zwischen den Indikatoren und Szenarien schwankenden Anteilen). Interessant ist hierbei, dass der prozentuale Anteil der Lieferung am Gesamtwert beider Indikatoren im ressourcenintensiven Szenario jeweils geringer ist – dies jedoch maßgeblich durch den deutlich höheren Gesamtwert beider Indikatoren in diesem Szenario bedingt ist. Nominell sind die Umweltwirkungen des Transports für beide Indikatoren im ressourcenintensiven Szenario höher.

B.3.5.2.3 Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial

Die Ergebnisse beider Szenarien für die Indikatoren Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial sind Tabelle B-49 zu entnehmen. Der Wasserfußabdruck ist für das ressourcenintensive Szenario vier Mal so hoch wie im ressourcenschonenden Szenario und wird in beiden Szenarien hauptsächlich durch den Energiebedarf des Lagers bedingt. Während im ressourcenintensiven Szenario alle anderen Bestandteile des Modells weniger als 9 % des errechneten Wasserfußabdrucks bedingen, sind sie im ressourcenschonenden Szenario noch für 21 % verantwortlich, was hauptsächlich durch die Lieferung und Verpackung bedingt wird (zusammen 20 %).

Das Landnutzungspotenzial ist im ressourcenintensiven Szenario mehr als doppelt so hoch wie im ressourcenschonenden Szenario. Es wird hauptsächlich durch die Herstellung der Papierverpackung und deren Behandlung am Lebensende beeinflusst. 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.

Tabelle B-49: Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial des ressourcenschonenden und -intensiven Szenarios zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in m³ und m²a

Szenario	Wasserfußabdruck [m ³]	Landnutzungspotenzial [m ² a]
Ressourcenschonendes Szenario	0,02	1,6
Ressourcenintensives Szenario	0,08	3,5

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

B.3.5.2.4 Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial

In den meisten verfügbaren Studien zur Nachhaltigkeit des Onlinehandels wird schwerpunktmäßig der CO₂-Fußabdruck des Transports der Lebensmittel zur Endkundschaft (sog. letzte Meile) untersucht und zwischen stationärem und Onlinehandel verglichen (vgl. Zimmermann *et al.*, 2020; Siragusa & Tumino, 2021). Hier zeigt die Studienlage insgesamt das stimmige Bild, dass eine Liefertour im Durchschnitt ökologisch nachhaltiger ist, als wenn die Kunden*Kundinnen mit dem eigenen Pkw den Weg zum Geschäft und zurück nach Hause antreten (Siragusa & Tumino, 2021). Die Eindeutigkeit dieser Aussage bei isolierter Betrachtung der letzten Meile bleibt jedoch nur bestehen, solange davon ausgegangen wird, dass Kunden*Kundinnen auf ihrem Weg zum Einzelhandel keine öffentlichen Verkehrsmittel nutzen oder zu Fuß gehen (Siragusa & Tumino, 2021). Zudem umfassen die Prozesse des Online-Lebensmittelhandels deutlich mehr als nur den Transport der letzten Meile.

Im Rahmen dieses Vorhabens wurden daher der Rohstoffbedarf und die Umweltwirkungen der digitalen Lösung Online-Lebensmittelhandel (*E-Grocery*) genauer untersucht. Hierbei war im Voraus bereits denkbar, dass durch einen größeren Marktanteil von Lieferdiensten am Lebensmittelhandel eine Verringerung des CO₂-Fußabdrucks in diesem Bereich prognostiziert werden könnte. Andererseits können digitale Anwendungen auch erhebliche Rohstoffbedarfe und damit einhergehende Umweltfolgen mit sich bringen, welche bei der Prognose von Umweltentlastungspotenzialen zwingend berücksichtigt werden sollten. Van Loon *et al.* (2015) kamen zu dem Schluss, dass es nicht einfach ist, die tatsächlichen Umweltauswirkungen von Anwendungsfällen des Onlinehandels zu berechnen, da zahlreiche Wechselwirkungen, wie z. B. die Häufigkeit von Einkäufen, die genutzten Transportmittel und die relativen Entfernungen zwischen Geschäften und Verbraucher*innen zu berücksichtigen sind. Auch die sich ergebende Diskrepanz zwischen den beiden Szenarien in allen errechneten Rohstoff- und Umweltwirkkategorien in dieser Studie unterstützt dieses Erkenntnis. Das Umweltentlastungspotenzial von Online-Lebensmittelbestellungen ist daher nicht pauschal zu erfassen. Vor allem ist ein etwaiges Entlastungspotenzial auch immer stark davon abhängig, welcher Anwendungsfall des stationären Handels als Vergleich herangezogen wird und welche Transportmittel und -routen gewählt werden.

Jedoch lässt sich aus den Erkenntnissen dieser Studie ein Potenzial zur Umweltentlastung deutlich ableiten. In allen errechneten Indikatoren außer dem Landnutzungspotenzial ist die notwendige Energie zum Heizen und Betrieb der Lagerhalle der relevanteste Faktor. Um ein Entlastungspotenzial zu beschreiben, ist an dieser Stelle der stationäre Lebensmitteleinzelhandel in Supermärkten als Vergleich heranzuziehen, bei welchem die Waren im letzten Schritt nicht wie im Online-Lebensmittelhandel in einem Lager, welches die effiziente Nutzung von Platz und Energie in den Vordergrund stellt, aufbewahrt werden, sondern auf großer Fläche in Regalen oder offenen Kühlungen der Kundschaft präsentiert werden. Zudem sind Ladenflächen in der Regel ganzjährig temperiert, um ein möglichst angenehmes

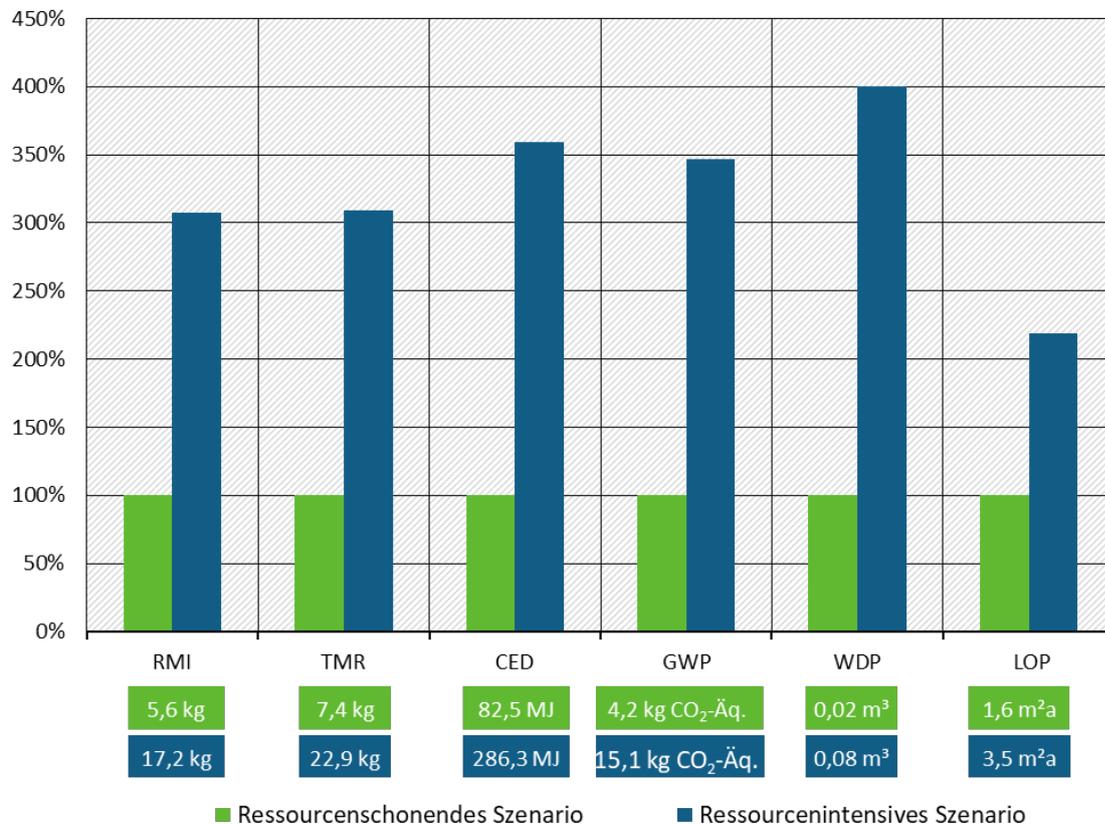
Einkaufserlebnis zu ermöglichen. Es ist daher davon auszugehen, dass für den beim Online-Lebensmittelhandel bereits bestimmenden Faktor Laden-/Lagerfläche im Einzelhandel deutlich größere Flächen benötigt werden, welche zudem energieintensiver betrieben werden. Aktuelle Publikationen zum Onlinehandel unterstützen diesen Eindruck, in Siragusa und Tumino (2021) beispielsweise wurde ein 15 % geringerer CO₂-Fußabdruck für Online-Lebensmitteleinkäufe im Vergleich zu Einkäufen im stationären Einzelhandel errechnet (Hardi & Wagner, 2019; Aziz *et al.*, 2022; Siragusa & Tumino, 2021).

Ein weiterer interessanter Aspekt bei der Folgerung möglicher Umweltentlastungspotenziale ist die Thematik der Lebensmittelabfälle. Es besteht die Erwägung, dass im stationären Handel die Produkte nach Qualität und Verfallsdatum ausgewählt werden, während im elektronischen Handel die Einzelhändler*innen diese Auswahl treffen (Fikar, 2018). Gerade in hoch technologisierten Lagern können heute Systeme zum Einsatz kommen, die auf der Grundlage von Haltbarkeits- oder Verfallsdaten verwalten und die auszuliefernden Produkte so auswählen, dass Lebensmittelabfälle minimiert werden (Hoffmann, 2022). Dieses Entlastungspotenzial ist jedoch dahingehend in Relation zu setzen, dass aktuell bei den Einzelhändlern nur 7 % der Lebensmittelabfälle anfallen, wohingegen 59 % auf die privaten Haushalte entfallen (BMEL, 2022). Daher ist bezüglich dieser Thematik am entscheidendsten anzusehen, ob die Lebensmittel nach der Lieferung möglichst komplett konsumiert werden oder ob ein relevanter Teil davon letztendlich entsorgt wird. Nichtsdestotrotz kann die Reduktion von Lebensmittelabfällen im Einzelhandel ein wichtiger Schritt sein.

B.3.5.3 Schlussbetrachtungen und Fazit zur Fallstudie

Ein direkter Vergleich zwischen den verschiedenen berechneten Indikatoren ist aufgrund der unterschiedlichen Mengeneinheiten der Ressourcenintensitäts- und Umweltwirkkategorien nicht möglich. Es kann jedoch das Verhältnis zwischen dem Ergebnis des ressourcenschonenden und des ressourcenintensiven Szenarios bei den verschiedenen Indikatoren nebeneinandergestellt und analysiert werden. Abbildung B-39 zeigt dieses Verhältnis grafisch. Der geringste Unterschied im Ergebnis der beiden Szenarien ist beim Landnutzungspotenzial zu erkennen. Jedoch zeigt auch hier das ressourcenintensive Szenario eine potenzielle Umweltwirkung, die mehr als doppelt so hoch ist wie die des ressourcenschonenden Szenarios. Bei allen anderen berechneten Indikatoren ist der sich für das ressourcenintensive Szenario ergebende Wert zwischen 3 und 3,5-mal so hoch wie der Wert des ressourcenschonenden Szenarios. Es ist also über alle analysierten Rohstoff- und Umweltwirkkategorien hinweg zu erkennen, dass die Ausgestaltung eines *E-Grocery* Anwendungsfalls im Einzelnen große Auswirkungen auf die potenziellen Rohstoffbedarfe und Umweltfolgen hat.

Abbildung B-39: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ absolut und in Prozent nach Szenarien*



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

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

Tabelle B-50: Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ in Prozent nach Szenarien – Tabelle zu Abbildung B-39

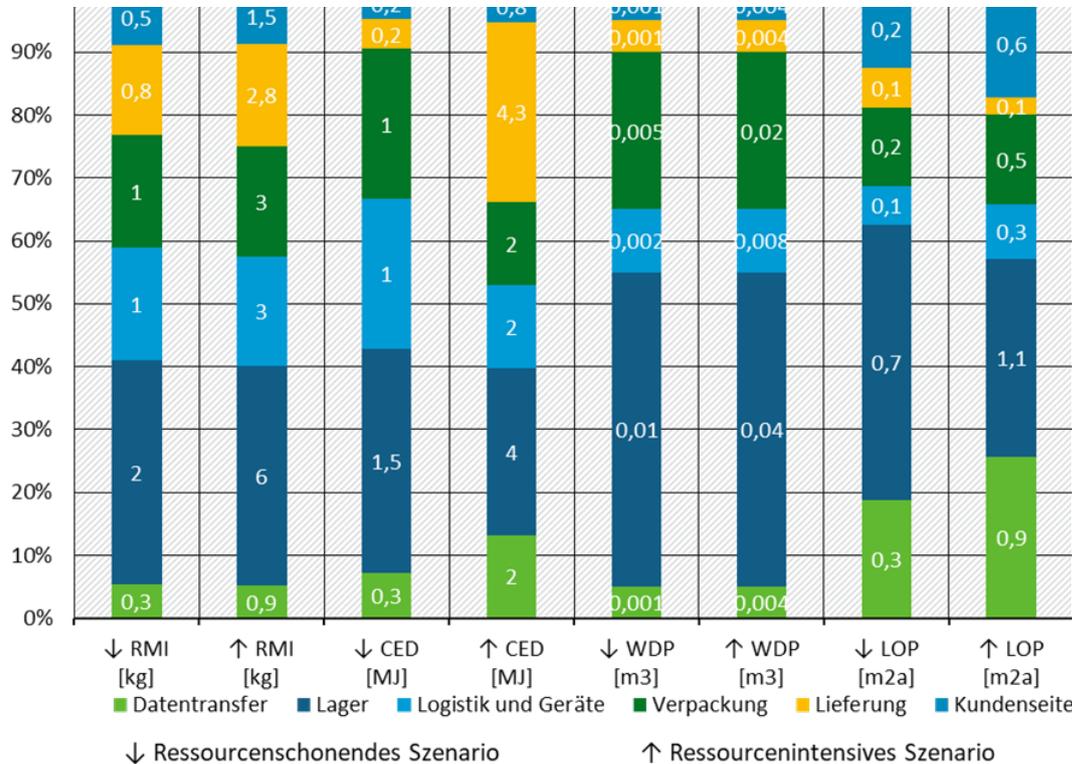
Indikator	Ressourcenschonendes Szenario	Ressourcenintensives Szenario
RMI	100%	307%
TMR	100%	309%
CED	100%	360%
GWP	100%	347%
WDP	100%	400%
LOP	100%	219%

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

Um abschließende Erkenntnisse aus diesem Vorhaben zu ziehen, ist es notwendig sich zunächst einen Überblick über den Beitrag der verschiedenen Komponenten des betrachteten

Anwendungsfall zu einigen der Indikatoren zu verschaffen (vgl. Abbildung B-40). Hieran lässt sich insbesondere die Relevanz des Lagers deutlich ablesen.

Abbildung B-40: 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 = CO₂-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

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

Tabelle B-51: Vergleich ausgewählter Indikatoren der Untersuchungseinheit „E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“ absolut nach Komponenten und Szenarien – Tabelle zu Abbildung B-40

Indikatoren	Kundenseite	Datentransfer	Lager	Logistik und Geräte	Verpackung	Lieferung
↓ RMI (kg)	0,5	0,3	2	1	1	0,8
↑ RMI (kg)	1,5	0,9	6	3	3	2,8
↓ CED (MJ)	0,2	0,3	1,5	1	1	0,2
↑ CED (MJ)	0,8	2	4	2	2	4,3
↓ WDP (m³)	0,001	0,001	0,01	0,002	0,005	0,001
↑ WDP (m³)	0,004	0,004	0,04	0,008	0,02	0,004
↓ LOP (m²a)	0,2	0,3	0,7	0,1	0,2	0,1
↑ LOP (m²a)	0,6	0,9	1,1	0,3	0,5	0,1

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

Für die vorliegende Studie liegt die größte Limitation in der unsicheren Datenlage bezüglich vieler der notwendigen Inputs und der deshalb erhöhten Menge an Annahmen, die nötig war, um den Anwendungsfall konsistent modellieren zu können. Besonders bezüglich der genutzten IT-Strukturen und Hardware der Online-Lebensmitteleinzelhändler*innen sowie zur Menge an bearbeiteten Bestellungen und umgesetzten Waren pro Zeitraum waren keine belastbaren Daten verfügbar. Zudem ist es aufgrund der anzunehmenden Heterogenität der Handelnden in Kombination mit der beschränkten Datenlage sehr schwer, Daten auf ihre Repräsentativität für die Branche zu überprüfen. Daher sind die in dieser Fallstudie untersuchten Szenarien des Anwendungsfalls nicht als Spiegelbilder eines tatsächlichen *E-Grocery*-Angebots anzusehen, sondern mehr als explorative Szenarien zu verstehen, die beschreiben, welche Rohstoffbedarfe und Umweltwirkungen mit diesem Angebot verbunden sein können und wo Stellschrauben für eine möglichst umwelt- und ressourcenschonende Ausgestaltung liegen. Die Herstellungsphase der IT-Endgeräte sowie der Logistikgeräte des Einzelhandels wurden bewusst nicht in die Modellierung miteinbezogen, da hier aufgrund der Vielzahl möglicher unterschiedlicher Varianten und einer sehr unsicheren Allokationsbasis eine weitere Unsicherheit in das Modell eingeflossen wäre. Angesichts der vielfältigen und täglichen Verwendungen digitaler Endgeräte ist davon auszugehen, dass die Nutzung zur Online-Bestellung von Lebensmitteln zeitlich eine untergeordnete Rolle gegenüber anderen Nutzungsarten einnimmt und somit auch nicht zu erwarten ist, dass erhebliche Teile des Rohstoffbedarfs und der Umweltfolgen der Herstellung dieser Geräte dem Anwendungsfall zuzuschreiben wären. Zusätzlich ist eine Interpretation der Umweltentlastungspotenziale erschwert, da denkbar ist, dass beim herkömmlichen Einkauf digitale Endgeräte (Smartphone), zum Beispiel zum Verwalten von Einkaufslisten oder zur Bezahlung per NFC-Chip zum Einsatz kommen, weshalb für einen Vergleich dem Einkauf im konventionellen Handel ein Teil des Endgeräts zuzurechnen wäre. Zudem ist bei der Interpretation der Ergebnisse zu berücksichtigen, dass sich die von Siragusa und Tumino (2021) erhobenen Daten auf den italienischen Kontext beziehen. Es ist jedoch anzunehmen, dass die Strukturen der Online-Lebensmittelhändler und Kaufgewohnheiten der Kundschaft ähnlich derer in Deutschland sind.

Trotz dieser Einschränkungen kann aus der vorliegenden Fallstudie ein Eindruck gewonnen werden, wie die Rohstoff- und Umweltintensität von Anwendungsfällen des *E-Grocery* Geschäftsmodells einzuschätzen ist. Darüber hinaus kann die Erkenntnis gestärkt werden, dass diese stark von der Ausgestaltung des einzelnen Anwendungsfalls abhängt. Zudem wird dadurch, dass der Betrieb des Lagers als hauptsächlicher Treiber von Rohstoffbedarfen und Umweltfolgen identifiziert wurde, die Aussage aus der Fachliteratur bestärkt, dass Laden- und Lagerflächen ein entscheidender Faktor in der Frage sind, wie ein Einzelhandelsangebot nachhaltig gestaltet werden kann. Da im stationären Einzelhandel weithin von größeren Flächen und höheren Energiebedarfen ausgegangen wird, können die vorliegenden Ergebnisse auch als Indikation dahingehend gedeutet werden, dass ein *E-Grocery* Angebot als Ersatz zu einer stationären Einzelhandelsfiliale durchaus ein Umweltentlastungspotenzial bieten kann.

Mit Verweis auf die in Kapitel B.3.4.1 beschriebene Entwicklung des *E-Grocery* Sektors und vor dem Hintergrund einer immer weiter fortschreitenden Digitalisierung von Service- und Einzelhandelsangeboten ist auch zukünftig davon auszugehen, dass sich Angebote, wie der hier beschriebene Anwendungsfall, weiter etablieren und verbreiten werden. Durch eine weitere Verbreitung von E-Mobilität und die potenzielle Nutzung neuer Technologien, wie z. B. Lieferdrohnen ist zudem Potenzial für eine dynamische Entwicklung vorhanden. Das Angebot der Online-Lebensmitteleinzelhändler*innen wird von deren Kundschaft vor allem geschätzt, weil das Onlinebestellen und -Annehmen der Lieferung oftmals die komfortablere und zeitsparende Variante gegenüber dem stationären Einkauf ist. Die bestehende Literatur und die Ergebnisse dieser Fallstudie geben Hinweise darauf, dass es potenziell auch die ressourcen- und

umweltschonendere Variante ist, insbesondere wenn der Online-Einzelhandel eine effiziente Lagerung mit möglichst geringem Energiebedarf umsetzt.

B.3.6 Fallstudie Carsharing

B.3.6.1 Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung

Der Verkehrssektor ist einer der Hauptemittenten von Treibhausgasen in Deutschland und verursachte 2021 knapp 20 % der Emissionen (Umweltbundesamt, 2023a). Auch die Luftverschmutzung in vielen Städten stammt vor allem aus dem Verkehrssektor, insbesondere aus dieselbetriebenen Fahrzeugen (Umweltbundesamt, 2023a). Das Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMUV) gibt an, dass der motorisierte Straßenverkehr im Jahr 2019 mit 96,3 % den höchsten Anteil an den THG-Emissionen des Verkehrssektors in Deutschland hatte. Dabei stammten 60,8 % von Pkw und 35,5 % von Nutzfahrzeugen (BMUV, 2021). Die Höhe der Emissionen ist zudem abhängig von der Antriebsart sowie von der Größe der Fahrzeuge²⁸. Zwar konnte Deutschland die Verkehrsemissionen im Vergleich zu 1995 um 5 % senken, dieser Effekt wird jedoch durch die steigende Zahl der gefahrenen Kilometer wieder aufgehoben (BMUV, 2021). Nach dem Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) muss Deutschland seine Verkehrsemissionen bis zum Jahr 2045 auf null senken (Umweltbundesamt, 2023b). Zur Reduktion der verkehrsbedingten Emissionen gewinnen Elektrofahrzeuge immer mehr an Bedeutung. Neben alternativen Antriebsarten verbreiten sich aber auch alternative Mobilitätskonzepte wie Carsharing immer weiter (EFI, 2022).

Mit einer steigenden Anzahl an elektrisch angetriebenen Fahrzeugen verfolgt Deutschland das Ziel, die Verkehrsemissionen um 40 bis 42 % gegenüber 1990 zu reduzieren. Das entspräche einer Reduktion von 66 bis 69 Millionen Tonnen CO₂-Äquivalenten (Bundesregierung, 2022). Zur weiteren Reduktion und um eine Verlagerung der Emissionen vom Verkehrs- in den Energiesektor zu vermeiden, muss eine Verringerung der Flottengröße an sich stattfinden, wobei alternative Mobilitätskonzepte wie Carsharing einen Beitrag leisten können.

²⁸ In den Berechnungen des BMUV sind der internationale Luft- und Seeverkehr sowie die Emissionen aus dem Stromverbrauch nicht enthalten. Die strombedingten Emissionen sind in den Gesamtemissionen des Energieversorgungssektors enthalten (BMUV, 2021). Der Energieversorgungssektor umfasst "alle Prozesse der Energiegewinnung, -umwandlung, -speicherung, -übertragung und -verteilung, die Endenergie an die Endverbrauchssektoren (Industrie, Verkehr und Gebäude sowie Land- und Forstwirtschaft) liefern" (Bruckner *et al.*, 2014).

Modelle des Carsharings

„Carsharing bietet ein flexibles Angebot an Fahrzeugen für unterschiedliche Nutzungszwecke, ohne einen eigenen Pkw besitzen zu müssen.“ (Umweltbundesamt, 2022a). Mittlerweile gibt es verschiedene Carsharing Varianten. Das klassische Carsharing ist stationsgebunden. Dabei mieten die Nutzenden ein zu ihrem Wohnort nahegelegenes Fahrzeug, wo sie es auch wieder abstellen. Diese klassische Variante des Carsharings ist nicht an Geschäftsgebiete gebunden und setzt die Möglichkeit einer langen Nutzungsdauer voraus. Diese stationsgebundenen Angebote finden sich in über 700 deutschen Städten und Gemeinden. Neben den klassischen Carsharing Angeboten, gibt es in Deutschland auch *free-floating* Carsharing. Anders als beim klassischen Carsharing, sind für *free-floating* Fahrzeuge Geschäftsbereiche definiert, in denen die Fahrzeuge via App geortet und gemietet werden können. Alle Fahrzeuge können innerhalb des Geschäftsgebietes geparkt werden. Im Vergleich zum klassischen stationsgebundenen Carsharing, kann eine Reservierung bei den *free-floating* Fahrzeugen nur für einen kurzen Zeitraum vorgenommen werden. *Free-floating* Angebote sind bislang nicht so weit verbreitet, wie das klassische Carsharing. In manchen deutschen Städten werden auch beide Varianten kombiniert. Eine dritte Variante ist das sogenannte *peer-to-peer* Carsharing. Dabei teilen sich mehrere Personen ein privates Fahrzeug, entweder über eine Internetseite oder über die Nachbarschaft (Umweltbundesamt, 2022a).

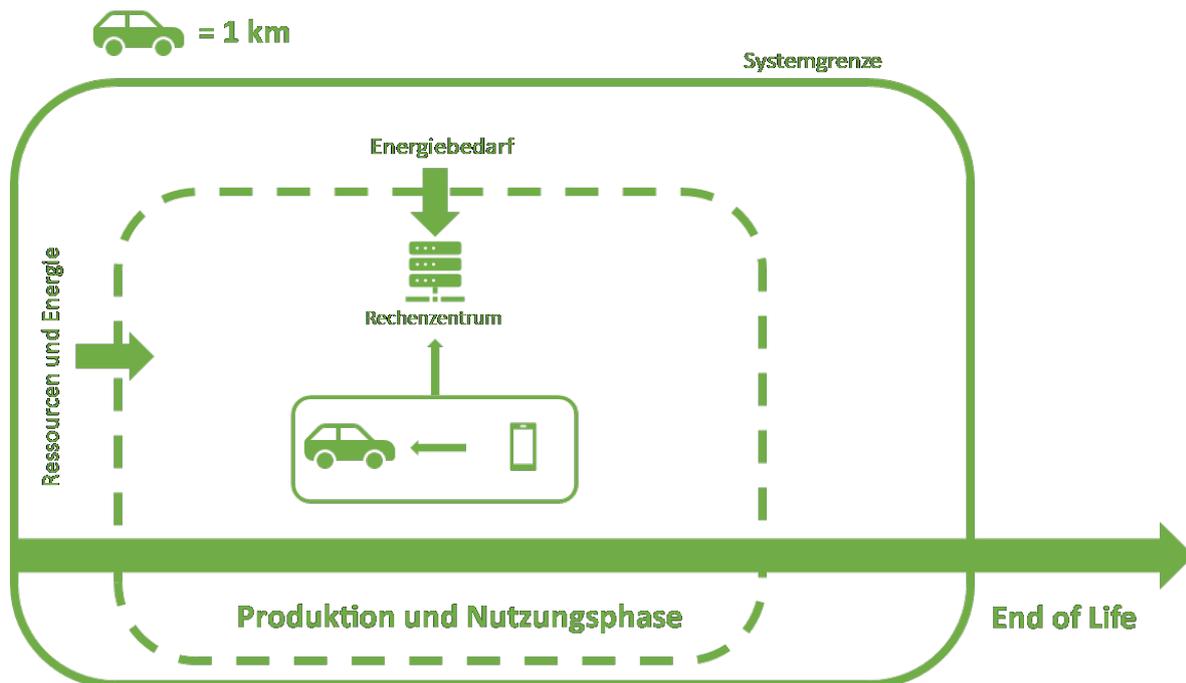
Deutschland zählt Stand 2022 30.000 Carsharing-Fahrzeuge. Insgesamt 3,3 Millionen Deutsche haben sich bisher für Carsharing Angebote angemeldet (Umweltbundesamt, 2022a). Eine Umfrage von (Kurzweil *et al.*, 2023) ergab, dass nur 12 % der Befragten ihr Privatfahrzeug durch Carsharing Angebote ersetzen würden. Somit teilen sich etwa 13 Nutzende ein Carsharing Auto ohne privat ein eigenes Auto zu besitzen. Eine Untersuchung von Hülsmann *et al.* (2018) fand heraus, dass in Stuttgart 0,3 bis 0,8 private Pkw durch Carsharing-Angebote ersetzt werden; in Köln und Frankfurt 0,3 bis 0,7 private Pkw. Eine Abkehr vom ÖPNV durch Carsharing-Angebote konnte nicht ermittelt werden (Hülsmann *et al.*, 2018).

Die Fallstudie untersucht die Ressourcenintensität und weitere Umwelteinflüsse von elektrischen Carsharing-Angeboten, deren Zugang über eine App gewährleistet wird und betrachtet neben möglichen Umweltentlastungspotenzialen durch Carsharing, inwieweit digitalisierungsrelevante Rohstoffe besonders durch das Carsharing-Angebot benötigt werden.

B.3.6.2 Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie

Aufgrund des Ziels Deutschlands die Elektroautoflotte bis 2030 auf 10 Millionen Autos zu bringen, und aufgrund des geplanten Zulassungsverbots von Verbrennungsmotoren ab 2035 wird angenommen, dass Carsharing-Angebote mehr und mehr auf Elektrofahrzeuge zurückgreifen, sodass für die Fallstudie ein elektrisch betriebenes Fahrzeug betrachtet wird (Bundesregierung, 2022; Mayr, 2023). Bei der wiederaufladbaren Li-Ionen-Batterie sind sogenannte NMC-Batterien (Lithium-Nickel-Mangan-Cobalt) mit einem Anteil von 29 % am meisten vertreten. Ihnen wird ein weiterer Anstieg des Marktvolumens auf 48 % bis 2025 vorhergesagt (Dunn *et al.*, 2012). Für die Fallstudie wird daher eine NMC Li-Ionen-Batterie mit einem Carsharing-Elektrofahrzeug betrachtet, auf das mittels einer App über das Smartphone zugegriffen wird (vgl. Abbildung B-41). Mit Hilfe des Smartphones kann die Fahrt mit Carsharing Fahrzeugen freigeschaltet, Autos geortet, ihre Verfügbarkeit und ihr Ladestand abgefragt und die Fahrten bezahlt werden.

Abbildung B-41: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“



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

B.3.6.3 Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie

Für den Anwendungsfall des Carsharings wurde folgende Untersuchungseinheit gewählt:

1 km Fahrt mittels eines elektrischen Carsharing-Pkw inkl. App-Anwendung

Für die Fallstudie werden zwei Szenarien für den verwendeten Strommix beim Laden des Elektrofahrzeugs untersucht. Szenario 1 berücksichtigt einen Grünstrommix zum Laden des Elektroautos in der Nutzenphase, wohingegen das Szenario 2 einen konventionellen Strommix beinhaltet. Des Weiteren erfolgt am Ende der Fallstudie eine überschlägige Rechnung über das Entlastungspotenzial durch potenziell eingesparte Fahrzeuge. Details zu allen relevanten Systemkomponenten enthalten die folgenden Abschnitte.

B.3.6.3.1 Komponenten des betrachteten Carsharing-Systems

Für die Festlegung der Komponenten der Fallstudie wurde eine Literaturanalyse durchgeführt. Auf Basis dieser wurden die in Tabelle B-52 gelisteten Annahmen für das Smartphone und den Pkw getroffen. Für die Kapazität der NMLi-Ionen Batterien wird die durchschnittliche Kapazität verschiedener batteriebetriebener Elektro-Pkw von 59 kWh angenommen (Gaete-Morales *et al.*, 2021).

Tabelle B-52: Komponenten für die Nutzung und Bereitstellung von Carsharing

Komponente	Lebensdauer	Gewicht in kg	Quelle
Elektroauto mit NMC Li-Ionen Batterie	200.000 km	Batterie: 445,25 kg Auto (exkl. Batterie): 938 kg	(Gaete-Morales <i>et al.</i> , 2021)
Smartphone	2,5 Jahre	N. A.	(Statista, 2023)

B.3.6.3.2 Rahmenbedingungen der Nutzungsphase

Für die Nutzungsphase der Carsharing-Fallstudie sind vor allem die Energiebedarfe relevant. Tabelle B-53 listet die Leistungsaufnahme der betrachteten Komponenten auf. Laut Sprei *et al.* (2019) legen die Personen, die Carsharing nutzen in Berlin im Schnitt 3,52 km innerhalb von 15-30 Minuten zurück. Dieser Wert wird beispielhaft angenommen, um die Fahrtzeit für einen Kilometer mit Carsharing abzuschätzen. Somit ergeben sich ca. fünf Minuten pro gefahrenem Kilometer. Bei der Interpretation der Ergebnisse muss allerdings berücksichtigt werden, dass dieser Wert für eine Großstadt, in der es vermehrt zu *Stop-and-Go*-Situationen kommt, gilt und nicht für ländliche Regionen. Es ist davon auszugehen, dass fünf Minuten benötigt werden, um das Auto über eine App freizuschalten, zu bezahlen und die Fahrt über das Smartphone zu beenden. Werden die fünf Minuten Smartphone-Nutzung pro Fahrt in Kombination mit der durchschnittlichen Distanz von 3,52 km/Fahrt für Berlin auf die Untersuchungseinheit von einem Kilometer allokiert, so ergibt sich eine Nutzungsdauer von 0,704 min/km für das Smartphone.

Tabelle B-53: Leistungsaufnahme der betrachteten Geräte für Carsharing pro km in Wh

Komponente	Leistungsaufnahme	Quelle
Elektroauto mit NMC Li-Ionen Batterie	31,5 Wh	(Zhang <i>et al.</i> , 2019)
Smartphone	0,18823 Wh	(Hristov, 2022) (Sprei <i>et al.</i> , 2019)
Mobiles Internet (LTE) (Freischalten, Bezahlen und Abstellen)	0,02522 Wh	(Choi <i>et al.</i> , 2017)
Rechenzentren (Datenspeicherung)	0,39 Wh	(Gröger, 2020)
Mobiles Internet (LTE) (Fahrt)	0,1791 Wh	(Choi <i>et al.</i> , 2017)

Um den Strombedarf eines Smartphones zur Nutzung und zum Tracking der Fahrzeuge abzubilden, muss auch jener Strom berücksichtigt werden, der durch die Internetverbindung und Servernutzung in Anspruch genommen wird (Übertragungsnetz und Server/Rechenzentrum) (Tabelle B-53). Es wurde angenommen, dass die Daten an Rechenzentren in Deutschland übertragen werden. Somit ist der Fallstudie der deutsche Strommix zugrunde gelegt. Zusätzlich zum Energiebedarf des Rechenzentrums ist auch die Leistungsaufnahme der Komponenten zur Datenübertragung zu berücksichtigen. Hierbei wurde auf die Green Cloud Computing Studie (Gröger *et al.*, 2021) zurückgegriffen, in welcher für einen

exemplarischen Datenstrom innerhalb Deutschlands ein Energiebedarf von 0,0091 kWh/GB für eine LTE-Verbindung angegeben wird. Für die über das mobile Internet übertragene Datenmenge wurde ein Durchschnittswert für Smartphones aus Choi *et al.* (2017) von 3,92 MB/min angenommen.

B.3.6.3.3 Weitere Sachbilanzen

Für die Modellierung der Fallstudie wurden Datensätze für das Smartphone und das Elektroauto aus der Datenbank Ecoinvent verwendet.

Unter Betrachtung der Systemgrenzen sind neben der Herstellung der bereits dargestellten Endgeräte folgende weitere Datensätze Teil der Sachbilanz:

- ▶ Strombedarf Internetverbindung: *market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U*
- ▶ Strombedarf durch Leistungsaufnahme Elektroauto Szenario 1 (Grünstrom): *market for electricity, low voltage, renewable energy products | electricity, low voltage, renewable energy products | Cutoff, U*
- ▶ Strombedarf durch Leistungsaufnahme Elektroauto Szenario 2 (konventioneller deutscher Strommix): *market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U*
- ▶ Strombedarf durch Leistungsaufnahme Smartphone: *market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U*
- ▶ Strombedarf der Rechenzentren: *market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U*
- ▶ Smartphone: *market for consumer electronics, mobile device, smartphone | consumer electronics, mobile device, smartphone | Cutoff, U*
- ▶ Batterie: *market for battery, Li-ion, NMC111, rechargeable, prismatic | battery, Li-ion, NMC111, rechargeable, prismatic | Cutoff, U* und *market for battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic | battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic | Cutoff, U*
- ▶ Auto (exkl. Batterie): *passenger car production, electric, without battery | passenger car, electric, without battery | Cutoff, U*

Die Aufschlüsselung nach konkreten Rohstoffen erfolgt im nachfolgenden Kapitel im Rahmen der Ergebnisse.

B.3.6.4 Ergebnisse zur Ressourcenintensität

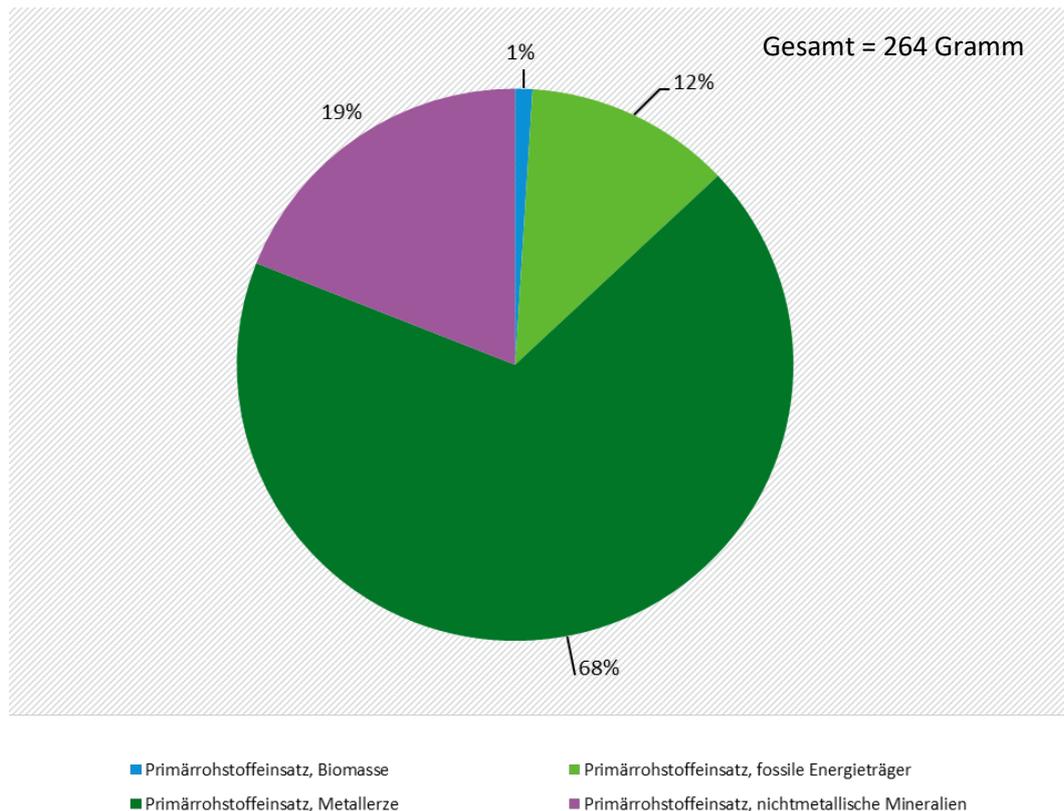
B.3.6.4.1 Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme

B.3.6.4.1.1 Herstellungsphase

Heruntergebrochen auf die verwendete Untersuchungseinheit von 1 km Carsharing-Nutzung ergibt sich ein **Primärrohstoffeinsatz von 263,8 g** aus der Herstellung des Elektroautos und des Smartphones (siehe Kapitel B.20.6.1). Die Anteile der verschiedenen im Primärrohstoffeinsatz berücksichtigten Rohstoffarten sind in Abbildung B-42 dargestellt. Es ist

ersichtlich, dass Metallerze weit mehr als die Hälfte der zur Herstellung notwendigen Rohstoffe darstellen, gefolgt von nichtmetallischen Mineralien (19 %) und fossilen Energieträgern (12 %) und Biomasse als Rohstoff eine untergeordnete Rolle in der Herstellung des Carsharing-Systems spielt. Wird auch die ungenutzte Materialentnahme in die Erhebung miteinbezogen, ergibt sich ein **Gesamtprimärmaterialaufwand von 330 g** je 1 km Carsharing-Nutzung. Die Anteile der einzelnen Rohstoffarten ändern sich hierbei nicht nennenswert im Vergleich zu denen des Primärrohstoffeinsatzes.

Abbildung B-42: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Herstellung Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ in Prozent



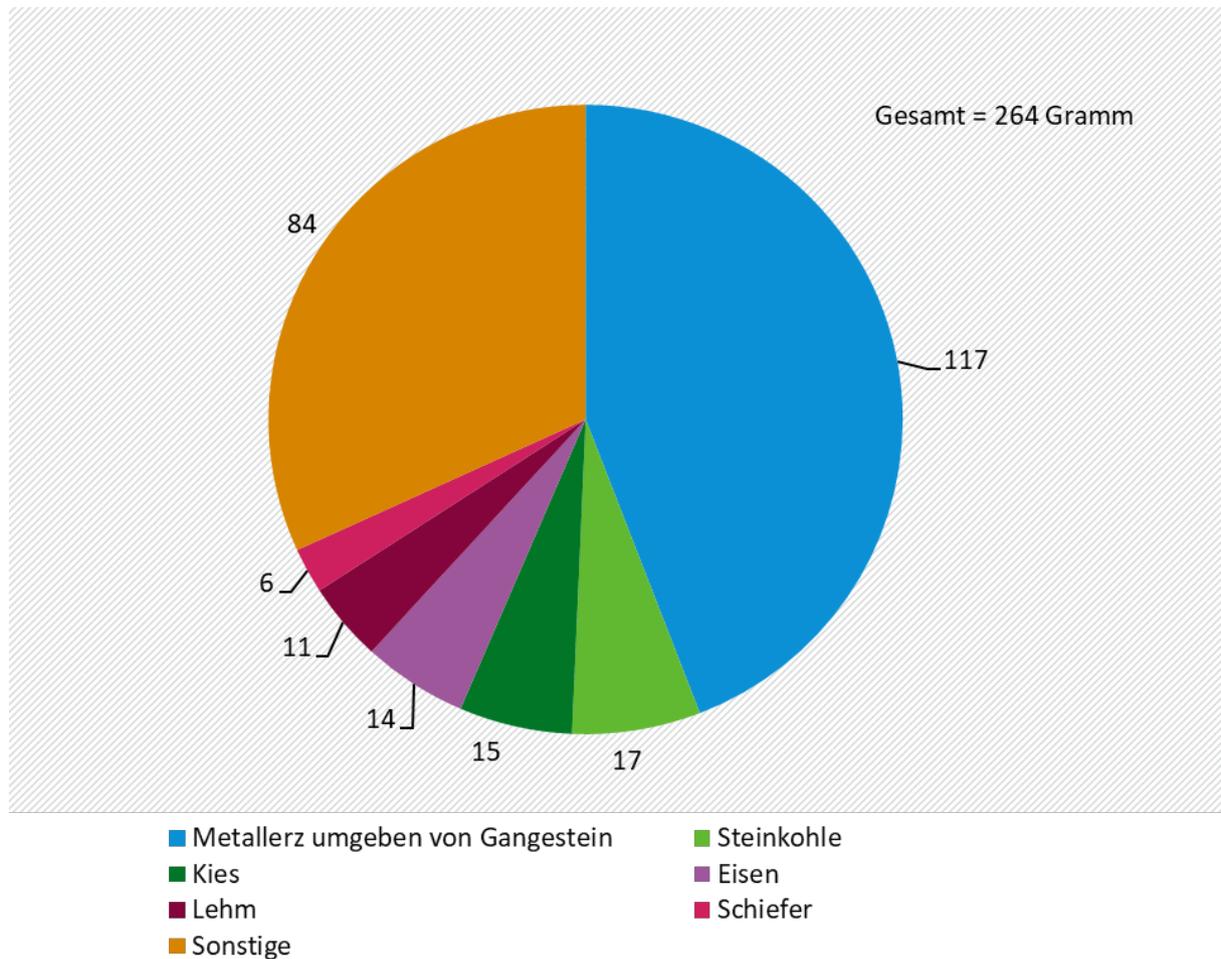
Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Den größten Anteil mit 79 % (206 g/km, vgl. Abbildung B-43) am RMI haben, wie auch bereits in den vorherigen Fallstudien, die mineralischen und fossilen Rohstoffe. Abbildung B-43 zeigt die Anteile nach Rohstoffarten in Gramm für die Herstellungsphase. Bei Betrachtung der einzelnen Elementarflüsse ist die Rohstoffintensität der Herstellungsphase rein massentechnisch vorrangig durch die Entnahme von Ganggestein, Steinkohle, Kies, Eisen und Lehm (vgl. Abbildung B-43) geprägt. Die Herstellungsphase der Komponenten umfasst dabei alle Rohstoffaufwendungen inklusive notwendigen Vorketten und benötigter Energiezufuhr²⁹ (Dai *et al.*, 2019). Unter Berücksichtigung der üblichen Komponenten eines Elektroautos, wie sie in der Studie von Dai *et al.* (2019) beschrieben sind, lässt sich feststellen, dass die aufgeführten Materialien, mit der Ausnahme von Eisen, das in Form von Stahl in Elektroautos verwendet wird, nicht in ausreichender Menge direkt in den Fahrzeugkomponenten vorhanden sind. Stattdessen erfolgt die Bereitstellung dieser Ressourcen hauptsächlich über die

²⁹ Wie beschrieben, entfällt in dieser Betrachtung der Rohstoffbedarf für die Herstellung der Komponenten für Rechenzentren und die Netzinfrastruktur.

Produktionskette und den Energieverbrauch im Rahmen ihrer Verwendung in Elektrofahrzeugen.

Abbildung B-43 Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ in Gramm

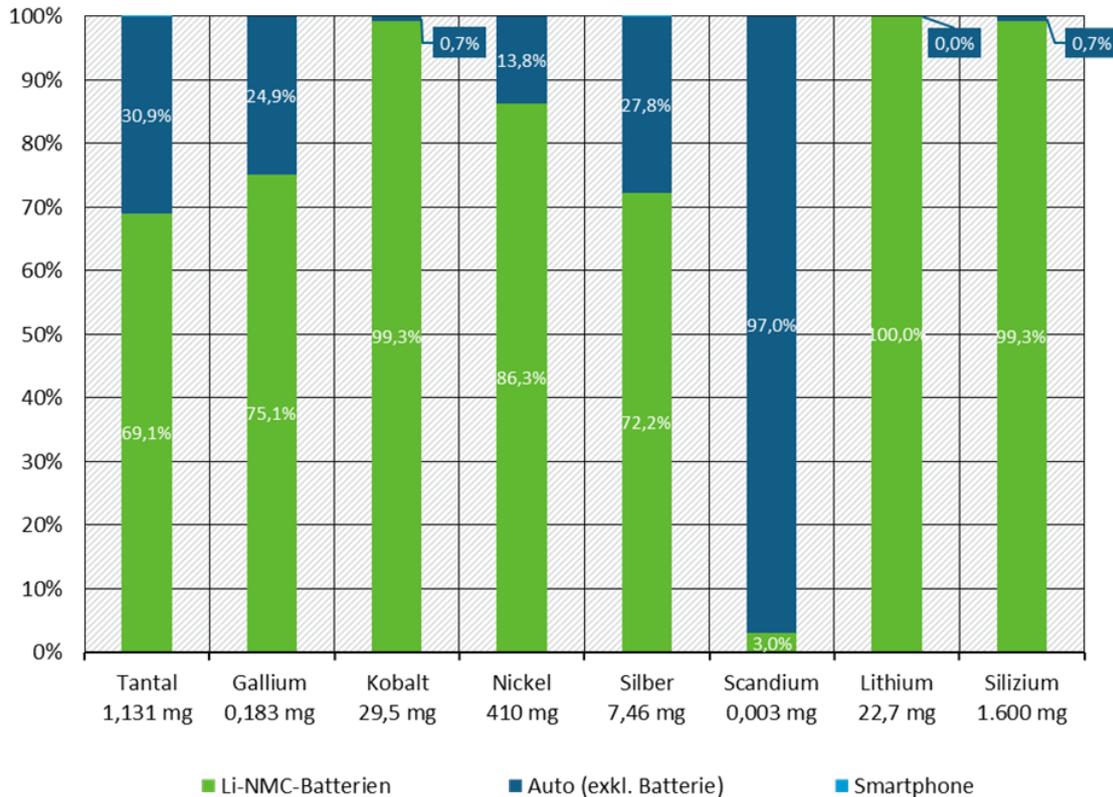


Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Neben den massenmäßig am meisten aufgewendeten Ressourcen sind auch Ressourcen von Interesse, die aufgrund ihrer Relevanz für die Digitalisierung hervorzuheben sind. Hintergründe zu den verschiedenen Rohstoffkategorien und eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise bei der Auswertung sind in Kapitel B.2 zu finden.

Betrachtet man die wichtigsten Rohstoffe im Detail und durch welche Komponenten ihr Bedarf verursacht wird, ergibt sich das Bild wie in Abbildung B-44 dargestellt. Für die Fahrt von 1 km mit einem elektrischen Carsharing-Fahrzeug und dem dabei verwendeten Smartphone inkl. der notwendigen Datenübertragung fallen neben Lithium und Kupfer, die für alle Fallstudien als relevante Rohstoffe betrachtet werden, weitere sieben Rohstoffe spezifisch für Carsharing ins Gewicht.

Abbildung B-44: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ in Prozent und Milligramm



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

Tabelle B-54: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“ in Milligramm und Prozent – Tabelle zu Abbildung B-44

Rohstoff	Li-NMC Batterien	Auto (exkl. Batterie)	Smartphone
Tantal: 1,131 mg	0,788 (69,09%)	0,349 (30,91%)	0 (0,001%)
Gallium: 0,183 mg	0,137 (75,13%)	0,046 (24,87%)	0 (0%)
Kobalt: 29,5 mg	29,31 (99,32%)	1,986 (0,680%)	0 (0%)
Nickel: 410 mg	353,375 (86,25%)	56,25 (13,75%)	0 (0%)
Silber: 7,46 mg	5,424 (72,24%)	2,073 (27,76%)	0 (0,01%)
Scandium: 0,003 mg	0,0000894 (2,98%)	0,0029106 (97,02%)	0 (0%)
Lithium: 22,7 mg	22,7 (100%)	0 (0%)	0 (0%)
Silizium: 1.600 mg	1.588,16 (99,26%)	11,84 (0,74%)	0 (0%)
Kupfer: 990 mg	881,397 (89,03%)	108,603 (10,97%)	0 (0%)

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

Wie zu erwarten, ist für alle näher betrachteten digitalisierungsrelevanten Rohstoffe außer Scandium der Großteil des Bedarfs auf die Batterie des Elektroautos zurückzuführen. Lediglich der Bedarf an Scandium wird nicht maßgeblich durch die Batterie bedingt, sondern ist auf den

elektrischen Motor (Bestandteil des Autos exkl. Batterie) zurückzuführen. Das Smartphone hat im Vergleich zum Elektroauto und der Batterie über alle Indikatoren hinweg einen maximalen Anteil von 0,01 %. Manche der in Abbildung B-44 aufgeführten Rohstoffe sind mengentechnisch zwar deutlich mehr verarbeitet (Silizium, Kupfer, Nickel, Kobalt und Lithium), bei diesen ist allerdings die Verfügbarkeit höher als bei den anderen, anteilmäßig kleineren Rohstoffmengen (Silber, Tantal, Gallium und Scandium).

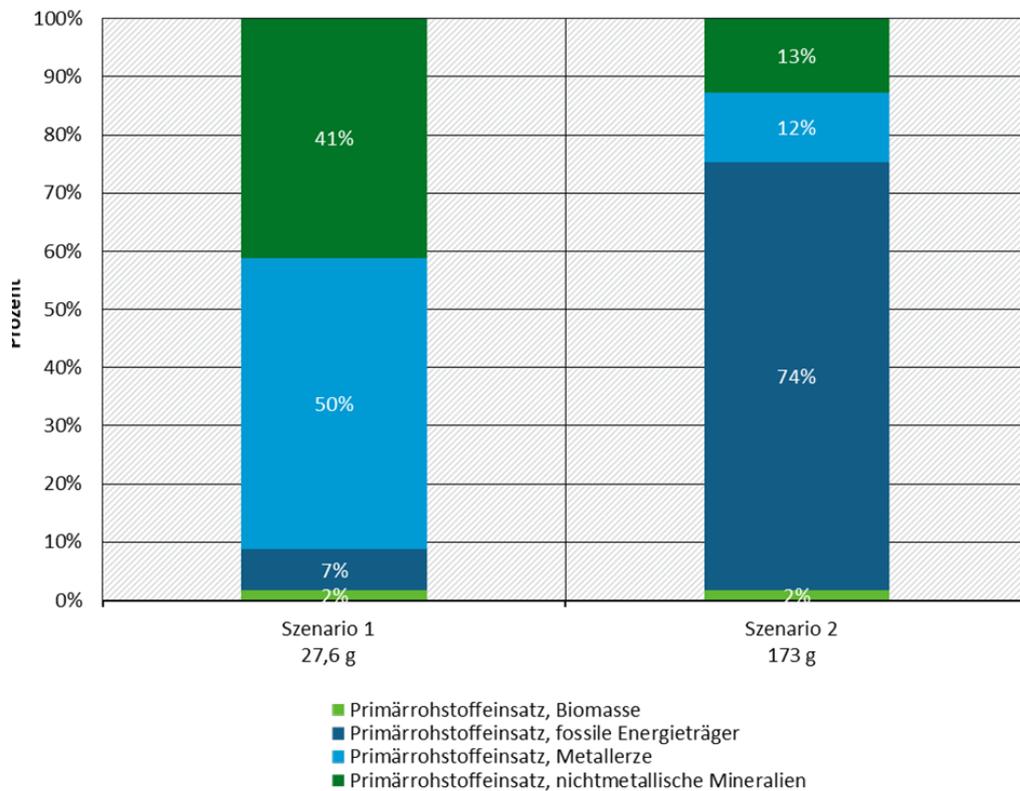
B.3.6.4.1.2 Nutzungsphase

In der Nutzungsphase werden die Ergebnisse von zwei Szenarien gegenübergestellt. Szenario 1 berücksichtigt einen Grünstrommix für das Laden des Elektroautos wohingegen Szenario 2 einen konventionellen Strommix betrachtet.

Die Nutzung des aufgezeigten Carsharing-Systems unter Szenario 1 bedingt einen Primärrohstoffeinsatz von **27,6 g** in der Nutzenphase, welcher durch den Strombedarf des Elektroautos (98,45 %) maßgeblich bestimmt wird. Die verbleibenden 1,55 % werden durch Datenspeicherung (0,77 %), Datenübertragen (0,4 %) und durch die Leistungsaufnahme des Smartphones (0,37 %) verursacht. Der durch die Modellierung errechnete Gesamtprimärmaterialaufwand beläuft sich auf **30,4 g**. In Szenario 2 hingegen bedingt die Nutzung von Carsharing einen signifikant höheren Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand mit **172,6 g (RMI)** und **228,0 g (TMR)**.

Abbildung B-45 zeigt die Anteile der verschiedenen Rohstoffarten am Gesamtwert des Primärrohstoffeinsatzes für beide Szenarien. Durch den Umstand, dass sich der Primärrohstoffeinsatz der Nutzung durch die Strombedarfe des Smartphones, des Elektroautos, der Datenübertragung und der Rechenzentren bedingt, sind die Anteile durch die zugrundeliegenden Strommixe der Nutzung geprägt. Der konventionelle deutsche Strommix, der den verwendeten Datensätzen aus Szenario 2 zu Grunde liegt, ist stark durch die Verwendung fossiler Energieträger geprägt. Hieraus ergibt sich deren anteilige Dominanz am Primärrohstoffeinsatz der Nutzenphase. Außerdem ist der größte Primärrohstoffeinsatz der Nutzenphase sowohl in Szenario 1 (98,5 %) als auch in Szenario 2 (99,8 %) auf den Strombedarf des Elektroautos zurückzuführen. Die Datenspeicherung und -übertragung sowie der Energiebedarf des Smartphones spielen in beiden Szenarien eine untergeordnete Rolle. Beide Szenarien weisen den gleichen Anteil an Biomasseeinsatz auf. Es ist allerdings auffällig, dass in Szenario 1 der Primärrohstoffeinsatz von Metallerzen anteilig deutlich höher ist als in Szenario 2, in dem der Einsatz von fossilen Energieträgern das Bild dominiert. Die Dominanz der Metallerze ist in erster Linie auf das Verteilernetz (66,4 %) zurückzuführen, in dem vergleichsweise viel Kupfer (63,7 %) verarbeitet wird. Des Weiteren haben auch die nichtmetallischen Mineralien einen hohen Anteil am Primärrohstoffeinsatz in Szenario 1. Dieser ist wiederum primär auf die Konstruktion von Wasserkraftanlagen (81,4 %) zurückzuführen.

Abbildung B-45: 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 Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Tabelle B-55: 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) – Tabelle zu Abbildung B-45

Szenario	Primärrohstoff- einsatz, Biomasse	Primärrohstoff- einsatz, fossile Energieträger	Primärrohstoff- einsatz, Metallerze	Primärrohstoff- einsatz, nichtmetallische Mineralien
Szenario 1 27,6 g	0,552 (2%)	1,932 (7%)	13,8 (50%)	11,328 (41%)
Szenario 2 173 g	3,46 (2%)	128,32 (74%)	20,76 (12%)	22,49 (13%)

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

B.3.6.4.2 Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Fußabdruck

Der errechnete kumulierte Energieaufwand (KEA, engl. CED) der Herstellungsphase des genutzten Produktsystems für die Untersuchungseinheit beträgt **1,38 MJ**. Diesem steht ein kumulierter Energieaufwand einer Nutzung von Carsharing für 1 km von **1,29 MJ** in Szenario 1 (Grünstrom) und **2,52 MJ** in Szenario 2 (konventioneller Strommix) gegenüber.

Ähnliches lässt sich auch für den CO₂-Fußabdruck beobachten, für den sich nach der Allokation auf die Untersuchungseinheit ein Treibhauspotenzial von **0,0709 kg CO₂-Äq.** für die Herstellung ergibt. Im Szenario 1 ergeben sich Emissionen von **0,0055 kg CO₂-Äq.** in der Nutzungsphase und in Szenario 2 von **0,1613 kg CO₂-Äq.** Sowohl in Szenario 1 als auch in Szenario 2 entstehen die Emissionen hauptsächlich über den Strommix zum Laden des Elektroautos (Szenario 1: 92,7 %; Szenario 2: 99,8 %). Allerdings fällt unter Szenario 1 die Herstellungsphase mehr ins Gewicht als die Nutzungsphase. In Szenario 2 ist dies umgekehrt (vgl. Abbildung B-46).

Der kumulierte Energieaufwand und das GWP sind in der zusammenfassenden Abbildung B-46 dargestellt und weisen durch die Verwendung fossiler Energieträger und dadurch bedingte Treibhausgasemissionen im Allgemeinen eine hohe Korrelation auf (Valente *et al.*, 2018).

B.3.6.4.3 Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial

Ähnlich den Ergebnissen bei Rohstoffintensität und Energieaufwand zeigt sich bei der Analyse des Wasserfußabdrucks (WDP), dass im Falle der Carsharing-Fallstudie die Ergebnisse in Szenario 1 maßgeblich durch die Herstellung und in Szenario 2 durch die Nutzungsphase dominiert werden. Die Herstellungsphase sorgt für einen Wasserfußabdruck von **0,0006 m³** und die Nutzungsphase im Szenario 1 für einen Wasserfußabdruck von **0,00003 m³**. Im Szenario 2 beträgt der Wasserfußabdruck **0,0015 m³** und ist in diesem Szenario dementsprechend höher als der Fußabdruck der Herstellungsphase. Der Wasserfußabdruck der Herstellungsphase wird maßgeblich durch die Herstellung des Elektroautos (99,97 %) beeinflusst, bei dem die Herstellung der Karosserie exkl. Batterie und die Produktion der Batterie zu gleichen Teilen Wasser verbrauchen. In der Nutzungsphase ist der Energiebedarf für das Laden des Elektroautos sowohl in Szenario 1 (92,7 %) als auch in Szenario 2 (99,75 %) ausschlaggebend für den Wasserfußabdruck.

Die Ergebnisse spiegeln sich auch beim Landnutzungspotenzial (LOP) wider. Während der Herstellungsphase in dieser Wirkkategorie eine Landnutzung von **0,00494 m²a** pro km Carsharing zugeschrieben werden kann, fallen in Szenario 1 (Grünstrom) **0,0013 m²a** und in Szenario 2 (konventioneller Strom) **0,0077 m²a** in der Nutzungsphase an. Beide Indikatoren und die prozentuale Aufteilung zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase sind in der abschließenden Abbildung B-46 dargestellt.

B.3.6.4.4 Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial

Elektroautos sind Gegenstand vieler Ökobilanzen (Aichberger & Jungmeier, 2020). Es steht fest, dass insbesondere die Batterieproduktion für viele Lebenszyklusemissionen entlang der Lieferkette von Elektrofahrzeugen (engl. *battery electric vehicles*, BEVs) verantwortlich ist. Allerdings hängt die die Umweltauswirkung über das gesamte Leben des Elektroautos auch davon ab, inwiefern in der Nutzungsphase ein Grünstrom- oder konventioneller Strommix genutzt wird (European Environment Agency, 2018). Emilsson und Dahllöf (2019) berechneten auf Basis der Literatur THG-Emissionen von Li-Ionen Batterien, die zwischen 61 und 106 kg CO₂

Äq. pro kWh Batteriekapazität (kWh_{bc}) variieren. Aichberger und Jungmeier (2020) berechneten die Umweltbelastungen ebenfalls auf Basis von Literatur mit einem Median von $120 \text{ kg CO}_2 \text{ Äq./kWh}_{bc}$. Die meisten Studien wurden von Forschungseinrichtungen aus den USA, China und europäischen Ländern veröffentlicht. Die amerikanischen und chinesischen Studien gehen meist davon aus, dass die Batterieproduktion im eigenen Land stattfindet, während alle anderen Studien die Batterieproduktion in Asien (China, Japan, Südkorea) verorten (Aichberger & Jungmeier, 2020). Die meisten Forschenden, die den Energiebedarf und die Treibhausgasemissionen von Li-Ionen Batterien untersucht haben, sind sich einig, dass die Zellproduktion einen hohen Anteil an den Umweltauswirkungen hat. In diesen Studien wird die Herstellung der Elektroden in die Zellherstellung einbezogen. Der Trocknungsprozess der Elektroden erfordert viel Strom, um die hohen Temperaturen zu erreichen und aufrechtzuerhalten, und ist daher mit einem hohen Strombedarf verbunden. Nach der Zellproduktion steht die Herstellung des aktiven Kathodenmaterials an zweiter und Aluminium an dritter Stelle der Umweltauswirkungen (Aichberger & Jungmeier, 2020; Dai *et al.*, 2019; Dunn *et al.*, 2012; Kelly *et al.*, 2020). Kelly *et al.* (2020) stellen fest, dass die Herstellungsprozesse sehr energieintensiv sind und ihre Lebenszyklusauswirkungen daher stark vom regionalen Strommix abhängen.

Viele Studien zeigen, dass die Produktion von Elektroautos energie- und ressourcenintensiv ist. Allerdings kann, je nach Strommix in der Nutzungsphase, ein Elektroauto im Vergleich zu einem Verbrenner ein geringeres Treibhauspotenzial aufweisen (European Environment Agency, 2018). Je nach Strommix in der Nutzungsphase schneiden BEVs nach einer Laufleistung von 44.000 bis 70.000 km hinsichtlich der THG-Emissionen besser ab als Fahrzeuge mit Verbrennungsmotor (Ellingsen *et al.*, 2016). Unter der Annahme, dass Elektroautos in der Nutzungsphase primär mit einem Grünstrommix geladen werden und dass es zu einer Reduktion der Autoflotte durch Carsharing kommt, ist zu erwarten, dass Carsharing die THG-Emissionen des deutschen Verkehrssektors senken kann. Allerdings hat die Studie von Hülsmann *et al.* (2018) herausgefunden, dass momentan die Reduktion des Pkw-Bestands in Städten nicht ausreicht. Somit kann durch Carsharing allein momentan keine signifikante Reduktion der innerstädtischen, verkehrsbedingten THG-Emissionen erreicht werden. Weiterhin kann eine Zunahme der Elektrofahrzeuge auch zu einem Anstieg der Stromnachfrage und einem höheren Bedarf an seltenen Erden und anderen, ebenso für die Digitalisierung relevanten Rohstoffen führen. Die Ergebnisse der Fallstudie zur Ressourcenintensität der digitalen Anwendung im Rahmen des Carsharings sollen das Umweltentlastungspotenzial näher beleuchten.

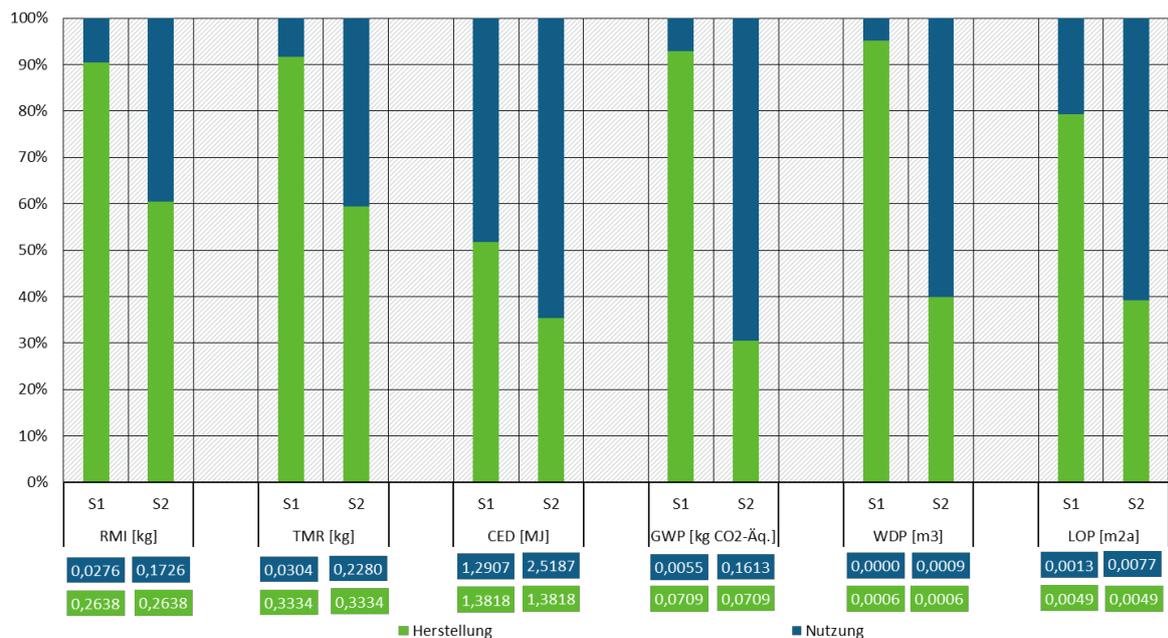
Insgesamt leben in Deutschland Stand 2022 84,4 Mio. Menschen (Statistisches Bundesamt, 2023a). Auf diese kamen im Jahr 2022 48,5 Mio. Pkw (Statistisches Bundesamt, 2023b). Unter der Annahme, dass Carsharing auch auf dem Land so angenommen wird, wie in den deutschen Großstädten, ergibt sich ein Reduktionspotenzial der deutschen Autoflotte von 14.562.270 bis 38.832.720 Pkw (Hülsmann *et al.*, 2018). Werden die 12 % aus der Studie von Kurzweil *et al.* (2023) zugrunde gelegt, ergibt sich ein derzeitiges maximales Reduktionspotenzial von 5.824.908 Pkw. Außerdem kann über eine Weiterentwicklung der Zellchemie der Elektroautobatterien der Einsatz von kritischen Ressourcen eingespart werden. In der Vergangenheit wurde zum Beispiel die Li-Ionen Batterie von einer kobaltintensiven Lithium-Kobalt-Oxid-Batterie (LiCoO_2) zu einer NMLi-Ionen-Batterie weiterentwickelt. Dabei wurde das Konfliktmineral Kobalt teilweise durch Nickel und Mangan ersetzt. NMC Li-Ionen Batterien befinden sich noch immer im Mittelpunkt der Forschung. Sie werden ständig weiterentwickelt (Thielmann *et al.*, 2015), wodurch sich ihre Umwelt- und Ressourcenintensität in Zukunft noch ändern kann.

B.3.6.5 Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie

Abbildung B-46 konzentriert sich vergleichend auf die Aufteilung der berechneten Ressourcenintensitäten und Wirkkategorien zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase. Es ist deutlich zu erkennen, dass über alle Indikatoren hinweg in Szenario 1 der Einfluss der Herstellungsphase dominant ist. Lediglich der kumulierte Energieaufwand (engl. CED) weist ein ausgewogenes Verhältnis zwischen Nutzungs- und Herstellungsphase auf. Wird auch ein konventioneller Strommix in der Nutzungsphase verwendet (Szenario 2), so fällt die Nutzungsphase aufgrund des Strombedarfs für das Elektroauto mehr ins Gewicht.

Der TMR und RMI sind sowohl in Szenario 1 als auch in Szenario 2 hauptsächlich durch die Herstellungsphase bedingt, was auf die ressourcenintensive Produktion der Elektroautos zurückzuführen ist. Für GWP, WDP und LOP ändern sich die Einflüsse je nach Strommix. In Szenario 1 hat die Herstellungsphase einen deutlich höheren Einfluss auf die drei Wirkkategorien als in Szenario 2.

Abbildung B-46: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-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 = CO₂-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

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

Tabelle B-56: Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-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 B-46

Indikator	Szenario	Herstellung	Nutzung	Herstellung %	Nutzung %	Total
RMI	S1	0,2638 kg	0,0276 kg	90,53	9,47	0,2914
	S2	0,26 kg	0,17 kg	60,44	39,56	0,4364
TMR	S1	0,3334 kg	0,0304 kg	91,65	8,35	0,3638
	S2	0,33 kg	0,23 kg	59,39	40,61	0,5614
CED	S1	1,3818 MJ	1,2907 MJ	51,7	48,3	2,6725
	S2	1,38 MJ	2,52 MJ	35,43	64,57	3,9005
GWP	S1	0,0709 kg CO ₂ -Äq	0,0055 kg CO ₂ -Äq	92,81	7,19	0,0764
	S2	0,07 kg CO ₂ -Äq	0,16 kg CO ₂ -Äq	30,54	69,46	0,2322
WDP	S1	0,0006 m ³	0,00003 m ³	95,12	4,88	0,0006
	S2	0,0006 m ³	0,0009 m ³	39,86	60,14	0,0015
LOP	S1	0,0049 m ² a	0,0013 m ² a	79,29	20,71	0,0062
	S2	0,0049 m ² a	0,01 m ² a	39,11	60,89	0,0126

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

Aufgrund der hohen Emissionen durch den Individualverkehr, gewinnen alternative Mobilitätskonzepte immer mehr an Bedeutung. Geteilte Fahrzeugnutzung sowie die Bündelung von Verkehr können zu einer wesentlichen Reduktion von Emissionen führen. In Deutschland erreicht die Angebotsdichte von Carsharing im Durchschnitt 33 Fahrzeuge pro 100 000 Einwohner*in, wobei es deutliche Unterschiede zwischen einzelnen Kommunen gibt. Laut einer Umfrage in deutschen Großstädten nutzen 4 % regelmäßig Carsharing-Angebote. Bis 2030 wird beim Carsharing ein Nutzungsanteil von maximal 1,8 % erwartet und voraussichtlich keine Alternative zur Nutzung des eigenen Pkw darstellen (EFI, 2022). Zusätzlich bestrebt Deutschland einen Wandel vom motorisierten zum elektrifizierten Individualverkehr (Bundesregierung, 2022; Mayr, 2023). Um Carsharing anbieten zu können, müssen große Mengen an Daten über den Standort des Autos, Ladestand der Autobatterien, Verfügbarkeiten der Autos etc. zur Verfügung stehen. Aus diesem Grund wurde untersucht, wie groß die Umwelteinflüsse und Ressourcenintensität von Carsharing ist, wenn ebenfalls die IKT-Infrastruktur berücksichtigt wird. Des Weiteren wurden 2 Szenarien analysiert, die sich im Strommix für das Laden der Elektroautos unterscheiden (EFI, 2022).

Die Analyse zeigt deutlich, dass das Umweltentlastungspotenzial von Carsharing mit E-Autos unter einem Grünstrommix deutlich höher ist als unter einem konventionellen Strommix. Des Weiteren fallen in diesem Zuge die Nutzung- und Datenspeicherung von Smartphone-Apps kaum ins Gewicht. In beiden Szenarien entstehen die größten Umweltbelastungen durch das Laden oder die Nutzung des Elektroautos selbst. In keiner Wirkkategorie hatte das Smartphone, das Rechenzentrum oder die Datenübertragung in Nutzung einen Einfluss von 8 % und höher. Somit ist deutlich, dass die IKT-Nutzung in diesem Fall zu keiner Erhöhung der Ressourcenintensität führt. Aus der Literaturanalyse in Verbindung mit den Ergebnissen der Fallstudie kann somit geschlussfolgert werden, dass die Umweltentlastung allein durch die Nutzung von Grünstrom

und Elektroautos bereits gegeben ist. Allerdings darf nicht außer Acht gelassen werden, dass die Herstellung von Elektroautos ressourcenintensiv ist. Im Falle des Carsharings müssen die Einsparnisse an Autos durch die geteilte Nutzung berücksichtigt werden. Wie beschrieben, haben mehrere Studien untersucht, wie viele Autos durch Carsharing eingespart werden könnten. Die Umfrage von Kurzweil *et al.* (2023) ergab, dass 12 % der Befragten ihr Privatfahrzeug durch Carsharing Angebote ersetzen würden. Umgerechnet auf die 3,3 Mio. Anmeldungen bei Carsharing ergibt das eine Ersparnis von 396.000 Autos, unter der Voraussetzung, dass eine Person auf ein Fahrzeug kommt. Würden 3,3 Millionen einen Kilometer mit einem Elektroauto fahren, ergäben sich Emissionen von 234.300 kg CO₂-Äq. pro km für die Herstellungsphase. Wenn von den 3,3 Millionen nicht jede Person ein eigenes Auto besitzt, sondern nur 88 %, ergeben sich 206.184 kg CO₂-Äq., was einer Ersparnis von 28.116 kg CO₂-Äq. pro km entspricht. Allerdings ist bei dieser überschlägigen Rechnung kritisch anzumerken, dass 88 % der Nutzenden ihr privates Fahrzeug nicht aufgeben werden und somit zusätzlich zu ihrem privaten Fahrzeug auch Gebrauch von Carsharing machen. Inwiefern es zu einer Reduktion der deutschlandweiten Autoflotte durch Carsharing kommen kann, ist daher fraglich. Die Fallstudie zeigt, dass Carsharing von Elektroautos und unter Berücksichtigung eines Grünstrommixes ein hohes Umweltentlastungspotenzial aufweisen kann. Allerdings müssen die richtigen Anreizsysteme für die Nutzenden geschaffen werden, um zu einer Reduktion der deutschlandweiten Autoflotten durch Carsharing zu kommen.

B.3.7 Fallstudie Kryptowährung

B.3.7.1 Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung

Kryptowährungen und die zugrundeliegenden Technologien haben sich in den vergangenen Jahren rasant entwickelt. Inzwischen gibt es mehr als 6.600 Kryptowährungen, deren Fortschritt von der Öffentlichkeit, Zentralbanken und Regulatoren aufmerksam verfolgt wird. Das Marktvolumen an Kryptowährungen, welche global innerhalb von 24 Stunden gehandelt wurden, lag zu Beginn des Jahrs 2019 unter 10 Milliarden Dollar. Bis Ende des Jahres 2021 erreichte dieselbe Kennziffer Höhen von über 130 Milliarden Dollar, bevor sie Ende des Jahres 2022 wieder auf Werte unter 30 Milliarden Dollar abfiel (Live Coin Watch, 2022). Auch wenn diese Entwicklung ein Auf- und Ab beschreibt, gewinnen Kryptowährungen zunehmend an gesellschaftlicher und politischer Relevanz. Belegen lässt sich dies nicht zuletzt dadurch, dass einige Großbanken Termingeschäfte für Kryptowährung anbieten und dass El Salvador als erstes Land Bitcoin, die am weitesten verbreitetste Kryptowährung, als offizielles Zahlungsmittel anerkennt (Scher, 2022). Auch akzeptieren bekannte Großunternehmen wie Microsoft und Starbucks inzwischen Bitcoin als Zahlungsmittel und der Onlinebezahlendienst PayPal ermöglicht als erster großer Zahlungsanbieter seiner Kundschaft in den USA Zahlungen in Bitcoin durchzuführen (Scher, 2022).

Funktionsweise und Nutzen von Kryptowährungen

Kryptowährungen sind digital erzeugte Vermögenswerte, die unabhängig und ohne zentrale Steuerung funktionieren, indem die einzelnen Vermögenswerte in einer dezentralen Datenbank (i.d.R. basierend auf der sog. Blockchain-Technologie³⁰) festgehalten werden. Diese Datenbank ist öffentlich einsehbar und basiert auf einer Vielzahl individueller Knotenpunkte, welche miteinander kommunizieren, um Transaktionen abzusichern. Die Blockchain-Technologie gilt als manipulations- und fälschungssicher.

Kryptowährungen bringen viele Vorteile mit sich. Sie sind fälschungssicher, erlauben es weltweit ohne Wechselgebühren Zahlungen zu transferieren und kommen durch ihre dezentrale Organisation und anonymisierte Zahlungen dem Wunsch vieler Menschen nach mehr Datenschutz im Netz nach. Zudem haben sich Kryptowährungen über die Jahre durch teils rasante Kursgewinne zu zunehmend begehrteren Spekulationsobjekten entwickelt. Während die venezolanische Wirtschaft im Jahr 2021 durch Hyperinflation und Sanktionen am Boden war, verbreiteten sich Kryptowährungen dort rasant, um Überweisungen zu tätigen, Löhne vor Inflation zu schützen und zur Unterstützung von Unternehmen bei der Verwaltung ihrer Cashflows in Zeiten einer schnell abwertenden Währung (Ellsworth, 2021).

Zentral- und Geschäftsbanken forschen und prüfen angesichts der Konkurrenz durch die verschiedenen Kryptowährungen an der Einführung von digitalem Geld. Künftig könnten daher auch private und staatliche digitale Währungen global im Wettstreit miteinander stehen. Es ist durchaus vorstellbar, dass in naher Zukunft neben den üblichen Bezahlungsmöglichkeiten bar, mit Karte oder mittels einer Bezahl-App, auch eine weitere Bezahloption flächendeckend angeboten werden wird: Bezahlen mit einer digitalen Währung, nahezu überall auf der Welt, in Echtzeit und (fast) gebührenfrei (Groß *et al.*, 2020).

Kritik an Kryptowährungen außerhalb des Nachhaltigkeitsbereichs

Kryptowährungen stellen auch für die derzeitigen Rechts- und Regulierungssysteme eine enorme Herausforderung dar, da es kaum möglich ist, diese Netzwerke zentral zu regulieren. Die dezentralisierten, auf der Blockchain basierenden Kryptowährungen laufen der bestehenden zentralisierten Struktur der Geld- und Finanzregulierung zuwider (Nabilou, 2019). Obwohl gerade dieser Umstand von Befürwortenden der Kryptowährungen als Vorteil für die Nutzenden dargestellt wird, bestehen hier auf Seite von Finanzbehörden und Regulatoren Bedenken bezüglich der makroökonomischen Steuerung im Falle von Finanzkrisen und anderen Notständen.

B.3.7.2 Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie

Um die Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie zu beschreiben, ist es zunächst notwendig, die Grundlagen der den Kryptowährungen zugrundeliegenden Blockchain-Technologie und ihre Anwendung näher auszuführen

³⁰ Für weitere Informationen zur Blockchain-Technologie siehe Abschnitt „

Blockchain-Technologie und ihre Anwendung in Kryptowährungen“

B.3.7.3 Blockchain-Technologie und ihre Anwendung in Kryptowährungen

Die Bundesnetzagentur beschreibt eine Blockchain als „ein verteiltes Register, in dem digitale Datensätze, Ereignisse oder Transaktionen in chronologischer Reihenfolge für alle Teilnehmer*innen nachvollziehbar in Datenblöcken gespeichert (*Block*) und unveränderbar miteinander verkettet (*Chain*) werden“ (Bundesnetzagentur, 2021). Bei einer Blockchain handelt es sich um eine sogenannte *Distributed-Ledger-Technologie*. Diese besitzen keinen übergeordneten Verwalter oder zentralen Datenspeicher, sondern bestehen aus Rechnern, die sich über ein *Peer-to-Peer* Netzwerk miteinander austauschen, indem neue Transaktionen im Netzwerk auf Basis verschiedener Konsensmechanismen überprüft werden (Bundesnetzagentur, 2021).

Kryptowährungen nutzen dieses Prinzip, indem sie alle Transaktionen innerhalb einer Währung, in Blöcken zusammengefasst, auf allen im Netzwerk beteiligten Rechnern transparent, chronologisch und unveränderbar in ihrer Blockchain abspeichern (Bundesnetzagentur, 2021). Um diese Leistungen des Netzwerks bereitzustellen, müssen Teilnehmende Hardware-Ressourcen zur Verfügung stellen, die sich über Netzknoten austauschen und so die Dokumentation in der Blockchain und die Verifikation von Transaktionen leisten. Diese Leistung wird von sogenannten *Minern* erbracht. *Miner* sind Rechner, welche neue Blöcke in einer Blockchain bilden und dafür in *Coins* der entsprechenden Kryptowährung entlohnt werden. Zur Teilnahme an der Kryptowährung ist es nicht notwendig *Miner* zu sein. Es wird lediglich eine entsprechende Software, die sogenannte *Wallet*, benötigt, die ein Schlüsselpaar aus öffentlichem und privatem Schlüssel verwaltet, mit dem Transaktionen im Netzwerk ausgelöst werden können. So waren beispielsweise in der Bitcoin-Blockchain zum Stand Dezember 2022 über 85.000.000 *Wallets* angemeldet (Blockchain.com, 2022).

Zum Betrieb von Blockchains werden aktuell hauptsächlich zwei Mechanismen genutzt, mit denen ein Konsens darüber hergestellt werden kann, wie Miner neue Blöcke schaffen und sie an die bestehenden Blöcke anfügen können – die bereits erwähnten *Proof-of-Work* und *Proof-of-Stake* Methoden. In der PoW-Methode, die als der sicherste Konsensmechanismus gilt, treten alle beteiligten Miner gegeneinander an, komplexe mathematische Probleme zu lösen. Der erste Miner, der das Problem löst, darf einen Block mit Transaktionen zur Blockchain hinzufügen und wird dafür mit *Coins* entlohnt. Der Algorithmus, der die Blockchain antreibt, ist dabei so konzipiert, dass die Anzahl der pro Zeiteinheit hinzugefügten Blöcke konstant bleibt, indem die Komplexität der gestellten mathematischen Probleme angepasst wird. Daher werden mit steigender Größe des Netzwerks immer höhere Rechenleistungen notwendig, um diese zu lösen, was mit einem stark steigenden Stromverbrauch einhergeht. Bei der PoS-Methode werden nur geringe Rechenleistungen bei den *Minern* benötigt. Jedoch 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).

B.3.7.4 Produktsystem und Betrachtungsgrenzen

Obwohl prinzipiell jede Person mit Zugriff auf das Internet an einer oder mehreren Kryptowährung-Blockchains teilnehmen kann, wird in einschlägiger Literatur zum Materialaufwand und Energiebedarf von Kryptowährungen lediglich das Mining betrachtet (vgl. Mir, 2020; de Vries *et al.*, 2021; de Vries *et al.*, 2022; de Vries & Stoll, 2021; Roeck & Drennen, 2022). Dies liegt daran, dass der Material- und Energiebedarf für das Mining den der Teilnehmer*innen um solche Weiten übersteigt, dass deren Einfluss auf die gesamten Umwelteffekte als vernachlässigbar eingeschätzt wird. Aus diesem Grund werden sich die weiteren Ausführungen und Erhebungen dieser Fallstudie vorrangig auf das Mining beziehen.

Bei der Analyse des Minings ist es zunächst essenziell, zwischen den möglichen Konsensmechanismen zu unterscheiden. Da bei PoS keine komplexen Gleichungen gelöst werden müssen, kann hier das Mining ohne spezielle Hardware, welche eine hohe Rechenleistung bereitstellt, erfolgen. Anders verhält es sich bei Kryptowährungen, die PoW nutzen. Bei diesen ist ab einer gewissen Größe des Netzwerks beim Mining das Hinzufügen eines neuen Blocks und verdienen der entsprechenden Entlohnung ohne spezielle Hardware nahezu ausgeschlossen. Daher werden im Falle etablierter PoW-Währungen für das Mining inzwischen hauptsächlich ganze Mining-Anlagen (vergleichbar mit Rechenzentren) genutzt, welche zudem größtenteils mit hochspezialisierten Chips ausgerüstet sind. Im Falle des Bitcoins hat sich die hauptsächlich zum Mining genutzte Hardware von Hauptprozessoren (CPUs) über Grafikkarten (GPUs) und *Field Programmable Gate Arrays* (FPGAs) bis hin zu anwendungsspezifischen integrierten Schaltkreisen (ASICs) entwickelt, welche für keine andere Anwendung als das Mining von Bitcoins verwendet werden können (Taylor, 2017). Der Aufbau der Anlagen und die verwendete Hardware unterscheidet sich individuell zwischen den einzelnen *Minern* und verändern sich stark über die Zeit, da Mining-Hardware in der Regel binnen 1,5 Jahren veraltet ist und ausgetauscht werden muss. Diese Faktoren sind mit einem erheblich höheren Bedarf an Ressourcen und Energie verbunden. Der PoW-Mechanismus ist weit verbreitet und wird z.B. bei der populären Kryptowährung Bitcoin angewendet. Angesichts dessen basieren die quantitativen Analysen dieser Fallstudie auf der Annahme des PoW-Mechanismus.

Die Größenordnung und technische Ausstattung der einzelnen Mining-Anlagen können je nach Betreiber und Geografie stark variieren. Die einer Anlage zuschreibbaren Umwelteffekte und Ressourcenbedarfe sind zudem stark davon abhängig auf welche Art der für das Mining verwendete Strom erzeugt wurde. Da auch diese zwischen den einzelnen Anlagen oft stark fluktuiert, ist die Analyse einer spezifischen Mining-Anlage nur begrenzt aussagekräftig für ein gesamtes Krypto-Netzwerk.

Im Rahmen dieses Vorhabens soll ein Versuch unternommen werden, möglichst ein gesamtes Krypto-Netzwerk bezüglich des assoziierten Ressourcenbedarfs und seiner potenziellen Umwelteffekte zu analysieren. Aufgrund von Datenlücken und -unsicherheiten sind hierbei einige Vereinfachungen und Annahmen zu treffen. Zudem können indirekte externe Effekte des Krypto-Netzwerks, wie zum Beispiel Veränderungen in anderen Sektoren des Finanzmarkts, welche durch das Aufkommen und die Verbreitung einer Kryptowährung bedingt werden, im Rahmen dieses Vorhabens nicht quantitativ berücksichtigt werden.

B.3.7.5 Systematik der Fallstudie

Im Rahmen dieser Fallstudie sollen, auch beispielhaft für die mögliche Entwicklung anderer PoW-Kryptowährungen, der assoziierte Ressourcenbedarf und ausgewählte Umweltwirkungen des *Bitcoins* untersucht werden. Das Bitcoin-Netzwerk eignet sich am besten für eine Darstellung der Größenordnung verursachter Umwelteffekte und des Ressourcenverbrauchs, da Bitcoin für grob zwei Drittel des Energieverbrauchs aller Kryptowährungen verantwortlich ist (Gallersdörfer *et al.*, 2020).

Ressourcenbedarf und Umweltwirkungen des Bitcoin-Netzwerks werden nach aktuellem Forschungsstand hauptsächlich von der Erzeugung des Stroms für das Mining sowie der Herstellung und Entsorgung von spezieller Mining Hardware, sog. *ASIMinern*, beeinflusst (vgl. (Stoll, Klaaßen & Gallersdö, 2019; de Vries & Stoll, 2021; de Vries *et al.*, 2022)). Dem folgend ist die Datenverfügbarkeit für Strombedarf und Hardwarenutzung des Bitcoin-Netzwerkes deutlich umfassender als für andere Teile und Aspekte dieser Kryptowährung. Die Untersuchungen und Abschätzungen in diesem Vorhaben konzentrieren sich daher auf Strombedarf und Nutzung von Mining-Hardware.

Für den globalen Strombedarf sowie den dahinterliegenden Strommix finden sich in der Literatur Werte unterschiedlicher Größe. Dies liegt daran, dass zur Erhebung eine Reihe von Annahmen und Abschätzungen zur globalen Aufteilung des Minings, dem Stromverbrauch der Hardware u. ä. getroffen werden müssen. Zudem sind besagte Werte über die Zeit nicht konstant, sondern schwanken saisonal, mit sich änderndem Preis des Bitcoins und Größe des Netzwerks und aufgrund lokaler gesetzlicher Änderungen, welche das Mining tangieren. Um ein möglichst umfassendes Bild des potenziellen Ressourcenbedarfs und der Umweltwirkungen des Bitcoin Netzwerkes zu geben, fließen daher in diesem Vorhaben verschiedene Werte für Strombedarf und Stromzusammensetzung in die Erhebung mit ein und die Ergebnisse werden vergleichend dargestellt.

B.3.7.6 Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie

B.3.7.6.1 Untersuchungseinheit

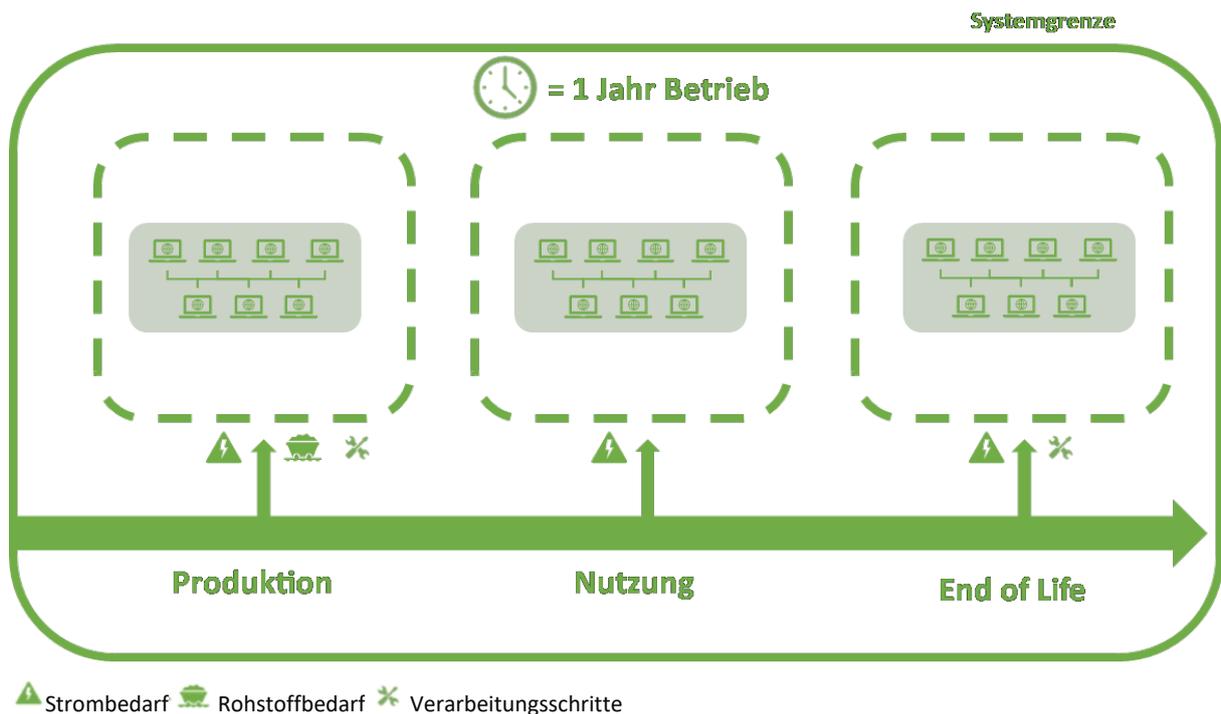
Für die Fallstudie wurde folgende Untersuchungseinheit gewählt:

Einjähriger Betrieb (jährlicher Stromverbrauch und pro Jahr genutzte Mining-Hardware) des Bitcoin Netzwerks

Hierbei wird für den Stromverbrauch die Erzeugung des Stroms in verschiedenen Szenarien sowohl nach ihrer geografischen Verteilung als auch nach der Art der Erzeugung aufgeschlüsselt modelliert. Für die Mining-Hardware wird sowohl die Herstellung als auch die Abfallbehandlung nach der Nutzungsphase berücksichtigt³¹. Hierbei wird die jährlich entsorgte Menge an Mining-Hardware als Basis herangezogen. Abbildung B-47 gibt eine Übersicht über die Fallstudie und die betrachteten Komponenten.

³¹ Die Abfallbehandlung wird im Rahmen dieser Fallstudie beispielhaft für elektrische und elektronische Abfälle betrachtet, da diese im Kontext der Kryptowährungen im Hinblick auf die Literatur und dortige Hinweise auf die verursachte Menge an Elektroschrott von besonderem Interesse sind.

Abbildung B-47: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“



▲ Strombedarf 🗑️ Rohstoffbedarf ✖️ Verarbeitungsschritte

Annahmen in der Berechnung: Einjähriger Betrieb (jährlicher Stromverbrauch und pro Jahr genutzte Mining-Hardware) des Bitcoin-Netzwerks.

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

B.3.7.6.2 Komponenten und betrachtete Systeme

Die Modellierung der betrachteten Systeme und ihrer Komponenten erfolgt aufgeteilt auf die Stromerzeugung, welche die Umweltwirkungen und den Ressourcenverbrauch der jährlichen Nutzung des Bitcoin-Netzwerks abbildet, und die Herstellung und Entsorgung der pro Jahr verbrauchten Menge an Mining-Hardware.

B.3.7.6.2.1 Strombedarf und -mix

Schätzungen zum jährlichen Strombedarf des Bitcoin-Netzwerks werden von mehreren Portalen online zur Verfügung gestellt und laufend aktualisiert. Tabelle B-57 zeigt eine Auswahl von Werten für den jährlichen Stromverbrauch, die sich auf den meist genutzten und weithin anerkannten Onlineportalen für diesen Zweck finden.

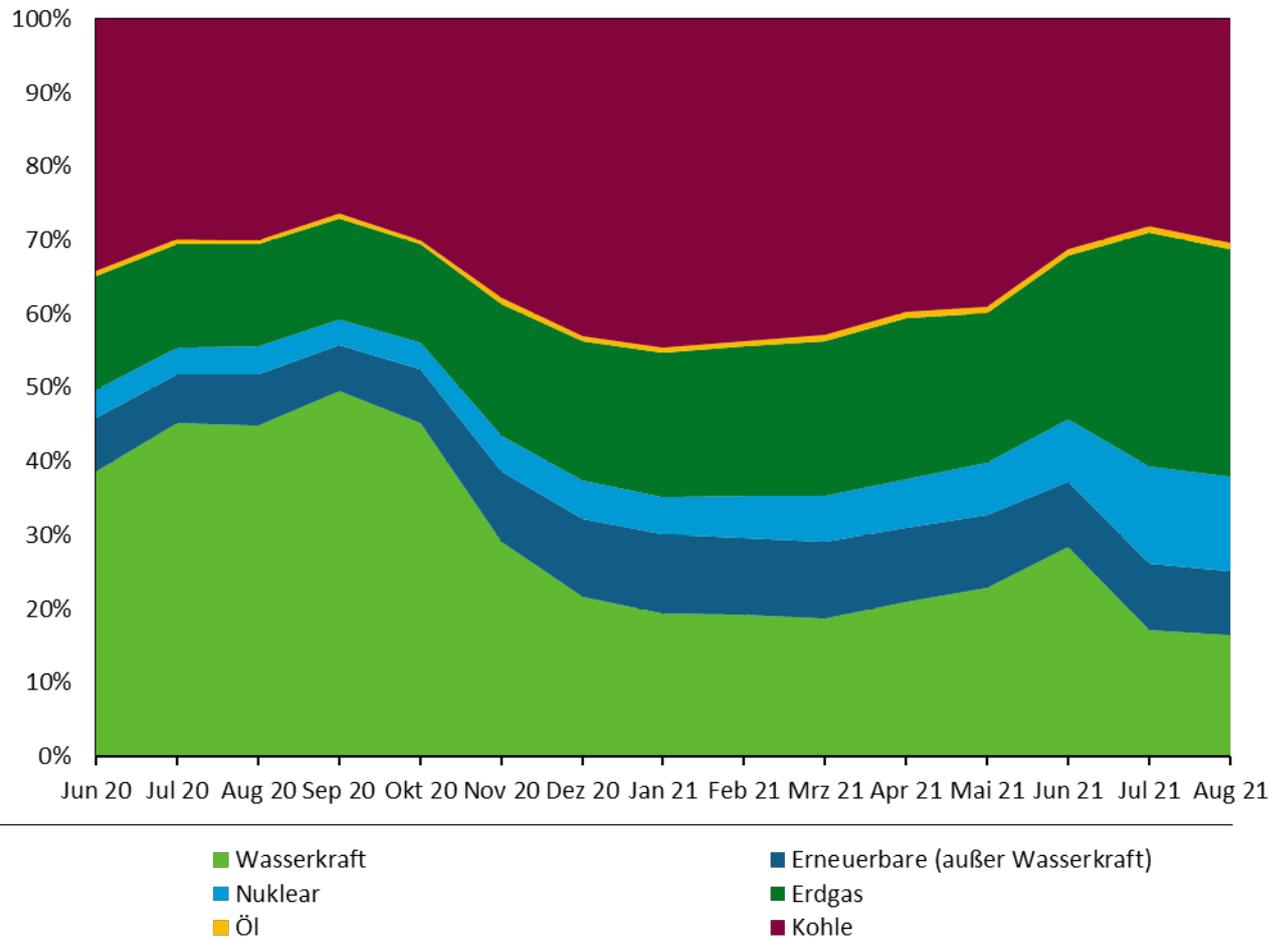
Tabelle B-57: Angaben zum jährlichen Stromverbrauch des Bitcoin-Netzwerks

Quelle	Jährlicher Stromverbrauch des Bitcoin-Netzwerks [tWh]	Stand
Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index	93,78	05.01.2023
Digiconomist (2022)	73,67	04.01.2023
CCRI (2022)	96,46	03.01.2023

Es fällt auf, dass die angegebenen Werte um bis über 20 Terrawattstunden (tWh) schwanken (was in etwa dem jährlichen Stromverbrauch z. B. des Landes Azerbaijan entspricht). Daher werden im Rahmen dieses Forschungsvorhabens Szenarien diesbezüglich untersucht. Im **Standard-Szenario** wird der konservativste der drei angegebenen Werte für die Modellierung des Stromverbrauchs zu Grunde gelegt. In einem zweiten Szenario wird untersucht, wie stark sich die Ergebnisse verändern, wenn man den höchsten der drei Werte zu Grunde legt.

Schätzungen über den Anteil erneuerbarer Energien am Strommix des Bitcoin-Mining reichen von 39 % (Umfrage des Cambridge Centre for Alternative Finance) über 58 % (Brancheninitiative namens Bitcoin Mining Council) bis zu 73 % (*Coinshares*) (de Vries *et al.*, 2022). De Vries *et al.* (2022) haben den Anteil der verschiedenen Stromquellen berechnet, indem sie die Standortdaten des Bitcoin-Minings mit den entsprechenden Strommischen kombiniert haben. Anschließend wurden die Daten auf eine einheitliche und aggregierte Ebene umgruppiert. Abbildung B-48 zeigt die resultierenden Anteile der verschiedenen Stromquellen für den Zeitraum von Juni 2020 bis August 2021 (aktuellere Daten sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Studie nicht vorhanden). Für den jüngsten angegebenen Zeitpunkt (August 2021) ergibt sich ein Anteil erneuerbarer Energien von 25 %. Zusätzlich zur eigenen Berechnung der Anteile aus den verschiedenen Stromquellen, sind in derselben Publikation auch die Anteile der verschiedenen Länder an den Standorten des Bitcoin-Minings angegeben. Tabelle 60 listet die acht Länder mit den höchsten prozentualen Anteilen. Für die Modellierung des Strommixes, welcher den zuvor beschriebenen Verbräuchen zugrunde liegt, werden daher ebenfalls zwei Ansätze genutzt und vergleichend dargestellt – im Standardszenario werden die von de Vries u. a. berechneten Anteile der verschiedenen Energieerzeugungsarten der Modellierung zugrunde gelegt. In einem weiteren Szenario werden für die Modellierung die Strommische der in Tabelle B-58 genannten Länder entsprechend ihren Anteilen gewichtet als Berechnungsgrundlage verwendet.

Abbildung B-48: Anteil verschiedener Stromquellen am Strommix des Bitcoin-Minings von Juni 2020 bis August 2021 in Prozent



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach de Vries *et al.* (2022)

Tabelle B-58: Anteile verschiedener Länder am Globalen Bitcoin Mining (Stand August 2021) in Prozent

Land	Anteil am globalen Bitcoin Mining
Vereinigte Staaten	35,40%
Kasachstan	18,10%
Russland	11,23%
Andere	10,43%
Kanada	9,55%
Malaysia	4,59%
Deutschland	4,48%
Iran	3,11%
Irland	3,11%

Quelle: de Vries *et al.* (2022)

B.3.7.6.2 Herstellung und Entsorgung der Mining-Hardware

Da die technische Lebensdauer von spezieller Mining-Hardware in der Regel den Zeitraum, in dem das Gerät gewinnbringend eingesetzt werden kann, übersteigt, werden die entsprechenden Geräte bereits vor Ende ihrer Lebensdauer aussortiert. Aktuelle Mining-Geräte lassen sich, wie in B.3.7.4 beschrieben, für keine andere Aufgabe oder Mining einer anderen Art von Kryptowährung verwenden. Daher bestimmt die Geschwindigkeit, mit der diese Geräte veraltet bzw. nicht mehr gewinnbringend sind, deren Lebensende. De Vries (2019) geht davon aus, dass Mining-Ausrüstung nach 1,5 Jahren nicht mehr ökonomisch profitabel verwendet werden kann und ersetzt wird. Unter dieser Annahme berechnet die Plattform *Digiconomist* die jährlich durch das Bitcoin-Netzwerk anfallende Menge von Elektroschrott mit 41,11 kt (Digiconomist, 2022).

Die Modellierung der Herstellung und Entsorgung der Mining-Hardware erfolgt in Anlehnung an Köhler und Pizzol (2019). Mangels der Verfügbarkeit von spezifischen Datensätzen für Mining-Hardware in der Ecoinvent-Datenbank wurde dort die Modellierung von *ASIMinern* mit den Ecoinvent-Datensätzen *“market for desktop computer without screen”* und *“mechanical treatment of used desktop computer”* getätigt. Da sich zwischenzeitlich die Verfügbarkeit spezifischer Datensätze in der Ecoinvent-Datenbank nicht verbessert hat, werden in dieser Studie dieselben Datensätze (aktualisiert auf die Datenbankversion 3.8) zur Modellierung verwendet.

B.3.7.6.3 Zusammenfassung der verwendeten Szenarien

Tabelle B-59 fasst die in der Modellierung verwendeten Szenarien abschließend zusammen.

Tabelle B-59: Szenarien der Modellierung für die Fallstudie „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“

Szenario	Annahme jährlicher Strombedarf des Bitcoin-Netzwerks [tWh]	Basis des verwendeten Strommix	Menge jährlich hergestellte und entsorgte Mining-Hardware [kt]
Standard	73,67	Stromquellen nach de Vries <i>et al.</i> (2022)	41,11
Hoher Strombedarf	96,46	Stromquellen nach de Vries <i>et al.</i> (2022)	41,11
Länder-Strommix	73,67	Strommische der entsprechenden Länder aus Ecoinvent 3.8	41,11

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023; Digiconomist (2022); **CCRI (2022)

B.3.7.7 Ergebnisse zur Ressourcenintensität

B.3.7.7.1 Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme

Der errechnete Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand der verschiedenen Szenarien für den einjährigen Betrieb des Bitcoin-Netzwerks ist in Tabelle B-60 aufgeführt. Hierbei wird die Gesamthöhe des Rohstoffeinsatzes in allen Szenarien maßgeblich durch den Stromverbrauch des Bitcoin-Minings beeinflusst. Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Abbildung B-49 bildet dies für den Primärrohstoffeinsatz der drei berechneten Szenarien ab. Im Vergleich zum Standardszenario ergibt sich im Szenario mit hohem angenommenem

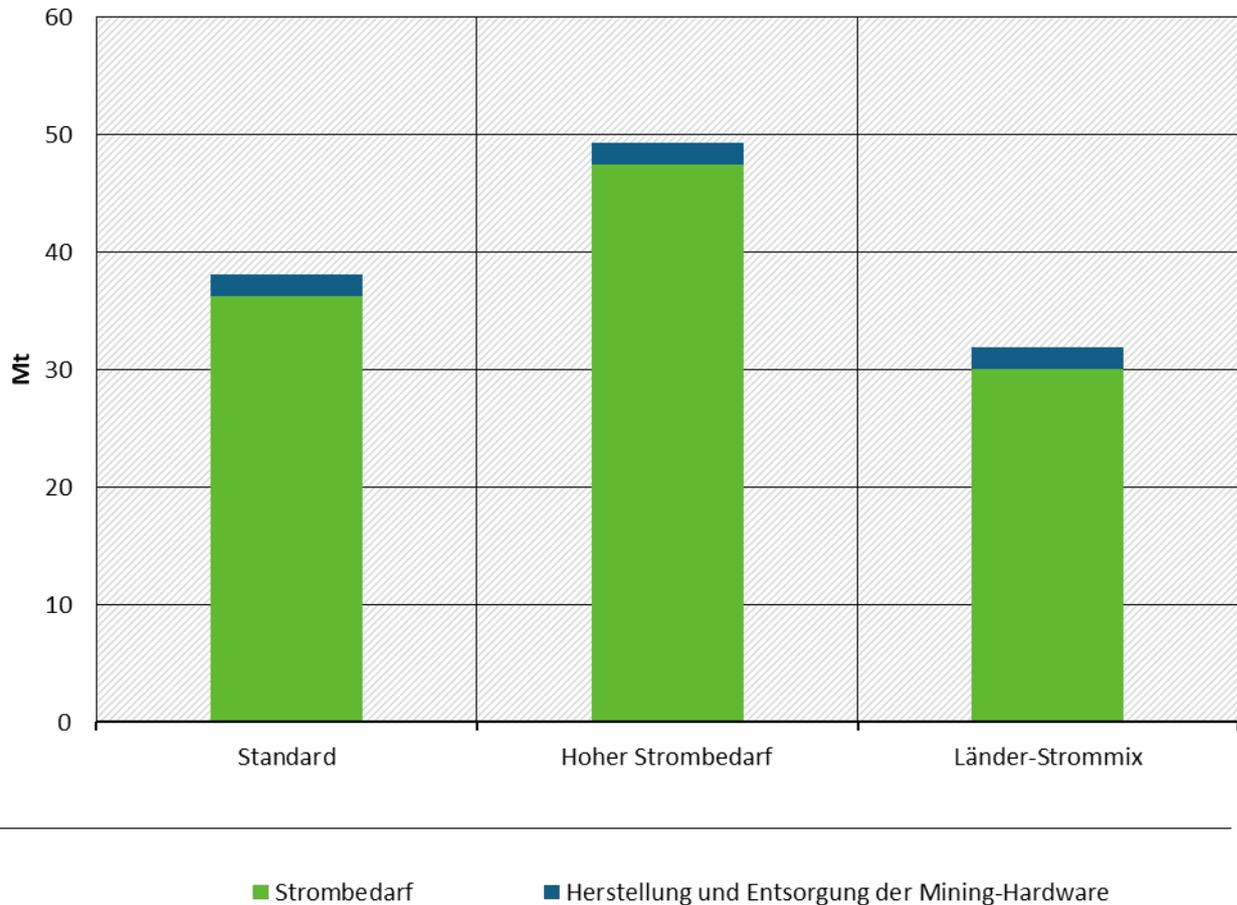
Stromverbrauch ein knapp 30 % höherer Primärrohstoffeinsatz. Für das Szenario, welches die Strommixe der einzelnen Länder der Energienutzung zu Grunde legt, errechnet sich ein fast 20 % geringerer Primärrohstoffeinsatz als im Basisszenario.

Tabelle B-60: Ergebnisse der berechneten Szenarien „Standard, hoher Strombedarf und Länder-Strommix“ für den Primärrohstoffeinsatz und den Gesamtprimärmaterialaufwand für die Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Megatonnen

Szenario	Primärrohstoffeinsatz [Mt]	Gesamtprimärmaterialaufwand [Mt]
Standard	38,1	44,8
Hoher Strombedarf	49,3	58,0
Länder-Strommix	32,0	41,4

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

Abbildung B-49: Vergleich des Primärrohstoffeinsatzes der drei Szenarien „Standard, hoher Strombedarf und Länder-Strommix“ für die Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Millionen Tonnen



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

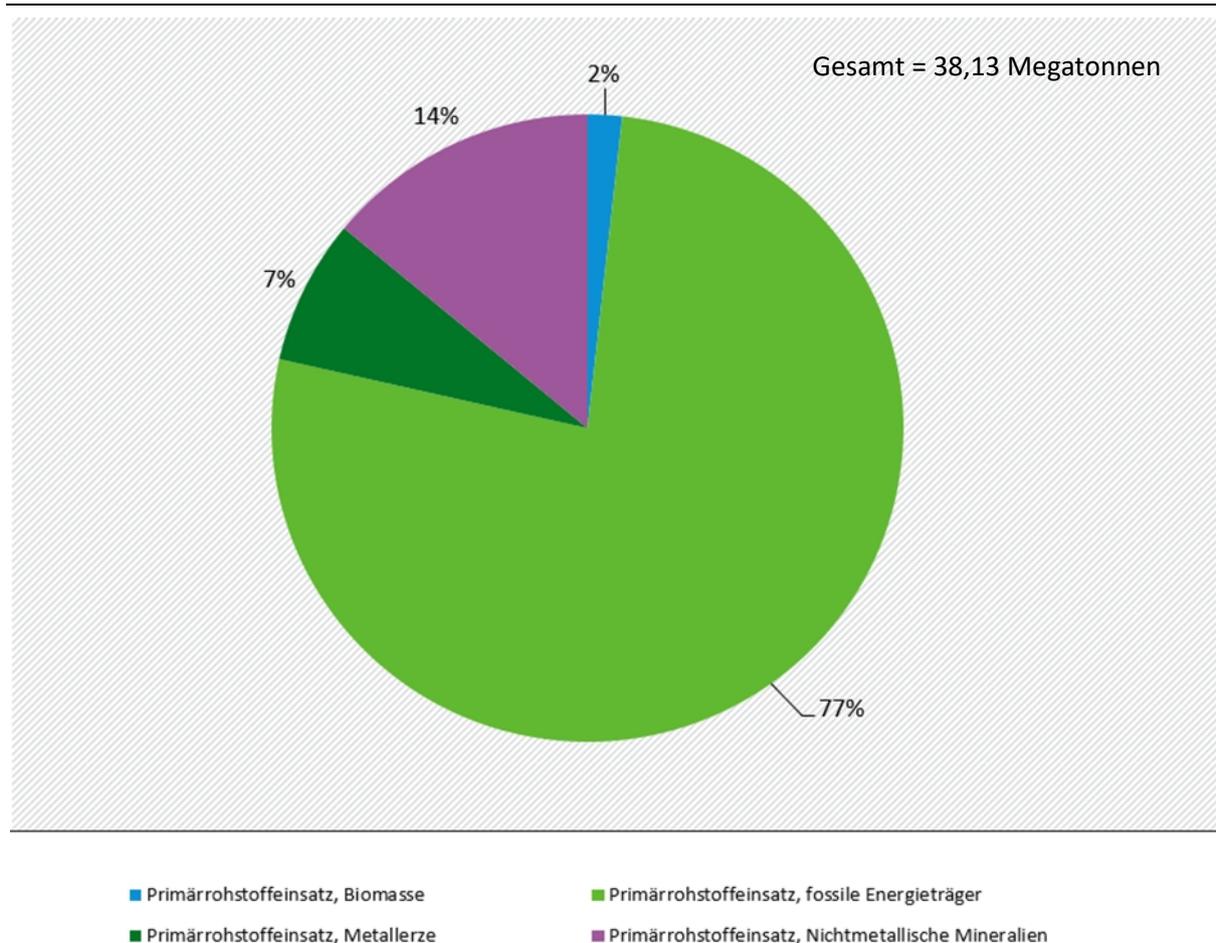
Tabelle B-61: Vergleich des Primärrohstoffeinsatzes der drei Szenarien „Standard, hoher Strombedarf und Länder-Strommix“ für die Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Megatonnen

Szenario	Strombedarf	Herstellung und Entsorgung der Mining-Hardware
Standard	36,22	1,91
Hoher Strombedarf	47,42	1,91
Länder-Strommix	30,04	1,91

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

Betrachtet man die Zusammensetzung des Primärrohstoffeinsatzes im Basisszenario (Abbildung B-50), zeigt sich, dass der überwiegende Anteil (77 %) aus fossilen Energieträgern besteht. Dies wird maßgeblich durch die hohe Relevanz des Strombedarfs und im darunterliegenden Energiemix hohen Anteil fossiler Energiequellen beeinflusst.

Abbildung B-50: Anteile Primärrohstoffeinsatz des Bitcoin-Netzwerkbetriebs im Standardszenario zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Prozent*



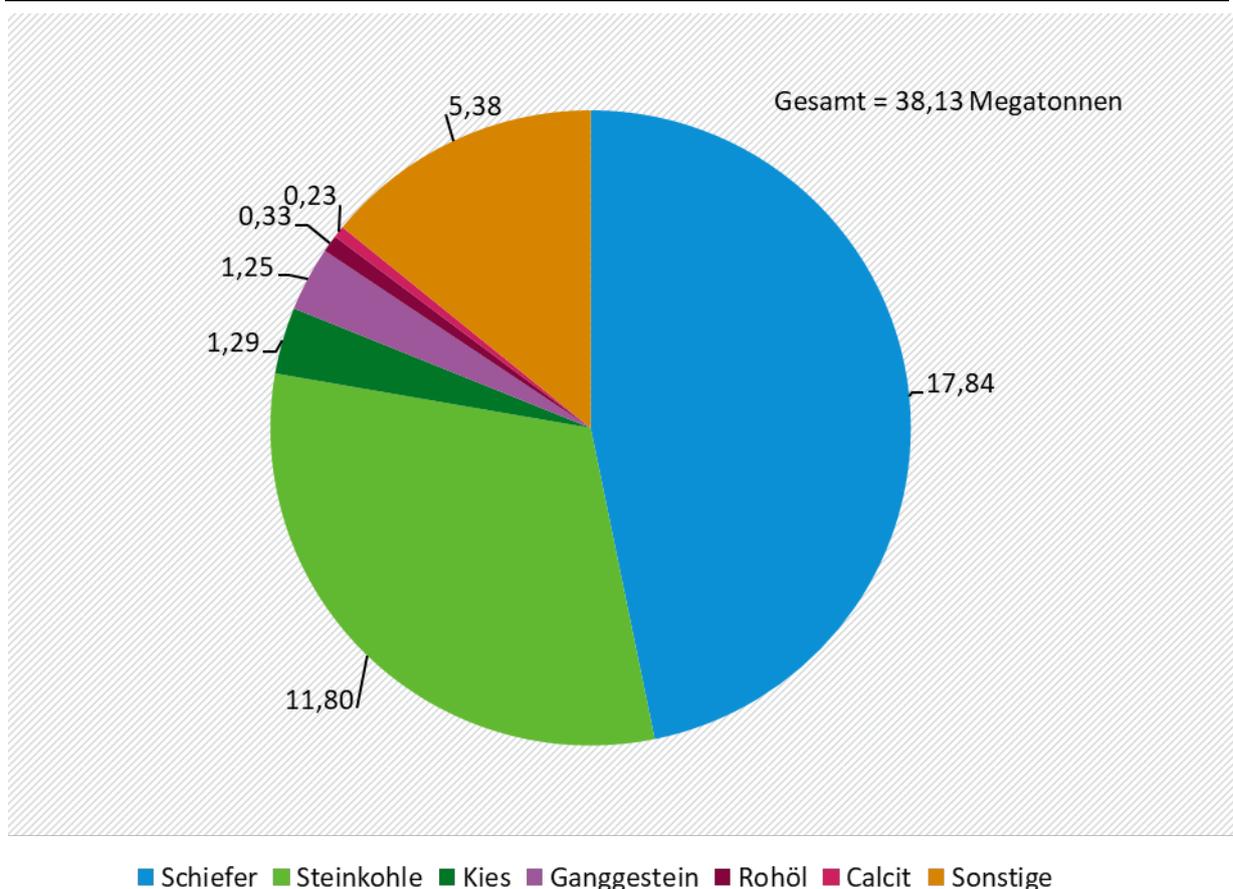
* Die Abbildung zeigt gerundete Zahlen

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

Der RMI von fossilen und mineralischen Rohstoffen liegt bei 33,32 Mt (vgl. Abbildung B-51). Um den Bedarf an Strom und Hardware zum Betrieb des Bitcoin-Netzwerks zu decken, wird eine

Vielzahl verschiedener fossiler und biotischer Rohstoffe aufgewendet, verarbeitet oder als Energielieferant umgesetzt. Abbildung B-51 zeigt die sechs mengenmäßig relevantesten Rohstoffe, deren eingesetzte Masse sowie schematisch deren Anteil an der Gesamtmenge eingesetzter Rohstoffe. Schiefer und Steinkohle stellen mit zusammen 77,7 % des Gesamtaufwandes die wichtigsten Input-Materialien dar. Der Aufwand beider Rohstoffe ist vorwiegend der Stromgewinnung aus Steinkohle und den damit verbundenen Prozessen zuzurechnen. Kies, Ganggestein, Rohöl und Calcit stellen zusammen weitere 8,4 % des Rohstoffeinsatzes. Alle anderen Rohstoffe machen 13,9 % der Einsatzmenge aus.

Abbildung B-51: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Megatonnen



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

Neben den massenmäßig am meisten aufgewendeten Ressourcen zum Betrieb des Bitcoin-Netzwerks sind auch Ressourcen von Interesse, deren Bedarf zwar nominell niedrig erscheint, die jedoch aufgrund ihrer Relevanz für die Digitalisierung von hohem Interesse sind. Diese digitalisierungsrelevanten Rohstoffe umfassen auch eine Reihe sogenannter kritischer Rohstoffe, deren Kritikalität sich aus einer Kombination von wirtschaftlicher Bedeutung für die EU und Versorgungsrisiko ergibt (Europäische Kommission, 2020). Hintergründe zu den verschiedenen Rohstoffkategorien und eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise bei der Auswertung sind in Kapitel B.2 zu finden. Tabelle B-62 listet zunächst für alle Szenarien die Menge von digitalisierungsrelevanten Rohstoffen auf und unterscheidet dabei in kritische Rohstoffe (inkl. zweier Subkategorien) sowie laut EU zwar nicht kritische jedoch sonstige für die

Digitalisierung und die damit in Verbindung stehenden Geräte und Infrastrukturen relevanten Rohstoffe.

Tabelle B-62: Erforderliche Menge digitalisierungsrelevanter Rohstoffe zum einjährigen Betrieb des Bitcoin-Netzwerks für die drei Szenarien „Standard, hoher Stromverbrauch und Länder-Strommix“ zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Tonnen

Rohstoff	Standard	Hoher Stromverbrauch	Länder-Strommix
Kritische digitalisierungsrelevante Rohstoffe	691	751	892
... davon seltene Erden	12	15	18
... davon Platingruppenmetalle	0,02	0,02	0,03
Andere digitalisierungsrelevante Rohstoffe	7124	8091	9699

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

Bemerkenswert ist in diesem Zusammenhang, dass das Szenario, das die Stromzusammensetzung der einzelnen Länder als Grundlage für den Stromverbrauch verwendet, die höchsten Bedarfswerte für die digitalisierungsrelevanten Rohstoffe ergibt, obwohl der angenommene Gesamtstrombedarf mehr als 20 % niedriger ist als im Szenario mit einem hohen Stromverbrauch. Die sich ergebenden erforderlichen Mengen an digitalisierungsrelevanten Rohstoffen sind folglich stark davon abhängig, welche Art der Stromerzeugung der Modellierung zu Grunde gelegt wird (z. B. benötigten Technologien zur Erzeugung erneuerbarer Energie verhältnismäßig mehr digitalisierungsrelevante Rohstoffe als konventionelle Energieerzeugungsprozesse).

Tabelle B-63 zeigt für ausgewählte digitalisierungsrelevante Rohstoffe die eingesetzte Menge zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit und den entsprechenden Anteil an der jährlichen Gesamtentnahme des Rohstoffs. Auffällig ist vor allem die im Verhältnis zur jährlichen globalen Gesamtentnahme des Rohstoffs erhebliche Menge an Tantal, welche zur Herstellung der Mining-Hardware benötigt wird (der Anteil der Stromerzeugung am errechneten Tantal-Bedarf ist < 0,1%)³².

³² Auf die Darstellung der Werte für Kupfer und Lithium wurde hier im Gegensatz zu den meisten anderen Fallstudien bewusst verzichtet, da die Ergebniswerte von untergeordneter Rolle verglichen zu den anderen hier dargestellten Rohstoffen sind.

Tabelle B-63: Ausgewählte digitalisierungsrelevante Rohstoffe, ihre eingesetzte Menge zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ im Standardszenario und Anteil an der jährlichen Gesamtentnahme des Rohstoffs

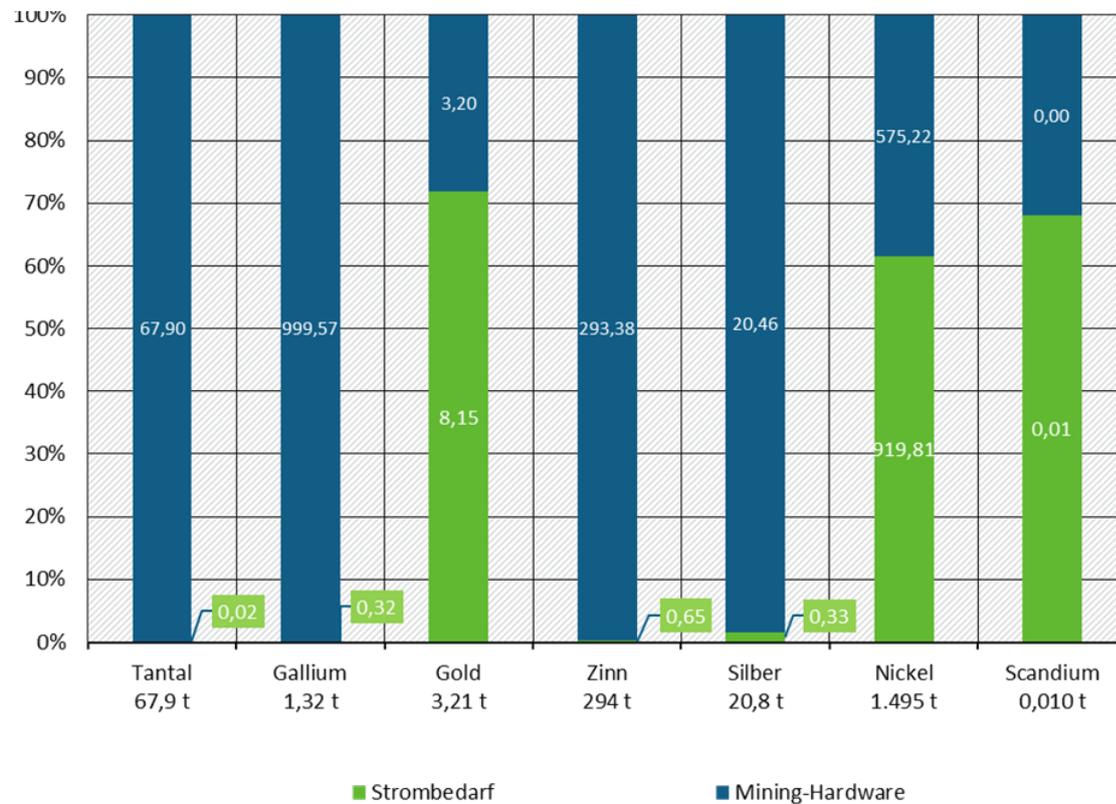
Rohstoff	[t]	Anteil an der jährlichen Gesamtentnahme*
Tantal	67,9	3,66 %
Gallium	1,32	0,31 %
Gold	3,21	0,11 %
Zinn	294	0,10 %
Silber	20,8	0,09 %
Nickel	1495	0,06 %
Scandium	0,010	0,06 %

*Anmerkung: Indikative Werte zur Abschätzung der Größenordnung; die zwei wesentlichen Annahmen betreffen die Gesamtentnahmemenge, welche aus verschiedenen Quellen entnommen wurde (siehe Kapitel B.2) und den verwendeten Datensatz für den Miner (Computer zum Mining von Kryptowährungen; siehe B.3.7.6.2.2).

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

In Abbildung B-52 ist für die ausgewählten digitalisierungsrelevanten Rohstoffe jeweils dargestellt, welcher Anteil der berechneten Menge durch den Strombedarf und welcher durch die Mining-Hardware verursacht wird. Bemerkenswert ist, dass die Mining-Hardware, welche bei Betrachtung des Primärrohstoffeinsatzes und Gesamtprimärmaterialaufwands noch weit weniger relevant schien als der Strombedarf, auf dem Level einzelner digitalisierungsrelevanter Rohstoffe durchaus eine prägende Rolle spielt. Der Rohstoffbedarf der Mining-Hardware setzt sich aus dem Bedarf bei der Herstellung und dem Bedarf bei der Abfallbehandlung des Elektroschrotts im Lebensende zusammen – der Anteil von letzterem am Rohstoffbedarf der Mining-Hardware liegt jedoch bei keinem der gezeigten Rohstoffe über 0,1 %.

Abbildung B-52: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Prozent und Tonnen



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

Tabelle B-64: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Prozent und Tonnen – Tabelle zu Abbildung B-52

Rohstoffe	Strombedarf	Mining-Hardware
Tantal: 67,9 t	0,1848 (0,03%)	67,90476 (99,97%)
Gallium: 1,32 t	0,31565 (24%)	0,99957 (76%)
Gold: 3,21 t	0,00815 (0,25%)	3,20291 (99,75%)
Zinn: 294 t	0,65084 (0,22%)	293,37983 (99,78%)
Silber: 20,8 t	0,32717 (1,57%)	20,45777 (98,43%)
Nickel: 1.495 t	919,811 (61,52%)	575,21855 (38,48%)
Scandium: 0,010 t	0,00708 (68,07%)	0,00332 (31,93%)

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

B.3.7.8 Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Fußabdruck

Die Ergebnisse für den CO₂-Fußabdruck und kumulierten Energieaufwand sind in Tabelle B-65 aufgelistet. Dort ist erkennbar, dass die Ergebnisse dieser beiden Kategorien deutlich miteinander korrelieren, der CO₂-Fußabdruck im Szenario Länder-Strommix am höchsten

ausfällt, wohingegen der kumulierte Energieaufwand im Szenario Hoher Strombedarf den höchsten Wert erreicht. Dies erklärt sich durch die unterschiedlichen Anteile der einzelnen Stromerzeugungsarten in den zugrundeliegenden Energiemixen, v. a. der mit einem niedrigen CO₂-Fußabdruck konnotierten Nuklearenergie.

Insgesamt werden beide Indikatoren maßgeblich durch den Strombedarf des Bitcoin-Netzwerks beeinflusst, welcher in allen untersuchten Szenarien über 97 % des Ergebniswertes beim CO₂-Fußabdruck und über 98 % des Ergebniswertes beim kumulierten Energieaufwand bedingt.

Tabelle B-65: CO₂-Fußabdruck und kumulierter Energieaufwand des einjährigen Betriebs des Bitcoin-Netzwerks für die Szenarien „Standard, hoher Strombedarf und Länder-Strommix“ zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in Megatonnen

Szenario	CO ₂ -Fußabdruck [Mt CO ₂ -Äq.] (1 Mt CO ₂ -Äq. = 10 ⁹ kg CO ₂ -Äq.)*	Kumulierter Energieaufwand [PJ] (1 PJ = 10 ⁹ MJ)*
Standard	33,7	641
Hoher Strombedarf	43,9	836
Länder-Strommix	45,7	778

*zum Vergleich: Primärenergiebedarf Deutschland 2018: 13.129 PJ (1 PJ = 10⁹ MJ) (BMWi, 2020); CO₂-Fußabdruck in Deutschland: 762 Mt CO₂-Äq. (Umweltbundesamt, 2022c)

Die errechneten Werte zum CO₂-Fußabdruck des Bitcoin-Netzwerkes lassen sich zur Abschätzung der Validität der Ergebnisse in den Vergleich zu Literaturwerten setzen. Der *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index* gibt den jährlichen CO₂-Fußabdruck des Bitcoin-Netzwerks mit 48,22 Mt CO₂-Äq. an, laut Digiconomist fallen 42,80 Mt CO₂-Äq. an (Digiconomist, 2022; CBECI, 2023). Berners-Lee beziffert in der aktualisierten Auslage seines Buchs *How bad are bananas? The carbon footprint of everything* den Fußabdruck des Netzwerks mit 46 Mt CO₂-Äq. (Berners-Lee, 2020). Die in diesem Vorhaben errechneten Werte weisen eine vergleichbare Größenordnung auf. Auffallend ist, dass der CO₂-Fußabdruck des Standardszenarios geringer ist als der von Digiconomist berechnete, obwohl sich essenzielle Annahmen dieser Studie auf die Berechnungsgrundlagen von Digiconomist beziehen. Dies unterstreicht den enormen Einfluss, den die Annahmen zur Zusammensetzung des Strommixes und die Wahl der in einer Modellierung verwendeten Datensätze auf die Ergebnisse einer solchen Studie hat. Der Unsicherheitsbereich der Berechnungen des CO₂-Fußabdrucks des Bitcoin-Netzwerks ist daher aufgrund der notwendigen Menge an Annahmen bezüglich des Strommixes generell als eher groß anzusehen.

B.3.7.8.1 Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial

In Tabelle B-66 sind die errechneten Ergebnisse für den Wasserfußabdruck und das Landnutzungspotenzial des einjährigen Bitcoin-Netzwerkbetriebs für die untersuchten Szenarien abgebildet. Hierbei fällt auf, dass im Szenario, welches den Strommix der einzelnen Länder zu Grunde legt, in beiden Kategorien der höchste Wert errechnet wird. Im Falle des Landnutzungspotenzials ist der Wert in diesem Szenario mehr als doppelt so groß wie der im Standardszenario errechnete Wert. Dies liegt daran, dass der Anteil an landwirtschaftlich genutzter Fläche im Szenario Länder-Strommix deutlich größer ausfällt als in den anderen beiden Szenarien. Der Hintergrund hierfür ist, dass im amerikanischen Strommix, der für den in den USA stattfindenden Anteil des Minings im Modell hinterlegt ist, ein relevanter Anteil der

Stromgewinnung in Blockheizkraftwerken stattfindet. Die darin verbrannten Hackschnitzel bringen ein hohes Landnutzungspotenzial mit sich.

In beiden untersuchten Indikatoren ist der Strombedarf des Bitcoin-Netzwerks der hauptsächlich gestaltende Faktor. Beim Wasserfußabdruck werden in allen untersuchten Szenarien mindestens 88 % des Ergebniswertes durch den Stromverbrauch beim Mining bedingt, beim Landnutzungspotenzial sind es über 90 %.

Tabelle B-66: Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial des einjährigen Betriebs des Bitcoin-Netzwerks für die Szenarien „Standard, hoher Strombedarf und Länder-Strommix“ zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ in km³ und km²a

Szenario	Wasserfußabdruck [km ³]	Landnutzungspotenzial [km ² a]
Standard	0,16	618
Hoher Strombedarf	0,20	790
Länder-Strommix	0,23	1602

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

B.3.7.8.2 Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial

B.3.7.8.2.1 Nachteilige Effekte hinsichtlich Ressourcenbedarf und Treibhausgasemissionen

Kryptowährungen und insbesondere der Bitcoin als prominenteste Währung sind inzwischen zunehmend öffentlicher Kritik ausgesetzt. Grund hierfür ist insbesondere der enorme Strombedarf, welcher mit Bitcoins verbunden ist. Je nach Quelle bewegt sich der aktuell geschätzte jährliche Bedarf auf dem Level des Strombedarfs von Argentinien oder den Niederlanden (Criddle, 2021; Digiconomist, 2022). Hierzu wird von Befürwortenden von Kryptowährungen oft argumentiert, dass das Bitcoin-Netzwerk zu einem großen Teil mit erneuerbaren Energien betrieben werden würde, da die hierzu benötigten Rechenzentren nicht an bestimmte Standorte gebunden seien und sich deshalb dort platzieren, wo Strom besonders günstig sei und damit oft erneuerbar sei³³. Dementgegen stehen jedoch aktuelle Abschätzungen, die besagen, dass das Bitcoin-Netzwerk vor allem seit in China das sogenannte Mining (welches für den Netzbetriebs essenziell ist) verboten wurde, im globalen Durchschnitt mit weniger als 30 % Anteil erneuerbarer Energien betrieben wird (de Vries *et al.*, 2022). Obwohl andere Kryptowährungen diesbezüglich weniger prominent in der Kritik sind als der Bitcoin, da sie deutlich weniger genutzt werden, ist bei allen Kryptowährungen, welche die *Proof-of-Work* (PoW)-Methode des Netzbetriebs nutzen, der Strombedarf als kritisch zu betrachten. Sollte die Nutzung der Währungen auf das Niveau des Bitcoins ansteigen, dürfte auch deren Strombedarf auf vergleichbare Größen steigen.

Es ist somit unbestritten, dass Kryptowährungen durch ihren teils enormen Energiebedarf schon heute maßgebliche Umwelteffekte in Form von Treibhausgasemissionen bei der Stromerzeugung verursachen. Der CO₂-Fußabdruck einer Bitcoin Transaktion entspricht derzeit nach Angaben der Plattform Digiconomist dem Äquivalent des CO₂-Fußabdrucks von über 1,5 Millionen Visa-Transaktionen (Digiconomist, 2022). In einer im April 2021 gestartete

³³ v. a. saisonal erneuerbare Energien sind vielerorts schon heute deutlich preiswerter als fossile Energieträger.

Initiative des Privatsektors haben bereits einige Akteure*Akteurinnen im Feld der Kryptowährungen eine Vereinbarung unterzeichnet, in der sie sich verpflichten, ab 2030 lediglich Strom aus erneuerbaren Energien in den von ihnen betriebenen Teilen der Netzwerkinfrastruktur zu nutzen (de Vries *et al.*, 2022). Jedoch ist aktuellen Einschätzungen zu Folge der Anteil fossiler Stromerzeugung am global von Bitcoin genutzten Strommix im letzten Jahr gestiegen. Zudem gibt es Befürchtungen, dass die Nutzung von erneuerbarem Strom für den Betrieb von Kryptowährungen die Energiewende bei wichtigen Dienstleistungen verzögern könnte. So forderten zum Beispiel die schwedische Finanzaufsichtsbehörde und die schwedische Umweltschutzbehörde im November 2021 aus dieser Besorgnis heraus ein Verbot des Mining von Kryptowährungen (de Vries *et al.*, 2022).

Kritisiert wird bei Kryptowährungen jedoch nicht nur der Strombedarf und die damit verbundenen Triebhausgasemissionen. Vor allem der Bitcoin steht im Verdacht deutlich am Ressourcenbedarf der Digitalisierung beteiligt zu sein, da laut Schätzungen große Mengen Elektroschrott durch den Betrieb des Zahlungsnetzwerkes anfallen. Aktuelle Studien gehen davon aus, dass pro Bitcoin-Transaktion im Zahlungsnetzwerk dieselbe Menge an Elektroschrott anfällt, welche durch die Entsorgung eines iPads entstehen würde (Hern, 2021; de Vries & Stoll, 2021; Digiconomist, 2022).

Die Idee, dass ein rapider Anstieg der Nutzung erneuerbarer Energien die negativen Umwelteffekte von Kryptowährungen beseitigen würde, lässt das Problem des durch Kryptowährungen entstehenden Elektroschrotts außer Augen. Mit steigendem Wert des Bitcoins entwickelte sich die dazugehörige Branche rasant und das System, welches das Bitcoin-Netzwerk bereitstellt, erreichte eine Größe, welche der Rechenleistung von 3,2 Milliarden High-End-Grafikkarten entspricht. Aktuelle Schätzungen zufolge sind die zum Betrieb des Bitcoin-Netzwerkes genutzten Chips nach weniger als 1,5 Jahren veraltet und müssen ausgetauscht werden, da sie für den Betreiber ab diesem Punkt mehr Stromkosten verursachen, als sie durch den Betrieb des Netzwerkes erwirtschaften (de Vries, 2019; de Vries & Stoll, 2021). Diese Chips sind in der Regel inzwischen so spezialisiert, dass sie danach für keine andere Verwendung in Frage kommen (auch nicht für das Mining eines anderen Krypto-Coins) (Taylor, 2017; de Vries & Stoll, 2021). Stellt man dem beispielhaft die im Jahr 2020 in Deutschland erreichte Sammelquote von 44,1 % beim Elektroschrott gegenüber (Umweltbundesamt, 2022b), wird deutlich, dass die durch den anfallenden Elektroschrott des Netzwerkes erwartbaren Umweltfolgen drastisch sein dürften.

B.3.7.8.2.2 Reduktion der Umwelteffekte und mögliche Entlastungspotenziale

Eine Aussicht in die zukünftige Entwicklung dieser Umwelteffekte ist schwer bereitzustellen, da bei der PoW-Methode sowohl die Menge der im Netzwerk einer Kryptowährung genutzten Rechenleistung als auch der damit verbundene Strombedarf stark vom Marktwert des jeweiligen Coins abhängen, welcher sich wiederum nicht vorhersagen lässt. Es besteht dennoch die Erwartung, dass der erfolgreiche Übergang von *Ethereum*, der zweitgrößten Kryptowährung nach Bitcoin, zu der deutlich energieeffizienteren *Proof-of-Stake* (PoS)-Methode für den Netzwerkbetrieb dazu führen wird, dass der Strombedarf selbst großer und etablierter Kryptowährungen in Zukunft erheblich reduziert wird. Es wird davon ausgegangen, dass das *Ethereum*-Netzwerk durch den Wechsel von PoW zu PoS seinen Strombedarf um mindestens 99,84 % reduziert hat (de Vries, 2022).

Bezüglich möglicher Umweltentlastungspotenziale können im Fall von Kryptowährungen keine eindeutigen Aussagen getroffen werden. Befürwortende von Kryptowährungen referenzieren oftmals auf den hohen Energiebedarf des Bankensektors für deren Bereitstellung von

physischen Niederlassungen, auf welche Kryptowährungen nicht angewiesen sind. Es ist jedoch schwer vorstellbar, dass sich Kryptowährungen in absehbarer Zukunft derart ausbreiten werden, dass sie zu einer Verkleinerung des klassischen Bankensektors und dessen Umweltwirkungen führen.

B.3.7.8.2.3 Umweltentlastungspotenziale auf Basis der Literaturrecherche und der Ergebnisse

Bezüglich potenzieller Umweltentlastungen für den Anwendungsfall des Bitcoins zeichnet die identifizierte Literatur ein düsteres Bild. Aufgrund der bestehenden Studienlage ist davon auszugehen, dass das Bitcoin-Netzwerk durch seinen immensen Strombedarf und Bedarf an Mining-Hardware aktuell eine deutliche Zusatzbelastung für die Umwelt schafft. Auch die Berechnungen dieses Vorhabens unterstützen diese Aussage. De Vries (2019) gibt an, dass für den Bitcoin im Jahr 2018 81,4 Millionen Transaktionen verarbeitet wurden. Laut Online Recherche liegt die aktuelle Anzahl täglicher Transaktionen heute auf ähnlichem Niveau wie 2018 (YCharts, 2023), wonach diese Zahl weiterhin als guter Maßstab für die Menge der Bitcoin-Transaktionen gesehen werden kann. Unter Berücksichtigung der Eckdaten der Modellierung ergibt sich ein Energiebedarf von 905 kWh pro Transaktion und ein CO₂-Fußabdruck von 414 kg pro Transaktion im Standardszenario. Im Visa-Netzwerk wurden zum Vergleich im Jahr 2021 über 226 Milliarden Transaktionen durchgeführt (Statista, 2022g). Der durchschnittliche CO₂-Fußabdruck für eine VISA-Transaktion entspricht 0,4 g bzw. 0,0004 kg CO₂-Äq (de Vries, 2019). Durch das zeit- und rechenintensive PoW-Verfahren beim Mining neuer *Blocks*, welche für das Festhalten von Transaktionen auf der Blockchain benötigt werden, sind für das Bitcoin-Netzwerk eine starke Zunahme des Transaktionsvolumens und damit einhergehende potenzielle Effizienzgewinne als gering einzuschätzen. Auch werden Bitcoin und andere nicht-besicherte Kryptowährungen, die außerhalb des konventionellen Finanzsystems produziert werden, von vielen Experten*Expertinnen u. a. wegen der hohen Volatilität nicht als direkter Konkurrent für Bargeld und Bankeinlagen gesehen.

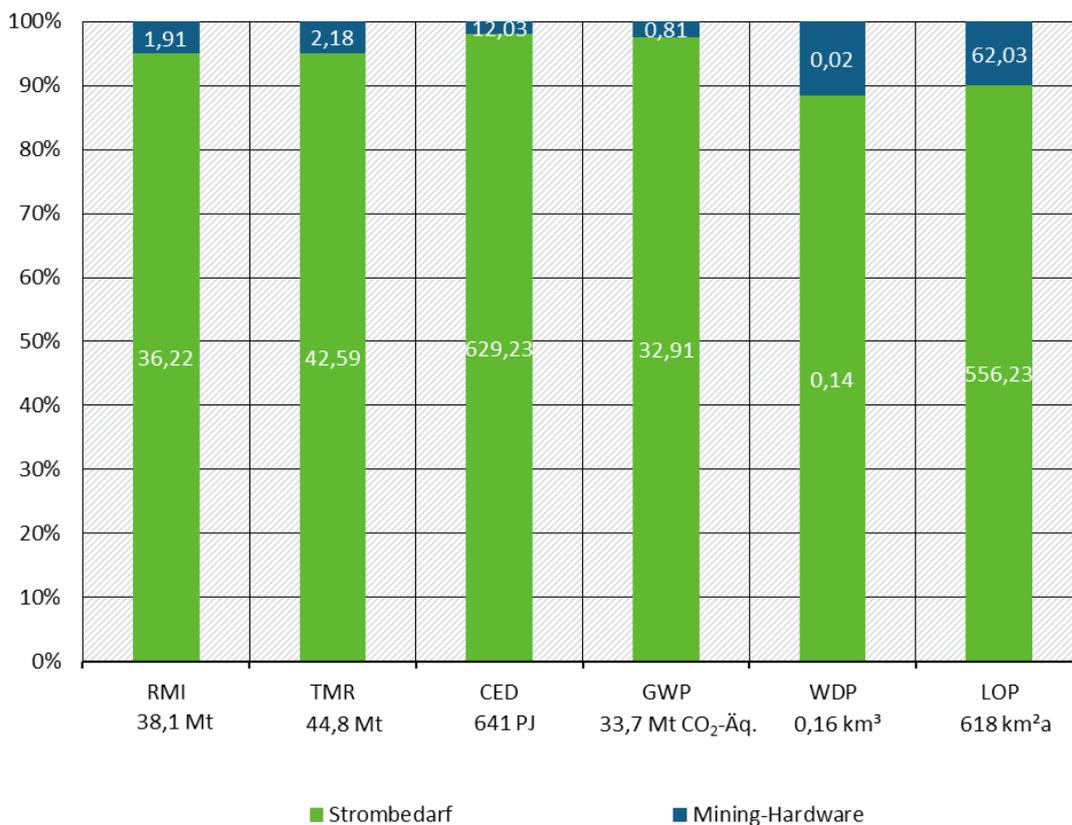
Befürwortende von Kryptowährungen führen an dieser Stelle an, dass die Nachhaltigkeitsperformance der Blockchain stark von der Art der Stromerzeugung für ihren Betrieb abhängt und verweisen zudem auf den nicht gering einzuschätzenden Fußabdruck des Bankensektors einschließlich dessen System aus Filialen und Automaten. Hierbei wird jedoch übersehen, dass auch durch den verstärkten Einsatz erneuerbarer Energien der enorme Bedarf an kurzlebiger Mining-Hardware von PoW-Netzwerken nicht reduziert wird. Zudem ist aufgrund der aktuellen Verbreitung und anhand der eben erwähnten Ausführungen zum Transaktionsvolumen und dessen Einschränkungen bezüglich der Skalierbarkeit nicht davon auszugehen, dass Kryptowährungen in absehbarer Zeit den Bankensektor merklich verkleinern oder gar ersetzen werden. Daher sind die Umweltauswirkungen von Kryptowährungen nicht anstelle der Umweltwirkungen des Bankensektors, sondern als zusätzlich anzusehen.

Gerade bezüglich der Ressourcenintensität ist zukünftig von einer stark steigenden Nachfrage nach digitalisierungsrelevanten Rohstoffen auszugehen, welche nicht nur von klassischen digitalen Endgeräten, sondern auch vom digitalen Wandel in der Mobilität getrieben wird, welcher mit einem erhöhten Bedarf an Batterietechnologien und Computerchips sowie digitaler Vernetzungskapazität einhergeht. Der hohe Bedarf an Mining-Hardware, welcher gerade für digitalisierungskritische Rohstoffe wie Tantal oder Gallium einen für eine einzelne Technologie großen Anteil der jährlichen Gesamtentnahme beansprucht, könnte die zukünftig potenziell knappe Verfügbarkeit solcher Rohstoffe weltweit weiter unter Druck setzen.

B.3.7.9 Schlussbetrachtungen und Fazit zur Fallstudie

Ein direkter Vergleich zwischen den verschiedenen berechneten Indikatoren ist aufgrund der unterschiedlichen Mengeneinheiten der Ressourcenintensitäts- und Umweltwirkkategorien nicht möglich. Durchaus vergleichbar ist jedoch die Aufteilung der errechneten Werte zwischen Anteilen aus Strombedarf und Mining-Hardware. Abbildung B-53 zeigt diese vergleichend für alle in diesem Vorhaben berücksichtigten Indikatoren im Standardszenario. Auffallend ist, wie bereits den Ergebnisdarstellungen der einzelnen Indikatoren zu entnehmen ist, dass der Strombedarf in allen Kategorien über 88 % der errechneten Intensitäten und Umweltwirkungen bedingt, wobei der Anteil beim CO₂-Fußabdruck und dem kumulierten Energieaufwand sogar bei über 97 % liegt. Somit lässt sich über alle Erhebungen dieses Vorhabens der Strombedarf des Bitcoin-Netzwerks als größter Treiber von Umweltwirkungen benennen. Vor dem Hintergrund dieser Aussage sollte jedoch nicht unberücksichtigt bleiben, dass auch der Bedarf des Netzwerks an Mining-Hardware einen erheblichen Ressourcenfußabdruck verursacht und vor allem bezüglich einzelner digitalisierungsrelevanter Rohstoffe in seiner Ausprägung als kritisch zu bewerten ist.

Abbildung B-53: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-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 = CO₂-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

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

Tabelle B-67: Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“ absolut und in Prozent nach Anteil des Strombedarfs und Mining-Hardware (Standardszenario)* – Tabelle zu Abbildung B-53

	Strombedarf	Mining-Hardware
RMI in Mt	36,2158 (94,98%)	1,91374 (5,02%)
TMR in Mt	42,5937 (95,12%)	2,18411 (4,88%)
CED in PJ	629,23451933 (98,12%)	12,027345874 (1,88%)
GWP in Mt	32,9129(97,6%)	0,809799 (2,4%)
WDP in km ³	0,141395 (88,47%)	0,0184264 (11,53%)
LOP in km ² a	556,23 (89,97%)	62,0339 (10,03%)

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

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

Um ein abschließendes Fazit aus den Erkenntnissen dieses Vorhabens zu ziehen, ist es notwendig sich zunächst mit generellen Limitationen von Erhebungen zu Kryptowährungen auseinanderzusetzen. Neben dem Umstand, dass man bei der Bemessung von Strom- und Hardwarebedarf von Kryptowährungen auf Inputwerte angewiesen ist, die von wesentlichen Annahmen abhängen, liegt eine der großen Unsicherheiten in der Verwendung durchschnittlicher Strommixe. Da die Nachhaltigkeitsperformance der Blockchain wie gezeigt stark von der Art der Stromerzeugung für ihren Betrieb abhängt, ist ohne genaue Kenntnis der Stromerzeugungsweise jede Berechnung mit deutlicher Unsicherheit behaftet. Im US-Bundesstaat New York wurden beispielsweise mit fossilen Brennstoffen betriebene Kraftwerke, welche keine wirtschaftliche Rendite mehr erwirtschaften konnten, reaktiviert, um die steigende Energienachfrage durch Bitcoin-Mining zu befriedigen. Sollten relevante Teile des durchschnittlichen Strommix aus kohlenstoffarmen Quellen stammen, unterschätzt die Verwendung dieses Mix die mit dem Bitcoin-Mining verbundenen Emissionen in solch einem Beispiel eklatant (de Vries *et al.*, 2022). Insgesamt sind die in diesem Vorhaben errechneten Werte deshalb eher als Richtwert für die Größenordnung der durch das Bitcoin-Netzwerk verursachten Ressourcenbedarfe und Umweltwirkungen zu deuten und können keine exakten Ergebnisse darstellen.

Trotz dieser Einschränkungen zeigen die angestellten Berechnungen, welche enorme Ressourcenbedarfe und Umweltwirkungen durch eine einzige, wenn auch die mit Abstand größte, Kryptowährung potenziell entstehen. Sollten das Gesamtvolumen an Kryptowährungen auf dem aktuellen Level bleiben oder weiter zunehmen und die PoW-Methode in einem ähnlichen oder sogar höheren Anteil als derzeit genutzt werden, ist davon auszugehen, dass dadurch ein enormer Druck auf die Verfügbarkeit bestimmter digitalisierungsrelevanter Rohstoffe entsteht und die Währungen eine große Hürde für die Bestrebungen zur Reduzierung des globalen CO₂-Ausstoßes darstellen.

Aktuell werden Kryptowährungen hauptsächlich als digitaler Wertspeicher oder Spekulationsobjekt genutzt. Nichtsdestotrotz werden Zentralbanken mit neuen geldpolitischen Herausforderungen hinsichtlich der Finanzmarktstabilität konfrontiert werden, während Geschäftsbanken aufgrund der privaten Geldwährungen neue Geschäftsfelder erschließen müssen, um den Anschluss nicht zu verlieren. Etwa 20 % der Zentralbanken, die bereits die

Einführung von staatlichen Digitalwährungen prüfen, schätzen, dass digitales Geld in den nächsten sechs Jahren ausgegeben werden kann. China und Schweden haben dazu bereits die ersten Pilotprojekte gestartet (BMBF, 2022). Solch digitale Währungen müssen nicht zwingend auf der Blockchain-Technologie basieren, jedoch gilt diese nach wie vor als eine der operabelsten und sichersten Möglichkeiten zum Betrieb einer digitalen Währung. Es ist daher angebracht, die Entwicklung digitaler Währungen und der verbundenen Ressourcenbedarfe und Umweltwirkungen auch zukünftig zu verfolgen.

B.3.8 Fallstudie Consumer-to-Consumer-Plattform

B.3.8.1 Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung

Eine *Consumer-to-Consumer*-Plattform (C2C-Plattform; auch *Peer-to-Peer*-Plattform) umfasst Onlineportale für den Austausch zwischen Privatpersonen, meist bezogen auf den Handel bzw. Austausch von Waren oder anderen Angeboten (Statista, 2022a). Die Plattformen werden dabei sowohl für den Verkauf von Neuwaren als auch für den Verkauf oder Tausch von gebrauchten Artikeln zur Weiter- bzw. Wiederverwendung genutzt. Bekannte Produkthandelsplattformen im C2C-Bereich sind beispielsweise eBay Kleinanzeigen und Vinted. Im Dienstleistungsbereich können stellvertretend das Reiseportal Airbnb oder die Mobilitätsplattform Uber genannt werden.

In der Literatur werden C2C-Plattformen oftmals synonym mit *Peer-to-Peer*-Plattformen, Tausch- oder Gebrauchtwarenbörsen sowie der Sharing Economy verwendet (Erdmann, 2011; Henseling & Hobelsberger, 2019; Gossen *et al.*, 2019; Zhu & Liu, 2021; Statista, 2022a). Dabei ist der Handel mit Gebrauchtwaren unter ihnen am stärksten vertreten. Er vereint nachhaltigen Konsum im Sinne einer Kreislaufwirtschaft und führt meist zu ökonomischen Vorteilen für Käufer*innen und Verkäufer*innen. 14 % der Deutschen tätigen bereits Verkäufe über derartige Onlineportale, andere Länder wie die Niederlande liegen bei bis zu 40 % (Statista, 2022a). Weiterhin kaufen 25 % der Deutschen mindestens einmal monatlich gebrauchte Produkte (L'Observatoire Cetelem, 2022); fast 70 % der Befragten einer Studie verkaufen mindestens zweimal jährlich gebrauchte Produkte (Wuppertal Institut *et al.*, 2021). Die hohe Beliebtheit von C2C-Plattformen zeigt sich auch in der Tatsache, dass ebay Kleinanzeigen in Deutschland das reichweitenstärkste Onlineangebot ist (Statista, 2022a).

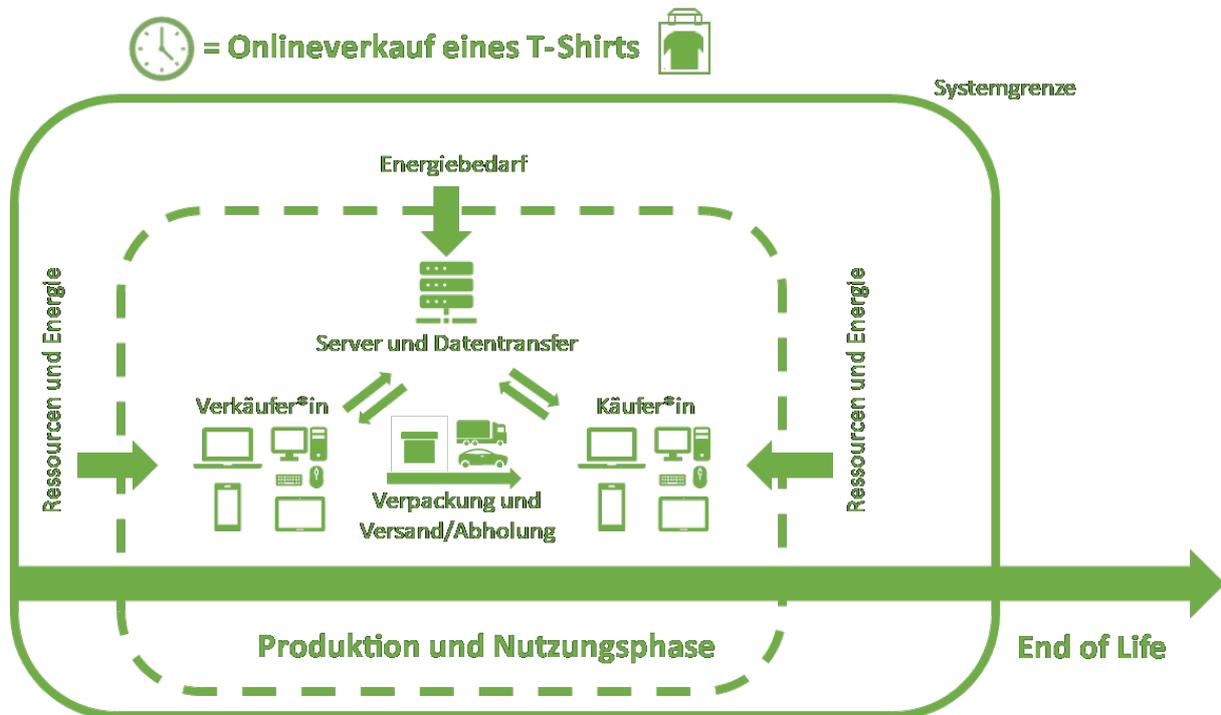
Unter den gehandelten Gebrauchtprodukten spielen Kleidungsstücke die größte Rolle. Sie liegen nicht nur an erster Stelle der ungenutzten Produkte in deutschen Haushalten, sondern werden auch am meisten auf den Plattformen gehandelt (ebay Kleinanzeigen, 2021; Wuppertal Institut *et al.*, 2021; Zhu & Liu, 2021). Plattformen wie Vinted handeln fast ausschließlich mit gebrauchten Kleidungsstücken. Auch zukünftig ist durch gesteigertes Umweltbewusstsein und den Wandel hin zu einer Kreislaufwirtschaft zu erwarten, dass Verbraucher*innen vermehrt auf C2C-Angebote für den Gebrauchtwarenhandel zurückgreifen, statt Neuwaren zu kaufen (Wuppertal Institut *et al.*, 2021; Zhu & Liu, 2021; L'Observatoire Cetelem, 2022). Für den globalen Second-Hand-Kleidungsmarkt wird bis 2025 ein jährliches Wachstum von 15 bis 20 % geschätzt (Estribeau *et al.*, 2022; L'Observatoire Cetelem, 2022).

B.3.8.2 Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie

Die Fallstudie fokussiert sich auf die Betrachtung der digitalen Anwendung der C2C-Plattform und ermittelt die Ressourcenintensität, die sich durch die Transaktion über das Onlineportal und die damit in Verbindung stehende Übergabe ergibt. Dies umfasst somit die IKT-Endgeräte

der Käufer*innen und Verkäufer*innen, ihren Energiebedarf während dem Zugriff auf die Plattform sowie die notwendige Datenübertragung und den Energiebedarf der Rechenzentren. Die Herstellungsphase der Rechenzentren wird für die Fallstudie außer Acht gelassen. Eine Übersicht über den Betrachtungsrahmen der Fallstudie ist in Abbildung B-54 dargestellt.

Abbildung B-54: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“



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

B.3.8.3 Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie

Für die Berechnung der Ressourcenintensität des digitalen Anwendungsfalls C2C-Plattform wurde folgende Untersuchungseinheit gewählt:

Transaktion eines T-Shirts über eine C2C-Plattform inkl. Versand bzw. Abholung

Die Fallstudie betrachtet somit den digitalen Anwendungsfall des Verkaufs eines T-Shirts über eine C2C-Plattform. Dies umfasst sowohl die von Käufer*in und Verkäufer*in genutzten End- und Netzwerkzugangsgeräte, sowie auch die mit der Nutzung der C2C-Plattform verbundenen Energiebedarfe und die mit dem eigentlichen Verkauf verbundenen Prozesse, wie die Herstellung der genutzten Versandverpackung und den Transport von Verkäufer*in zu Käufer*in.

B.3.8.3.1 Genutzte End- und Netzwerkzugangsgeräte

Um am Onlinehandel über C2C-Plattformen teilzunehmen, müssen die Nutzer*innen über ein geeignetes Endgerät, sowie ein Netzwerkzugangsgerät, verfügen. Im Rahmen der Untersuchung finden vier Endgeräte Berücksichtigung, welche klassisch zum Handel auf C2C-Plattformen verwendet werden – ein Smartphone, ein Tablet, ein Laptop, sowie ein Desktop Computer (inkl. notwendiges Zubehör wie Display, Tastatur und Maus). Für die Modellierung zur Erhebung der

Rohstoffbedarfe und Umweltfolgen wird ein Nutzungsprofil kreiert, welches eine gemischte Nutzung aller vier Geräte zu gleichen Teilen im Anwendungsfall annimmt und entsprechend des Anteils der Nutzung und des angenommenen Nutzungsprofils des individuellen Geräts einen Anteil der Herstellungsaufwände auf den Anwendungsfall anrechnet.

Für das Smartphone wurde eine Lebensdauer von 2,5 Jahren angenommen. Dieser Wert ergibt sich aus der Erwägung, dass klassische Mobilfunkverträge in Deutschland eine Vertragslaufzeit von zwei Jahren haben und Nutzer*innen mit einem neuen Mobilfunkvertrag oftmals auch ein neues Smartphone erhalten. Um dem Umstand gerecht zu werden, dass einige Nutzer*innen ihr Gerät auch über zwei Jahre hinaus nutzen, wurde der angenommene Wert in dieser Untersuchung nach oben angepasst. Die Annahme fügt sich passend in die Ergebnisse von Befragungen ein, wonach weniger als ein Viertel der Smartphone-Nutzer*innen ihr Gerät länger als zwei Jahre besitzt (Statista, 2023).

Für das Tablet, den Laptop und den Desktop Computer wurde eine andere Lebensdauer angenommen, da diese Geräte in der Regel nicht an Mobilfunkverträge gekoppelt sind und deren Nutzungsdauer daher deutlich höher ausfällt. Im Falle von Tablet-Computern geben Publikationen Hinweise darauf, dass sie in der Regel über 3 Jahre und länger genutzt werden (Belkhir & Elmeligi, 2018). In der vorliegenden Studie wurde für das Tablet daher eine Lebensdauer von 3,5 Jahren angenommen. Für den Laptop und den Desktop Computer wurde die Annahme der Lebensdauer weiter erhöht und auf vier Jahre gesetzt, da diese Endgeräte durchschnittlich mit einem höheren Anschaffungspreis als die anderen beiden Geräte verbunden sind und daher davon ausgegangen wird, dass diese noch länger genutzt werden, bis sich die Anwender*innen dazu entschließen sich ein neues Gerät anzuschaffen.

Bezüglich der täglichen Nutzung der Endgeräte wurde auf Daten einer Studie zur Nutzung digitaler Geräte und Angebote in Deutschland zurückgegriffen. In dieser Studie wurde, getrennt danach, ob es sich um einen Wochentag oder einen Tag des Wochenendes handelt, die durchschnittliche Mediennutzung der Deutschen im Jahr 2017 erhoben. Über die angenommene Lebensdauer der Endgeräte setzt sich entsprechend der angenommenen Lebensdauer aus der Summe der durchschnittlichen Nutzungsdauern der Nutzungstage zusammen.

Das Netzwerkzugangsgesamtgerät ist klassischerweise ein Router, der in einer Wohnung oder einem Haus die mobilen Endgeräte kabellos mit Internetzugang versorgt. Zur Betrachtung des Anwendungsfalls sind für den Router sowohl der Anteil der Herstellungsphase, welcher der Untersuchungseinheit zugeschrieben werden kann, als auch die Leistungsaufnahme für den Betrieb während der Nutzung der Plattform zu betrachten. Für den Router wurde eine Gesamtlebensdauer von vier Jahren angenommen. Diese Annahme stellt eine Abschätzung für den Durchschnitt aufgrund von Angaben dar, dass Router klassischerweise zwei bis drei Jahre, im *High-end* Router Bereich jedoch bis zu zehn Jahre Lebensdauer aufweisen (Jaeger, 2022). Es wird hierbei davon ausgegangen, dass *High-end* Router im privaten Gebrauch eher die Ausnahme darstellen. Für die Leistungsaufnahme des Routers während des Betriebs wurde ein Wert von 0,013 kWh angenommen, welcher aus Gröger (2020) entnommen wurde. Ein Router läuft oftmals durchgehend, um jederzeit Zugriff auf das Internet bereitstellen zu können. Jedoch wird nicht zwingend durchgehend auch auf das Internet zugegriffen, daher wird im Rahmen der Studie für die tägliche Nutzung des Routers angenommen, dass der Router 250 Minuten pro Tag genutzt wird. Diese Annahme ermittelt sich aus Angaben zur täglichen Internetnutzung verschiedener Altersgruppen für das Jahr 2022 (Statista, 2022c). Ihr wurde die Annahme zu Grunde gelegt, dass C2C-Plattformen von der Gesellschaftsgruppe unter 50 Jahren insgesamt stärker genutzt werden als von Personen über 50 Jahren.

Für die betrachteten Endgeräte wurden zur Nutzung die Tabelle 70 in dargestellten Leistungsaufnahmen angenommen. Zur Nutzungsdauer wurde angenommen, dass sowohl der*die Verkäufer*in, als auch der*die Käufer*in je 30 Minuten benötigen.

Tabelle B-68: Leistungsaufnahme der betrachteten Endgeräte pro Stunde für die Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“

Gerät	Leistungsaufnahme	Quelle und ergänzende Informationen
Laptop	8,4 Wh	Prakash <i>et al.</i> (2016)
Tablet	3,2 Wh	0,0286 kWh Akkukapazität (iPad 10. Generation), 9 Stunden Batterielaufzeit (Apple, 2022)
Smartphone	2 Wh	0,0124 kWh Akkukapazität (iPhone 13), 1x täglich laden (Hristov, 2022)
Desktop PC + Monitor	60 Wh	(Stobbe, 2015)
Router	13 Wh	Gröger (2020)

B.3.8.3.2 Übertragungsnetze und Rechenzentrum

Für den Betrieb einer C2C-Plattform werden Übertragungsnetze und Kapazitäten in einem oder mehreren Rechenzentren genutzt. Sowohl für das Online-Stellen einer Verkaufsanzeige wie auch bei der Suche nach geeigneten Kaufobjekten durch potenzielle Käufer*innen und zur Anbahnung und Übereinkunft über einen Kauf werden diese digitalen Infrastrukturen genutzt. Zur Berücksichtigung der Rohstoffbedarfe und ausgewählter Umweltfolgen der Nutzung von Übertragungsnetzen und Rechenzentren ist zu bestimmen, welcher Energiebedarf mit der Nutzung der digitalen Infrastruktur im Anwendungsfall assoziiert werden kann. Dieser ist im Einzelfall von einer Vielzahl unterschiedlicher Faktoren abhängig und kann daher für einen generischen Anwendungsfall, wie er im Rahmen dieser Fallstudie betrachtet werden soll, lediglich durch eine, auf Informationen aus Recherche und Literatur fußende, Annahme in die vorliegende Untersuchung miteinbezogen werden. In der im Rahmen des Vorhabens untersuchten Literatur konnte lediglich eine Quelle identifiziert werden, welche quantitative Angaben zum Strombedarf der Netzwerkinfrastrukturnutzung einer C2C-Plattform bietet. In Erdmann (2011) werden die Umwelteffekte des privaten Gebrauchtwarenhandels am Beispiel von eBay quantifiziert. Hierbei werden als Input für eine ökobilanzielle Modellierung auch Angaben zum Strombedarf von Rechenzentren und Übertragungsnetzen für diese Anwendung gemacht. Die angegebenen Werte belaufen sich für die Rechenzentren auf 654 Wh pro Anzeige auf eBay und für die Übertragungsnetze auf 436 Wh pro Anzeige (Erdmann, 2011). Da es sich um Werte aus dem Jahr 2011 handelt, ist davon auszugehen, dass durch den technologischen Fortschritt der Strombedarf sowohl der Nutzung von Rechenzentren als auch der Übertragungsnetze deutlich geringer ist. Jedoch gehen die Einschätzungen zum Strombedarf der Internetnutzungen und den Effizienzgewinnen dieser im vergangenen Jahrzehnt teils deutlich auseinander. Vor diesem Hintergrund wurde für die vorliegende Fallstudie pauschal angenommen, dass der aktuelle Strombedarf sich auf ein Zehntel des 2011 von Erdmann festgestellten Strombedarfs beläuft. Die potenziellen Auswirkungen von Abweichungen in diesem Faktor werden durch das Hinzufügen eines Szenarios, welches für besagte Infrastruktur die Originalwerte von Erdmann (2011) annimmt, berücksichtigt.

B.3.8.3.3 Verpackung und Transport

Um einen über eine C2C-Plattform angebotenen Verkauf abzuschließen, muss nach Bezahlung des Kaufbetrags (typischerweise per Banküberweisung oder Online-Zahlungsdienstleister; diese Angebote werden im Rahmen der Fallstudie nicht mitbetrachtet) die Ware von Verkäufer*in zu Käufer*in gelangt. Der typische Weg auf welchem dies geschieht, ist der Transport durch einen Versanddienstleister. Hierzu muss der Kaufgegenstand zunächst verpackt werden und wird anschließend durch das Dienstleistungsunternehmen zum Zielort transportiert. Als Verpackung wurde für den vorliegenden Anwendungsfall ein klassischer Versandkarton mit einem Gewicht von 100 Gramm angenommen. Das T-Shirt, als verpackter Verkaufsgegenstand, wurde mit 200 Gramm Gewicht in der Berechnung berücksichtigt. Für den Transport des Pakets von Verkäufer*in zum Versanddienstleister wird angenommen, dass dieser entweder zu Fuß oder in Verbindung mit einer Fahrt zu einem anderen Zweck kombiniert wird, so dass dieser Transport hier nicht mitbetrachtet wird. Gegeben der Vielzahl von Annahmefilialen, welche die verschiedenen Versanddienstleister inzwischen vor allem im urbanen Raum besitzen, wirkt diese Annahme mit der Realität der meisten Versendungen vereinbar. Für den Transport durch den Versanddienstleister selbst wurde angenommen, dass er durch einen Lieferwagen oder kleinen Truck erfolgt. Für die Distanz wurde unter Bezug auf Erdmann (2011) eine Distanz von 250 Kilometern angenommen.

Neben dem Versand per Versanddienstleister ist auch die Abholung durch den*die Käufer*in ein Fall, welcher im Bereich des Handels über C2C-Plattformen regelmäßig auftritt. Diese Möglichkeit kommt vor allem in Betracht, wenn die Distanz zwischen Verkäufer*in und Käufer*in gering ist (die meisten C2C-Plattformen bieten die Möglichkeit Angebote nach geografischen Kriterien zu filtern). Um dies zu berücksichtigen wurde eine Abholung per Privat-Pkw mit einer einfachen Strecke von fünf Kilometern im Rahmen eines zusätzlichen Szenarios in der vorliegenden Fallstudie berücksichtigt. Hierfür wurde keine Verpackung der Ware angenommen.

B.3.8.3.4 Implementierte Szenarien

Insgesamt wurden in der vorliegenden Fallstudie drei verschiedene Szenarien untersucht, welche sich im verwendeten Produktsystem bei den Nutzenden gleichen. Für den Strombedarf von Übertragungsnetzen und Rechenzentren und den Transport wurde in jeweils einem Szenario untersucht, wie sich die entsprechende Änderung auf die errechneten potenziellen Rohstoffbedarfe und Umweltfolgen auswirkt. Eine Übersicht zu den Szenarien ist in Tabelle B-70 gegeben.

Tabelle B-69: Übersicht zu den betrachteten Szenarien und den Anpassungen gegenüber dem Standardszenario RZ_{effizient} für die Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“

Szenario	Energiebedarf Rechenzentrum und Übertragungsnetz	Transport	Verpackung
Szenario RZ _{effizient}	65,4 Wh pro Anzeige (Rechenzentrum) 43,6 Wh pro Anzeige (Übertragungsnetz)	Versanddienstleister, 250 km mit Lieferwagen (Verbrenner)	Versandkarton (100 g)
Szenario RZ ₂₀₁₁	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).

B.3.8.4 Ergebnisse zur Ressourcenintensität

B.3.8.4.1 Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme

Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand der drei untersuchten Szenarien sind in Tabelle B-70 dargestellt. Es wird deutlich, dass das Szenario, welches die Abholung des Kaufgegenstands durch den Kaufenden abbildet, mit einem deutlich höheren Ressourcenbedarf eingerechnet wird als die anderen beiden Szenarien. Dies ist vor allem bemerkenswert, da dieses Szenario im Vergleich zum Szenario RZ₂₀₁₁ von der effizienteren Übertragungsnetzwerks- und Rechenzentrumsleistung ausgeht. Somit lässt sich für Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand erkennen, dass der Einfluss der Annahme zum Transport einen hohen Einfluss auf die errechneten Ergebniswerte hat.

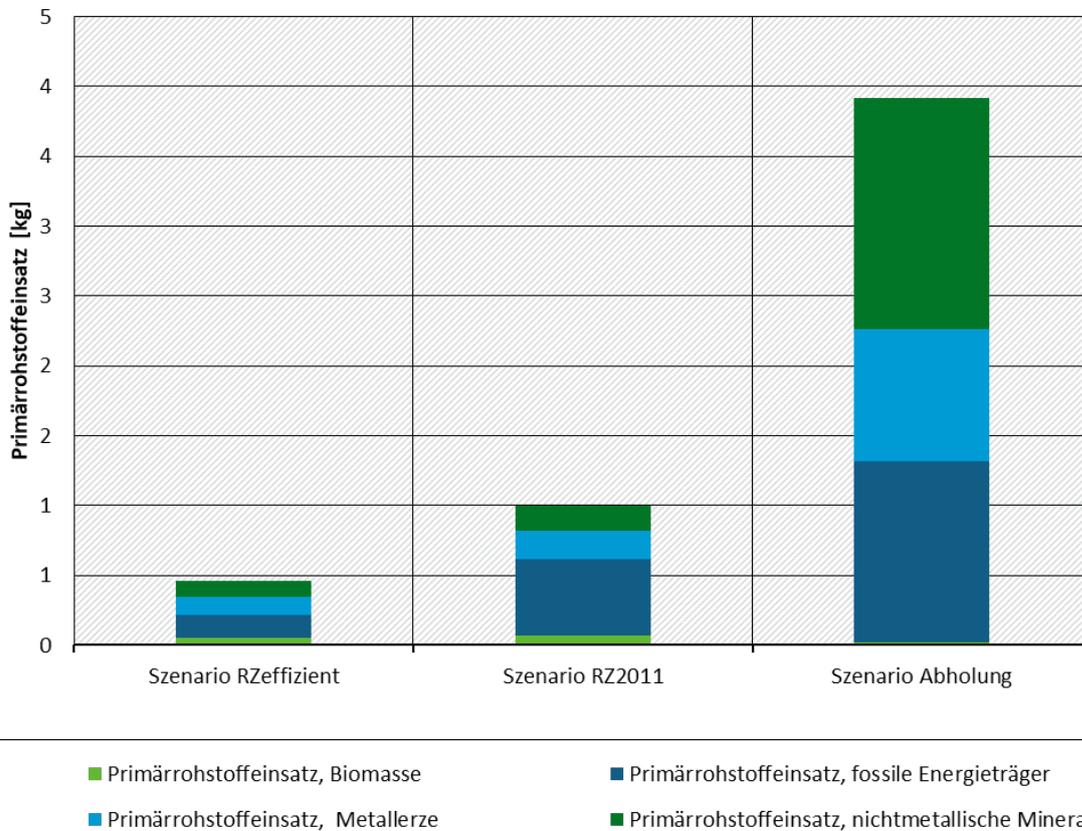
Tabelle B-70: Rohstoffintensität für die untersuchten Szenarien „RZ_{effizient}, RZ₂₀₁₁ und Abholung“ der Fallstudie „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Kilogramm

Szenario	Primärrohstoffeinsatz [kg]	Gesamtprimärmaterialaufwand [kg]
Szenario RZ _{effizient}	0,46	0,58
Szenario RZ ₂₀₁₁	1,00	1,28
Szenario Abholung	3,91	4,64

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

In Abbildung B-55 ist für die untersuchten Szenarien die Aufteilung des Primärrohstoffeinsatzes in die durch den Indikator berücksichtigten Rohstoffquellen abgebildet. Es ist zu erkennen, dass Biomasse als Rohstoffquelle in allen Szenarien eine untergeordnete Rolle spielt. Im Szenario RZ_{effizient} sind die drei anderen Rohstoffquellen zu vergleichbaren Anteilen vertreten, wohingegen im Szenario RZ₂₀₁₁ fossile Energieträger den größten Anteil aller Rohstoffquellen stellen. Im Abholungsszenario sind nichtmetallische Mineralien die Hauptquelle des Rohstoffbedarfs.

Abbildung B-55: Aufteilung des Primärrohstoffeinsatzes für die untersuchten Szenarien "RZ_{effizient}, RZ₂₀₁₁ und Abholung" zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Kilogramm



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

Tabelle B-71: Aufteilung des Primärrohstoffeinsatzes für die untersuchten Szenarien "RZ_{effizient}, RZ₂₀₁₁ und Abholung" zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Kilogramm – Tabelle zu Abbildung B-55

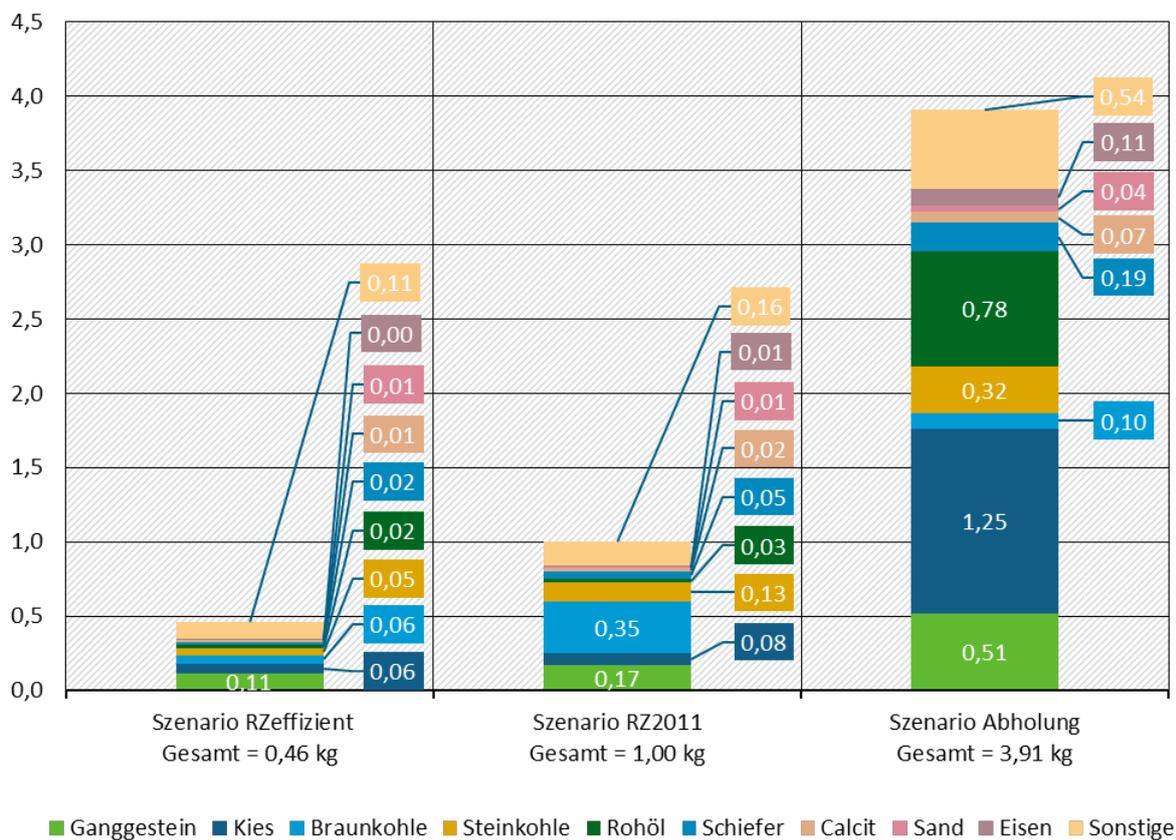
Primärrohstoffein- satz [kg]	Primärrohstoffeins- atz, Biomasse	Primärrohstoffeins- atz, fossile Energieträger	Primärrohstoffeins- atz, Metallerze	Primärrohstoffeins- atz, nichtmetallische Mineralien
Szenario RZ _{effizient}	0,06	0,16	0,14	0,11
Szenario RZ ₂₀₁₁	0,07	0,55	0,20	0,18
Szenario Abholung	0,02	1,30	0,94	1,65

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

Die fossilen und mineralischen Rohstoffe Ganggestein, Kies, Braunkohle, Steinkohle, Rohöl, Schiefer und Calcit sind in allen Szenarien der Masse nach am stärksten vertreten und werden in Abbildung B-56 dargestellt. Sie machen 78 % (0,36 kg, vgl. Abbildung B-56) im Szenario RZ_{effizient}, 86 % (0,86 kg, vgl. Abbildung B-56) im Szenario RZ₂₀₁₁ und 91 % (3,56 kg, vgl. Abbildung B-56) im Szenario Abholung von den gesamten RMIs aus. Abbildung B-56 zeigt die Aufteilung der Massenbedarfe verschiedener Rohstoffe für die untersuchten Szenarien. Die Rohstoffe Ganggestein, Kies, Braunkohle, Steinkohle, Rohöl, Schiefer und Calcit sind in allen Szenarien

massentechnisch am stärksten vertreten. Insgesamt folgt der errechnete Bedarf der Rohstoffe auf Elementarflussebene stark den errechneten Werten der einzelnen Szenarien für den Indikator Primärrohstoffeinsatz. Dies wiederum ist nicht verwunderlich, da sich der Primärrohstoffeinsatz auf Basis der einzelnen Rohstoffinputs durch Multiplikation mit Charakterisierungsfaktoren errechnet. Es sind jedoch auch nennenswerte Unterschiede zwischen den am meisten verwendeten Massenrohstoffen zwischen den Szenarien ersichtlich. Im Szenario RZ₂₀₁₁ fällt der Mehrbeitrag von Braunkohle und zu einem geringeren Grad auch Steinkohle auf, der sich durch den verstärkten Energiebedarf durch die Datenübertragung und -verarbeitung in den Rechenzentren erklären lässt. Besonders auffällig sind die Unterschiede zum Szenario Abholung. Der starke Beitrag von Rohöl lässt sich zum Teil auf den Treibstoffbedarf des Fahrzeugs für die Abholung zurückführen, und die starke Relevanz von Kies in diesem Szenario kann durch den hohen Flächenbedarf verbunden mit der Fahrzeugnutzung in der Nutzungsphase erklärt werden. Der stärkere Beitrag von Eisen zum Gesamtergebnis im Vergleich zu den anderen beiden Szenarien kann zum Teil auf den Fahrzeugbau zurückgeführt werden.

Abbildung B-56: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Kilogramm



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

Tabelle B-72: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Kilogramm – Tabelle zu Abbildung B-56

	Szenario RZ _{effizient}	Szenario RZ ₂₀₁₁	Szenario Abholung
Ganggestein	0,11	0,17	0,51
Kies	0,06	0,08	1,25
Braunkohle	0,06	0,35	0,10
Steinkohle	0,05	0,13	0,32
Rohöl	0,02	0,03	0,78
Schiefer	0,02	0,05	0,19
Calcit	0,01	0,02	0,07
Sand	0,01	0,01	0,04
Eisen	0,00	0,01	0,11
Sonstige	0,11	0,16	0,54

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

Neben den massentechnisch am meisten vorkommenden Rohstoffen wurde auch der Bedarf einzelner, massentechnisch in der Regel gering vorkommender, jedoch für die Digitalisierung relevanter Rohstoffe untersucht. Die für die verschiedenen Szenarien errechneten Bedarfe dieser Rohstoffe sind in Tabelle B-73 dargestellt. Es fällt auf, dass für das Szenario Abholung der errechnete Bedarf an digitalisierungsrelevanten Rohstoffen deutlich höher ausfällt als in den beiden anderen Szenarien. Dies ist darauf zurückzuführen, dass auf die Fahrt zur Abholung des Kaufgegenstands nicht nur der Verbrauch an Kraftstoff, sondern auch ein Teil der Herstellung des Pkw zugerechnet werden. Dies wirkt sich den Ergebnissen der Modellierung nach stärker auf den Bedarf dieser Rohstoffe aus als die untersuchte Variation im Strombedarf der Übertragungsnetze und des Rechenzentrums. Besonders deutlich sind die Mehrbedarfe im Abholungsszenario für die digitalisierungsrelevanten Rohstoffe in den Gruppen der seltenen Erden und Platingruppenmetallen, doch auch für Gallium, Magnesium und Mangan ergeben sich deutlich höhere Bedarfe aus der Modellierung.

Tabelle B-73: Erforderliche Menge digitalisierungsrelevanter Rohstoffgruppen in den untersuchten Szenarien „RZ_{effizient}, RZ₂₀₁₁ und Abholung“ zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Milligramm

Rohstoffgruppe	Szenario RZ _{effizient}	Szenario RZ ₂₀₁₁	Szenario Abholung
Kritische digitalisierungsrelevante Rohstoffe	90	120	830
... davon seltene Erden	1	1	1,4
... davon Platingruppenmetalle	0,002	0,003	0,130
Andere digitalisierungsrelevante Rohstoffe	560	910	4.910

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

Tabelle B-74 zeigt ergänzend die errechneten Bedarfe ausgewählter einzelner digitalisierungsrelevanter Rohstoffe für die untersuchten Szenarien. Auffällig ist hier vor allem, dass sich für drei der digitalisierungsrelevanten Rohstoffe, Scandium, Platin und Rhodium in den Szenarien RZ_{effizient} und RZ₂₀₁₁ lediglich ein minimaler Bedarf ergibt (im Bereich von Pikogramm), wohingegen im Abholungsszenario deutlich höhere Bedarfe errechnet wurden.

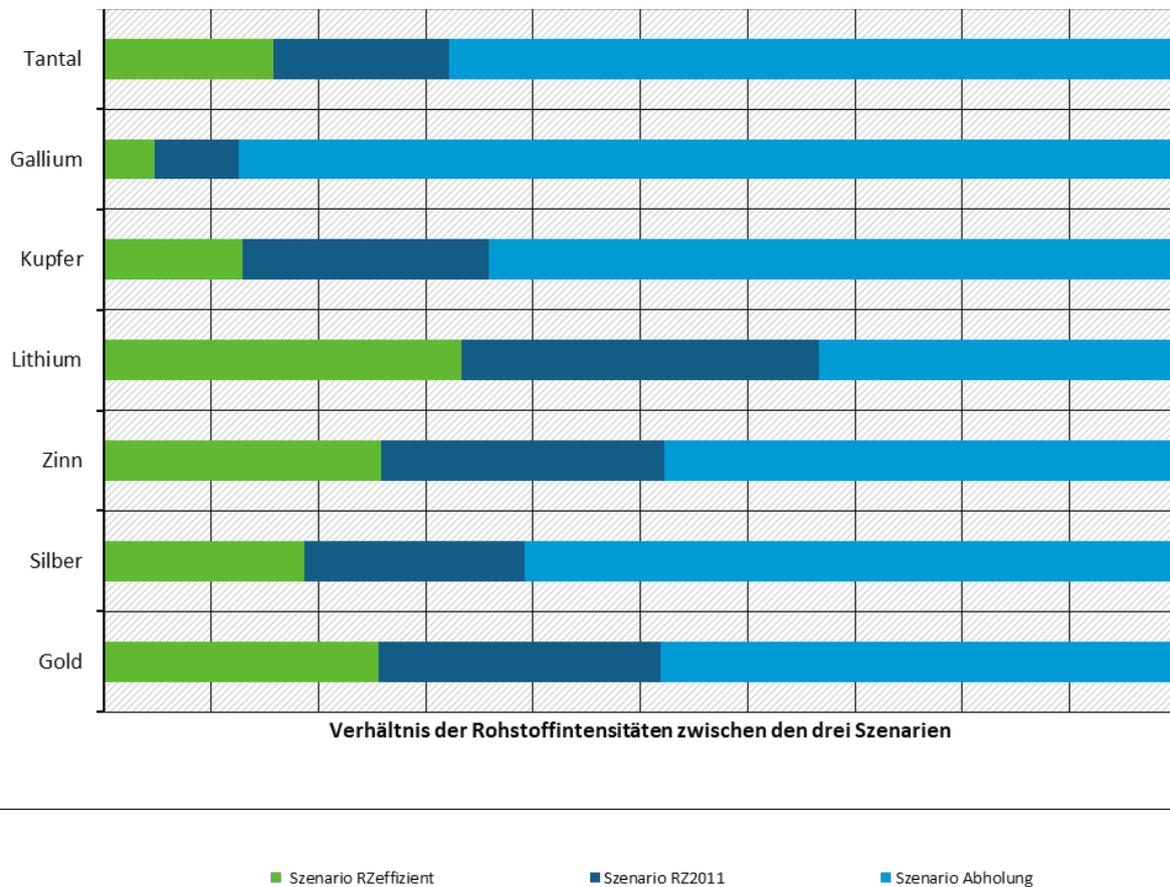
Tabelle B-74: Besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe und ihre eingesetzte Menge zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in den untersuchten Szenarien „RZ_{effizient}, RZ₂₀₁₁ und Abholung“ in Milligramm

Rohstoff	Szenario RZ _{effizient}	Szenario RZ ₂₀₁₁	Szenario Abholung
Gallium	0,11	0,18	2,02
Tantal	2,13	2,20	9,15
Gold	0,34	0,35	0,64
Silber	2,06	2,27	6,73
Zinn	17,36	17,75	32,10
Scandium	<0,01	<0,01	0,01
Platin	<0,01	<0,01	0,11
Rhodium	<0,01	<0,01	0,02
Lithium	0,37	0,37	0,37
Kupfer	310	550	1.540

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

Für die anderen Rohstoffe lässt sich feststellen, dass ihre verwendete Menge zwischen den Szenarien etwas variiert, sie insgesamt aber in allen Szenarien Verwendung finden und durch diese beeinflusst werden. Dies lässt sich vorwiegend durch die Tatsache begründen, dass die Rohstoffe Verwendung in den IKT-Endgeräten bei Kaufenden und Verkaufenden finden und nicht maßgeblich durch den Transportprozess und nur zweitrangig durch die Datenübertragung und -speicherung beeinflusst werden. Abbildung B-57 veranschaulicht für diese sieben Rohstoffe jeweils grafisch das Verhältnis der Mengenbedarfe der drei Szenarien.

Abbildung B-57: Verhältnis der Rohstoffintensitäten zwischen den drei Szenarien „RZ_{effizient}, RZ₂₀₁₁ und Abholung“ für besonders digitalisierungsrelevante Rohstoffe der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Prozent



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

B.3.8.4.2 Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Fußabdruck

Für die Indikatoren CO₂-Fußabdruck und Kumulierter Energieaufwand zeigt sich im Vergleich der Szenarien eine analoge Beobachtung zum Primärrohstoffeinsatz und Gesamtprimärmaterialaufwand. Wie Tabelle B-75 zu entnehmen, ergeben sich für das Abholungsszenario deutlich höhere Ergebniswerte als für die Szenarien RZ_{effizient} und RZ₂₀₁₁. Ganz klar geprägt ist das Ergebnis des Abholungsszenarios durch die Pkw-Fahrt. Beim Szenario RZ₂₀₁₁ ist der Energiebedarf der Übertragungsnetze und des Rechenzentrums der relevanteste Faktor, wohingegen im Szenario RZ_{effizient} der Versandkarton durch seine Herstellung den erheblichsten Teil der potenziellen Umweltfolgen, welche durch diese Indikatoren bemessen werden, beisteuert.

Tabelle B-75: CO₂-Fußabdruck und kumulierter Energieaufwand für die Szenarien „RZ_{effizient}“, RZ₂₀₁₁ und Abholung“ der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in kg CO₂-Äq. und MJ

Szenario	CO ₂ -Fußabdruck [kg CO ₂ -Äq.]	Kumulierter Energieaufwand [MJ]
Szenario RZ _{effizient}	0,31	5,77
Szenario RZ ₂₀₁₁	0,81	14,86
Szenario Abholung	3,33	50,63

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

B.3.8.4.3 Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial

Die Ergebnisse der Szenarien für die Indikatoren Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial sind in Tabelle B-76 dargestellt. Für beide Indikatoren zeigt sich bezüglich des Verhältnisses der Szenarien zueinander ein abweichendes Bild von den anderen untersuchten Indikatoren. Das Szenario RZ₂₀₁₁ erreicht hier jeweils die höchsten Werte der drei untersuchten Szenarien. Das Szenario RZ_{effizient} wartet, wie in allen anderen untersuchten Indikatoren auch, mit dem jeweils geringsten Wert auf. Insgesamt ist jedoch zu erwähnen, dass im Vergleich zu den anderen untersuchten Indikatoren, beim Wasserfußabdruck und dem Landnutzungspotenzial die sich ergebenden Werte für die drei Szenarien relativ nahe beieinander liegen. Für die Szenarien RZ_{effizient} und RZ₂₀₁₁ ist der Versandkarton der relevanteste Faktor für die Höhe der errechneten Werte. Beim Abholungsszenario fällt der Transport des Kaufgegenstand mit dem Pkw stark ins Gewicht, jedoch werden hier im Vergleich zu den beiden anderen Szenarien durch den Wegfall des Versandkartons die damit verbundenen potenziellen Umweltfolgen eingespart.

Tabelle B-76: Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial CO₂-Fußabdruck und kumulierter Energieaufwand für die Szenarien „RZ_{effizient}“, RZ₂₀₁₁ und Abholung“ in m³ und m²a

Szenario	Wasserfußabdruck [m ³]	Landnutzungspotenzial [m ² a]
Szenario RZ _{effizient}	0,005	0,12
Szenario RZ ₂₀₁₁	0,008	0,15
Szenario Abholung	0,006	0,14

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

B.3.8.4.4 Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial

Die Nutzung einer C2C-Plattform selbst geht mit Ressourcenbedarfen einher, die im Zuge der Fallstudie ermittelt werden sollen und für die in der Literatur bisher kaum Abschätzungen vorliegen (Erdmann, 2011; Ludmann, 2018). 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 bereitgestellt werden müssen (Gossen *et al.*, 2019; Zhu & Liu, 2021). Die Plattformen stehen dabei in Ergänzung zu bisherigen Systemen des Gebrauchtwarenhandels im Rahmen von Flohmärkten oder Second-Hand-Läden. Es zeigen sich allgemein Vorteile für den Ressourcenbedarf und die Umweltauswirkungen durch den Handel mit Gebrauchtwaren, jedoch

muss auch das Potenzial von Reboundeffekten durch gesteigerten Konsum aufgeführt werden (Ludmann, 2018).

Eine weitere Perspektive ist der Wandel in der Gesellschaft insgesamt. Hier gehen verschiedene Untersuchungen davon aus, dass sich die Art und Weise des Konsums generell verändert. Aufgrund von steigendem Umwelt- und Ressourcenbewusstsein und finanziellen Anreizen durch Kauf bzw. Verkauf von Gebrauchsgütern wird dem Markt eine hohe Relevanz für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft bescheinigt (Ludmann, 2018; Gossen *et al.*, 2019; Zhu & Liu, 2021; L'Observatoire Cetelem, 2022).

Der Vergleich der Szenarien zeigt, dass die digitale Anwendung besonders unter der Voraussetzung eines umweltverträglichen Transports ressourcenschonend ist. Auch von energieeffizienter Datenübertragung und -speicherung in den Rechenzentren profitieren die Ergebnisse in allen berechneten Rohstoffbedarfs- und Umweltwirkungskategorien.

Allgemein wird dem C2C-Sektor ein hohes Ressourcenschonungspotenzial attestiert, da er Produkte länger im Kreislauf hält indem ungenutzte Produkte an andere Personen weitergegeben werden (Wuppertal Institut *et al.*, 2021). Betrachtet man überschlägig die Ressourcenintensität eines 200 g schweren Baumwoll-T-Shirts (eigene überschlägige Berechnung auf Basis eines durchschnittlichen Datensatzes für gewebte Baumwolle) im Vergleich zur jener der C2C-Anwendung inkl. der Übergabe zeigt sich, dass das T-Shirt mit einem Primärrohstoffeinsatz von 2,3 kg mit einem deutlich höheren Rohstoffeinsatz in Verbindung gebracht werden kann als der digitale Anwendungsfall im Falle der Szenarien RZ_{effizient} und RZ₂₀₁₁. Für das Abholungsszenario hingegen ergibt sich durch den C2C-Verkaufsprozess ein höherer Primärrohstoffeinsatz als überschlägig für die Herstellung des T-Shirts. Die Ergebnisse der Fallstudie lassen sich deshalb dahingehend deuten, dass, abhängig vom verkauften Produkt, die Wahl des Transports und die damit einhergehenden Rohstoffbedarfe und Umweltfolgen relevant für das Umweltentlastungspotenzial sind. Es sei jedoch erneut spezifisch darauf hingewiesen, dass der hier beschriebene Vergleich auf einer überschlägigen Berechnung beruht und für eine belastbare Aussage zum Verhältnis der Umweltfolgen durch Produktherstellung und C2C-Prozess jeweils eine fallspezifische, vergleichende Analyse notwendig ist. Aus der hohen Relevanz des Transports für die Ressourcenintensität und Umweltauswirkungen des betrachteten Anwendungsfalls lässt sich wiederum vermuten, dass diese Form des Gebrauchsgüterhandels nachhaltiger sein kann als eine vergleichbare Transaktion auf einem klassischen Flohmarkt, sofern die Kaufenden und Verkaufenden mehrere Kilometer mit dem Pkw anreisen und nicht eine große Anzahl von Produkten gehandelt wird, auf die sich die Umweltauswirkungen der Fahrten verteilen lassen. Die hohe Relevanz des Transports durch private Pkw-Fahrten konnte auch bereits in anderen Untersuchungen nachgewiesen werden (Erdmann, 2011).

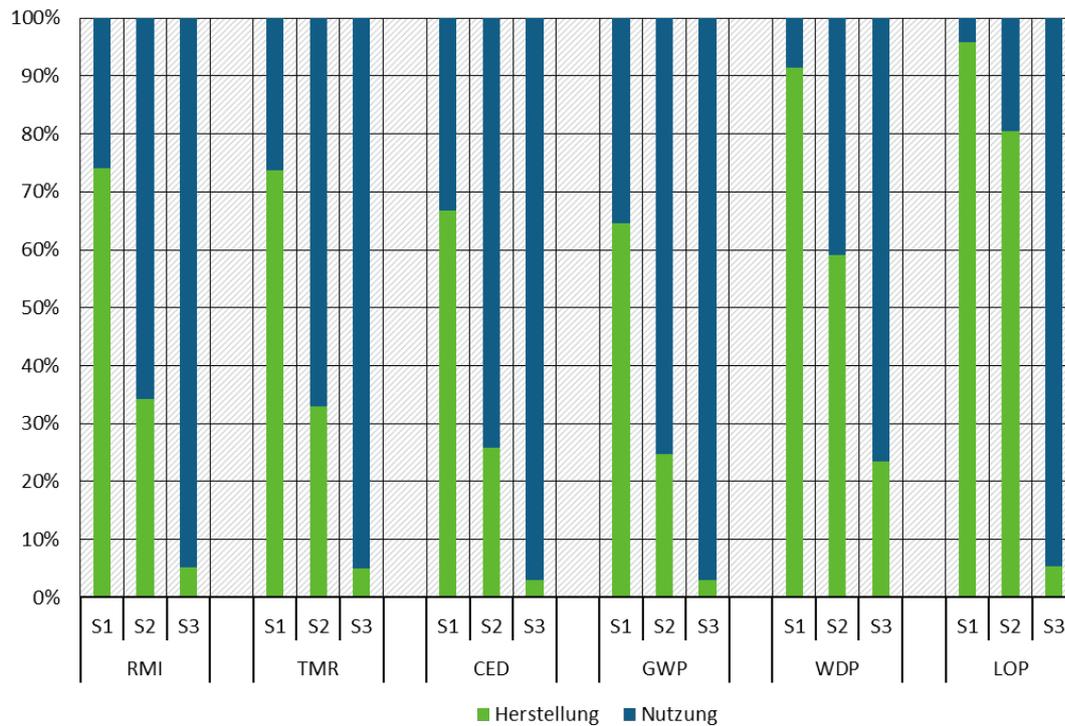
Eine umfassende Studie des Forschungsinstituts Observatoire Cetelem in 17 europäischen Ländern kommt zu dem Schluss, dass das Aufkommen neuer Verbraucher*innen, welche gleichzeitig auch Verkäufer*innen sind, die Marken und Händler zwingt, ihre Denkweise hinsichtlich der Kreislaufwirtschaft zu überprüfen. Diese Entwicklung könnte für alle Beteiligten von Vorteil sein, indem sie das Erstarken einer Kreislaufwirtschaft weiter fördert (L'Observatoire Cetelem, 2022). Somit sollten bei der Diskussion potenzieller Umweltfolgen durch den Weiterverkauf gebrauchter Güter über C2C-Plattformen auch die Effekte auf andere Akteure*Akteurinnen, welche nicht direkt am Handel über die C2C-Plattform teilnehmen, berücksichtigt werden. Über die rein private Anwendung hinaus wird damit gerechnet, dass die derzeitigen Entwicklungen im Rahmen von C2C-Plattformen sich mehr und mehr auch in den B2B-Bereich verlagern. Die Anpassung von Marken und Handelsunternehmen an die steigende Nachfrage der Verbraucher*innen nach Kreislaufwirtschaft und deren Bestreben,

verantwortungsbewusst einzukaufen und Produkte wiederzuverkaufen, führt zu einem Wandel in der Art des Verkaufens. Die Verhaltensweise der Verbraucher*innen wird zu einer Gewohnheit, welche von Handelsunternehmen durch Second-Hand-Angebote oder Mietmöglichkeiten unterstützt wird. Andere Anbietende richten *Resale*-Seiten ein oder sammeln gebrauchte Kleider für das Recycling. Marken wiederum bieten Lösungen zur Verlängerung der Lebensdauer ihrer Produkte an, wie beispielsweise die Möglichkeit der Wiederaufarbeitung oder des Wiederverkaufs. Die Verlängerung des Produktlebenszyklus wird zur neuen Herausforderung im Handel, wodurch Läden zu Orten des Austauschs und der Instandsetzung von Produkten werden können (L'Observatoire Cetelem, 2022).

B.3.8.5 Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie

Wie Abbildung B-58 zeigt, schwanken die Beiträge der Herstellungs- und Nutzungsphase zum Gesamtergebnis stark zwischen den Szenarien. Zudem sind auch erhebliche Schwankungen zwischen den einzelnen erhobenen Indikatoren innerhalb der einzelnen Szenarien ersichtlich, wobei hier jedoch innerhalb der Szenarien $RZ_{\text{effizient}}$ und dem Abholungsszenario jeweils ein Trend zum Überwiegen einer Phase ersichtlich ist. So kann im Szenario $RZ_{\text{effizient}}$ bei allen Indikatoren ein dominanter Einfluss der Herstellungsphase auf den Gesamtwert erkannt werden. Beim Abholungsszenario hingegen ist klar zu erkennen, dass die Nutzungsphase, welche die Abholungsfahrt mit dem Pkw beinhaltet, die prägende Phase für alle erhobenen Indikatoren ist. Für das Szenario RZ_{2011} gestaltet sich das Bild zum Verhältnis der beiden Phasen weniger eindeutig. Für die Indikatoren Primärmaterialeinsatz sowie Gesamtprimärmaterialaufwand, den CO_2 -Fußabdruck und den kumulierten Energieaufwand zeigt sich ein stark überwiegender Einfluss der Nutzungsphase auf die Ergebnisse. Beim Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial hingegen ist in diesem Szenario die Herstellungsphase dominant, welche die Herstellung des Versandkartons mitenthält. Insgesamt ergibt sich also ein Hinweis darauf, dass das Verhältnis von Herstellungs- und Nutzungsphase von der Ausgestaltung des betrachteten Anwendungsfalls im Einzelnen abhängt.

Abbildung B-58: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase in den drei Szenarien; S1 = RZeffizient, S2 = RZ2011, S3 = Abholung*



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

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

Tabelle B-77: Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-Fußabdrucks der Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“ in Prozent nach Anteil der Herstellungs- und Nutzungsphase in den drei Szenarien; S1 = RZeffizient, S2 = RZ2011, S3 = Abholung – Tabelle zu Abbildung B-58

Indikator	Szenario	Herstellung	Nutzung
RMI	S1	74%	26%
RMI	S2	34%	66%
RMI	S3	5%	95%
TMR	S1	74%	26%
TMR	S2	33%	67%
TMR	S3	5%	95%
CED	S1	67%	33%
CED	S2	26%	74%
CED	S3	3%	97%
GWP	S1	65%	35%
GWP	S2	25%	75%
GWP	S3	3%	97%
WDP	S1	91%	9%
WDP	S2	59%	41%
WDP	S3	23%	77%
LOP	S1	96%	4%
LOP	S2	80%	20%
LOP	S3	5%	95%

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

Für den Übergang zu einer Kreislaufwirtschaft ist neben anderen Entwicklungen auch die vermehrte Wiederverwendung von Produkten notwendig, um deren Lebensdauer zu verlängern und den Ressourcenbedarf von Endverbrauchenden zu senken. Zu diesem Zweck haben sich verschiedene C2C-Plattformen etabliert, auf denen neben Wohnraum und Mobilität vor allem Gebrauchsgüter wie Kleidung, Bücher oder Spielwaren ausgetauscht und verkauft werden. Die Fallstudie betrachtet daher die digitale Anwendung einer Transaktion über eine C2C-Plattform inklusive der durch diese Transaktion entstehenden Transport- und Verpackungsaufwendungen. Mittels drei Szenarien wird der Einfluss der Energieintensität der Datenübertragung sowie des Transports mittels Kurierdienst bzw. eigenem Pkw verglichen.

Die Ergebnisse zeigen, dass vor dem Hintergrund der verfügbaren Daten und getroffenen Annahmen besonders die energieeffiziente Datenübertragung für die Ressourcenintensität der Anwendung relevant ist. Weiterhin ist festzustellen, dass besonders die Art der physischen Produktübergabe in Form von Paketversand oder direkter Abholung eine entscheidende Rolle für die Ressourcen- und Umweltwirkung spielt. Hier wirken sich bereits wenige Fahrkilometer für eine Abholung negativ auf die Umweltwirkung der Anwendung aus.

Der C2C-Markt über entsprechende Plattformen ist gut etabliert. eBay Kleinanzeigen ist in Deutschland die führende Plattform für den Gebrauchtwarenhandel und gibt an, dass pro Minute durchschnittlich mehr als 700 neue Anzeigen veröffentlicht und 1.200 Anfragen über das Portal verschickt werden (eBay Kleinanzeigen, 2022). Wenn man davon ausgeht, dass ein Drittel der Anfragen zu einer Transaktion führen, ergeben sich 576.000 Transaktionen pro Tag. Daraus würde sich ein täglicher Primärrohstoffeinsatz von knapp 265 t im Standardszenario für die deutschsprachige C2C-Plattform eBay Kleinanzeigen errechnen.

B.3.9 Fallstudie E-Sport

B.3.9.1 Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung

Nach Schätzungen des Verbandes der deutschen Games Branche haben bereits im Jahr 2018 19 % der Deutschen ein elektronisches Sportmatch verfolgt. Das entspricht ungefähr jedem*jeder fünften Deutschen (Game, 2019). Allein in der Zeitspanne von 2016 bis 2018 ist der deutsche E-Sport Markt von 435 Mio. Euro auf 800 Mio. Euro gewachsen. Der Markt hat sich somit innerhalb von drei Jahren fast verdoppelt. Weltweit gibt es bereits mehr als 2,4 Mrd. Amateurspieler*innen und dem Markt wird weiterhin ein starkes Wachstum prognostiziert (Game, 2019; Gray, 2018). Die Mehrheit der Experten*Expertinnen sind sich einig, dass E-Sport weiter an Popularität gewinnen wird und zukünftigen offiziell als Sportart anerkannt wird (Speight, 2018). 2022 wurde E-Sport zum ersten Mal als Medaillen-Sportart bei den Asienspielen zugelassen und es werden bereits Diskussionen darüber geführt, erste Testaufnahmen bei den Olympischen Spielen durchzuführen (Miah, 2019). Aufgrund des rasanten Wachstums des Marktes ist es von Relevanz, die Ressourcenintensität der Branche zu betrachten.

Der elektronische Sport, kurz E-Sport, fand seine Ursprünge 1952 mit den Spielen *OXO* und *Tennis for Two*. Allerdings standen Computer- und Videospiele bis zum Beginn der 1970er vorwiegend Personen an Universitäten zur Verfügung. Erst 1972 kam die erste Videospielekonsole für den Heimgebrauch (Gaming) auf den Markt. Eines der ersten großen E-Sport-Events fand 1980 statt, wo zur *Space Invaders Championship* von Atari erstmal über 10.000 Gamer zusammenkamen. Somit ist E-Sports eine vergleichbar junge Branche. Aus diesem Grund wird die Definition von E-Sports in der Fachwelt noch immer stark diskutiert (Breuer & Görlich, 2022). Eine der geläufigsten Definitionen beschreibt E-Sport als das wettbewerbsmäßige Spielen von Computer oder Videospiele im Einzel- oder Mehrspielermodus (ESport-Bund Deutschland e. V., 2018). Allerdings haben sich die Technologien seit dieser Definition weiterentwickelt, sodass neben den Computer- und Videospiele auch „Mobile Games“ dem E-Sport zugeordnet werden können (Breuer & Görlich, 2022). Der Wettbewerbscharakter bei E-Sport Spielen entsteht durch den Leistungsvergleich mit anderen, menschlichen Spielenden. E-Sport-Spiele können meist in Einzel- oder Mehrspielermodus gespielt werden. Somit können Spielende einzeln oder mit Mannschaften im Wettbewerb zueinanderstehen (ESport-Bund Deutschland e. V., 2018).

Dadurch, dass E-Sports noch eine junge Branche und aufgrund technologischer Entwicklungen von einem stetigen Wandel geprägt ist, wurde bisher noch keine Lebenszyklusanalyse in Bezug auf E-Sports in der Literatur durchgeführt. Lediglich wenige Studien befassen sich mit dem Energiebedarf und dem CO₂-Fußabdruck verschiedener Gaming-Systeme. Hierbei muss allerdings bedacht werden, dass Gaming nicht mit E-Sports gleichzusetzen ist. Gaming wird erst durch den Wettbewerbscharakter zum E-Sport (ESport-Bund Deutschland e. V., 2018).

Im Zuge dieser Fallstudie wird eine repräsentative E-Sport Fallstudie aufgesetzt. Hierzu werden Statistiken herangezogen. Dabei muss allerdings einleitend erwähnt werden, dass die Datenlage für die Entwicklung der Fallstudie sehr eingeschränkt war. Somit müssen auf Basis einer Desktoprecherche mehrere Annahmen getroffen und bei der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt werden. In Zukunft sollte die Datenlage dieses Themenfeldes verbessert und weitere Lebenszyklusanalysen durchgeführt werden. Somit ist diese Fallstudie lediglich als Annäherung zu betrachten.

Wie bereits zu Beginn erwähnt, wird auch in Deutschland die E-Sports Branche immer größer. Indiz dafür ist die wachsende Infrastruktur durch die steigende Anzahl an Ligen und Vereinen (Game, 2019). 2021 werden vor allem *Counter-Strike: Global Offensive*, *League of Legends*, *Rocket League* und *Starcraft II* in Deutschland gespielt. Darüber hinaus werden die genannten Spiele auch in Turnierform gespielt und live auf der Streamingplattform *Twitch* übertragen (Game, 2019).

Weltweit verzeichnet *League of Legends* die meisten Zuschauerstunden über diese Streamingplattform. Allein im Januar 2023 kam es zu 126,49 Millionen Zuschauerstunden auf *Twitch* (Tenzer, 2022). Der *Esports Observer*, *Twitch* und *Esports Earnings* betitelten *League of Legends* 2019 als eines der erfolgreichsten E-Sports Games (auf Basis von verteilten Preisgeldern, monatlich angesehenen E-Sport Streams, Anzahl gleichlaufender Streamingkanäle und Anzahl von Turnieren) (Game, 2019). Täglich spielen weltweit 4,2 Millionen Personen gleichzeitig *League of Legends*. Knapp 6 % davon sind Deutsche. Somit spielen 250.740 Deutsche täglich diesen einzelnen E-Sport (LeagueFeed, 2023).

B.3.9.2 Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie

Zur Betrachtung der Ressourcenintensität des E-Sports muss zunächst eine Eingrenzung des Betrachtungsrahmens im Hinblick auf das System von E-Sports vorgenommen werden.

Aufgrund der großen Reichweite und Bekanntheit von *League of Legends* (LoL), wird das E-Sports-Spiel beispielhaft für diese Fallstudie herangezogen. Des Weiteren wird davon ausgegangen, dass die Spiele über *Twitch* übertragen werden. Somit kann der Multiplikatoreffekt des E-Sports durch Streams berücksichtigt werden.

Ein Spiel findet in der Regel zwischen zehn Spielenden (fünf gegen fünf statt). Um LoL spielen zu können, müssen die Spielenden jeweils über Endgeräte zur Wiedergabe von Bild (Bildschirm) sowie zur Navigation im Spiel (Tastatur, Maus) verfügen. Die Zusammensetzung der genutzten Geräte gestaltet sich im Einzelfall unterschiedlich, abhängig von der Verfügbarkeit, Professionalität und den individuellen Präferenzen der Spielenden. Allen gemein ist, dass sie Daten erzeugen und empfangen und so, wie bei anderen IKT-Anwendungen, über das Internet mit Gaming-Servern kommunizieren, welcher die Datenströme an die Spielenden verteilt (Zimmermann *et al.*, 2020). Das Sortiment der verfügbaren Endgeräte spannt sich von Geräten wie Laptops, Desktop PCs hin zu speziellen Gaming-Laptops und -PCs mit mehreren Monitoren.

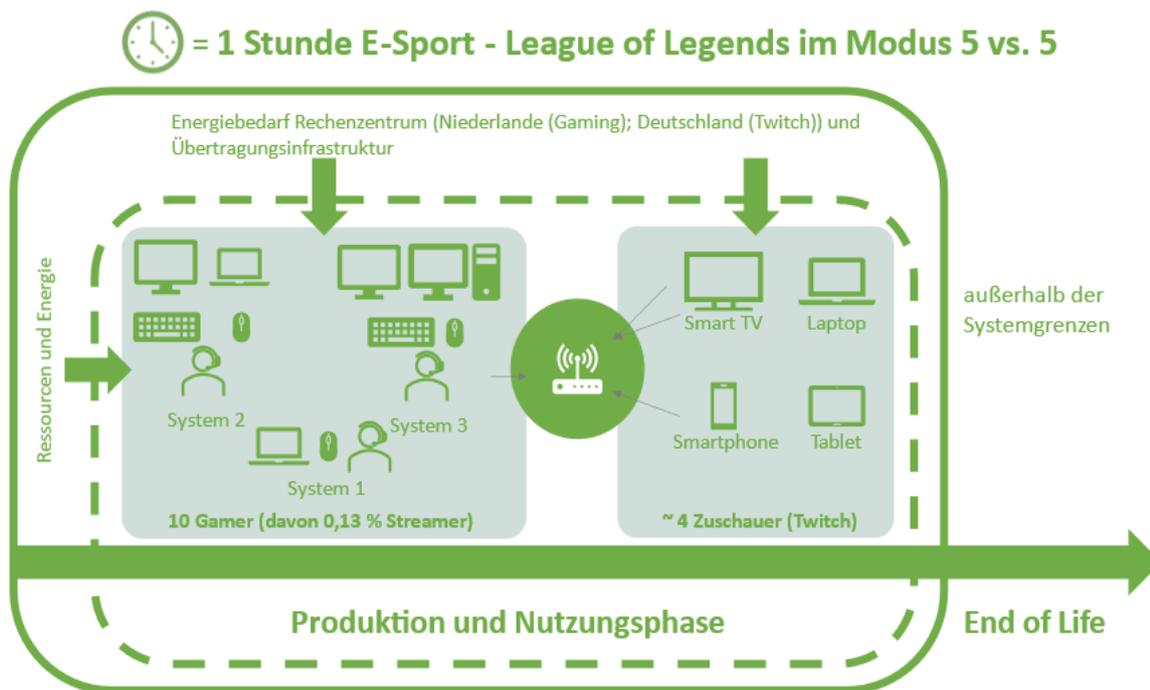
Zusätzlich streamen einige der Spielenden ihr Match zusätzlich über eine Streamingplattform. Die für Games meistgenutzte Plattform ist *Twitch*, die aufgrund der hohen Popularität im Gaming-Bereich als Beispiel herangezogen wird. Der Anteil der Streamer unter den Spielenden beträgt ca. 0,13% (eigene Berechnung auf Basis von LeagueFeed (2023)). Einen Stream eines Spielenden verfolgen wiederum im Schnitt 296 Zuschauende an ihren jeweiligen Endgeräten (TwitchMetrics, 2022). Somit beinhaltet ein Einblick in den Anwendungsfall E-Sport nicht nur Informationen über eine spezielle digitale Anwendung, sondern setzt sich auch mit Fragen der Anrechenbarkeit des Ressourcenverbrauchs verschiedener Geräte auf die einzelnen digitalen

Anwendungsfälle auseinander und betrachtet das Spielen selbst sowie das Streamen des Spiels (seitens Spieler*in und Zuschauer*in).

Neben den Endgeräten und der Heimvernetzung in Form eines Routers sind zudem das Übertragungsnetz und das Rechenzentrum für das E-Sports relevant. Wie zuvor erläutert, werden diese nur in Form ihres Energieaufwands für die Datenübertragung in die Betrachtung einbezogen. Der Stromverbrauch der Server- und Übertragungsnetznutzung wird jedoch über einen aus der Fachliteratur hergeleiteten Berechnungsschlüssel für die Nutzungsphase in das Modell mit integriert (Zimmermann *et al.*, 2020).

Die Entsorgung der End- und Heimvernetzungsgeräte findet in der hier durchgeführten Betrachtung keine Berücksichtigung. Dies ist mit den Unsicherheiten am Ende des Lebenszyklus solcher Geräte sowie mit der Tatsache verbunden, dass bisherige Studien von einer dominanten Umweltwirkung der Produktion und Nutzungsphase gegenüber der Entsorgung auszugehen (vgl. Joshi *et al.*, 2021; Prakash *et al.*, 2012). Abbildung B-59 verdeutlicht den Betrachtungsrahmen der Fallstudie sowie wesentliche Annahmen, die im Folgenden erläutert werden.

Abbildung B-59: 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, Streamingplattform: Twitch, Gerätekombination für Gaming und Streaming: siehe Tabelle B-78, 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 (Gröger *et al.*, 2021).

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

B.3.9.3 Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie

Für den Anwendungsfall des E-Sports wurde folgende Untersuchungseinheit gewählt:

Gaming und Streaming von League of Legends (LoL) für 1 h unter Nutzung eines geeigneten Endproduktsystems für Gaming und Live-Streaming von 10 Spielenden und anteiligen Stream-Zuschauenden

Um den Umstand, dass eine Vielzahl an möglichen Endgeräten für das Gaming von LoL besteht, im Rahmen dieser Fallstudie abzubilden, wurden drei verschiedene Hardware-Systeme definiert, welche in gewichteten Anteilen das betrachtete Endgerätsystem bilden (System 1-3, vgl. Abbildung B-59). Für den Spielenden selbst wird nur ein System zugrunde gelegt. Die Notwendigkeit verschiedene Hardware-Komponenten im Rahmen dieser Studie abzubilden, ergibt sich durch die Vielzahl an Spielenden auf verschiedenen Leveln und dem erforderlichen Zugang zu teurer Hardware. Auch auf der Seite der Zuschauenden werden verschiedene Möglichkeiten der Endgeräte berücksichtigt. Details hierzu enthält das folgende Kapitel.

B.3.9.3.1 Komponenten und betrachtete Gamingsysteme

Für die Festlegung der Komponenten der Fallstudie E-Sports wurde eine Desktoprecherche durchgeführt. Auf Basis dieser Recherche wurden die in Tabelle B-78 gelisteten Annahmen getroffen.

Tabelle B-78: Komponenten für ein E-Sport-Spiel und Live-Streams

Akteur*Akteurin	Endgeräte	Quelle
Spielender	<i>System 1: Geringer Spielkomfort - Mindestens spielfähig (z. B. Einsteiger) (10%)</i> Laptop und externe Maus	eigene Annahmen
	<i>System 2: Mittlerer Spielkomfort (30%)</i> Gaming Laptop, externer Monitor, externe Maus, externe Tastatur	
Zuschauer	<i>System 3: Hoher Spielkomfort (60%)</i> Gaming Computer, 2 x externer Monitor, externe Maus, externe Tastatur	(LeagueFeed, 2023; Statista, 2021a)
	Router	
Zuschauer	Tablet (27 %) Fernseher (22 %) Smartphone (24 %) Laptop (27 %)	
	Router	

Laut Statista nutzen die Zuschauenden zu fast gleichen Teilen ein Tablet, einen Fernseher, ein Smartphone oder einen Laptop zum Verfolgen der Streams. Für die verwendete Hardware der Spielenden konnte keine Studie gefunden werden. Aus diesem Grund wurden drei verschiedene Hardware-Systeme angenommen. System 1 spiegelt die Mindestanforderungen an die Hardware wider, die nötig ist, um spielfähig zu werden. Somit ist bei diesem System der Spielkomfort am geringsten. System 2 stellt eine Verbesserung im Spielkomfort dar. In diesem System besitzen

die Gamer einen Gaming-Laptop, einen externen Monitor, auf dem sie das Spiel in einer größeren Ansicht verfolgen können, eine Maus und eine externe Tastatur. Im Vergleich zu System 1 und 2 bietet System 3 den höchsten Spielkomfort. In diesem Fall nutzen die Spielenden einen Gaming-Computer, zwei externe Monitore, eine externe Tastatur und eine externe Maus. Die prozentuale Aufteilung der Systeme auf die Spielenden basiert auf eigenen Annahmen. Die Fülle unterschiedlicher Möglichkeiten der Gaming-Teilnahme (Equipment, technische Bedingungen, individuelle Anforderungen etc.) wird somit beispielhaft und vereinfacht abgebildet. Auf die Betrachtung aufwändigerer Komponenten für die Streamenden (Twitch), wie etwa eine externe Filmkamera, ein externes Mikrofon und ein externes Soundsystem, wurde aufgrund der geringen Anzahl an Streamenden (0,13 % von den Gamenden) bewusst verzichtet.

Die gängigste Variante LoL zu spielen ist der Fünf gegen Fünf Modus. Somit werden insgesamt zehn Spielende angenommen. Auf Basis von TwitchMetrics (2022) konnte ermittelt werden, dass die Top 100 Streamenden auf ca. 10.017 Streaming-Stunden im Monat kommen. Wird nun ein Monat mit 30 Tagen und 12 h max. Zeitspanne, in der gespielt werden kann, angenommen, ergibt sich eine Anzahl von 28 Streamenden pro Stunde Gaming. Anhand von TwitchMetrics (2022) und LeagueFeed (2023) kann der Anteil von Streamenden an den Spielenden abgeschätzt werden, indem die Anzahl an Streamenden durch die Gesamtanzahl der Spielenden geteilt wird. So ergibt sich ein Anteil von 0,13 % der Streamenden an den Spielenden. In diesem Zuge muss gesagt werden, dass nur die Top 100 Streamenden für die Berechnung einbezogen werden konnten, da keine Gesamtstreamingdauer in Deutschland zur Verfügung stand. Über die Top 100 Streamenden wurde auch die durchschnittliche Zuschauerzahl pro Stunde ermittelt, die 296 Zuschauende beträgt. Auf der einen Seite wird somit die Gesamtstreamingdauer der Streamer unterschätzt, die Anzahl an Zuschauenden allerdings überschätzt. Des Weiteren standen auch nur Daten der Streamingplattform Twitch zur Verfügung. Bei der Nutzung von anderen Plattformen, können zusätzliche Emissionen und Ressourcenverbräuche entstehen, die aufgrund der Datenlage in dieser Fallstudie nicht berücksichtigt werden konnten. Diese Punkte müssen bei der Analyse der Ergebnisse berücksichtigt werden.

B.3.9.3.2 Rahmenbedingungen der Nutzungsphase

Für die Nutzungsphase der Fallstudie E-Sports sind vor allem die Energiebedarfe relevant. Tabelle B-79 listet die Leistungsaufnahme der betrachteten Systeme auf. Die Leistungsaufnahmen einer externen Tastatur oder optischen PMAus werden nicht berücksichtigt, da davon auszugehen ist, dass der zusätzliche Stromverbrauch über den Laptop bereitgestellt wird, an den sie angeschlossen sind und sie im Verhältnis zu den in Tabelle B-79 aufgeführten Geräten vernachlässigbar sind.

Tabelle B-79: Leistungsaufnahme der betrachteten Geräte pro Stunde

Gerät	Leistungsaufnahme	Quelle
Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon	8,4 Wh	(Prakash <i>et al.</i> , 2016)
Smartphone	2 Wh (3227 mAh (1,24 Wh) Akkukapazität (iPhone 13), 1x täglich laden)	(Hristov, 2022)
Laptop mit integrierter Kamera und Mikrofon + externer Monitor	1,64 Wh	(Prakash <i>et al.</i> , 2016)
Router	1,3 Wh	(Gröger, 2020)
Gaming Computer	350 – 800 Watt (Spielbetrieb) → 575 Watt * 1 h/1000 = 0,575 kWh	(Weißmann, 2022)
Gaming Laptop	180 – 200 Watt → 190 Watt * 1 h/1000 = 0,190	(Weißmann, 2022)

Um den Strombedarf eines E-Sport-Spiels abzubilden, muss auch jener Strom berücksichtigt werden, der durch die Internetverbindung und Servernutzung in Anspruch genommen wird (Übertragungsnetz und Server/Rechenzentrum) (Tabelle B-80). Die Riot Games Server für das Spiel LoL befinden sich in Amsterdam, wohingegen Twitch Server in Deutschland besitzt. Somit wird für die Fallstudie der Strommix auf den Niederlanden und aus Deutschland zugrunde gelegt. Zusätzlich zum Energiebedarf des Rechenzentrums ist auch die Leistungsaufnahme der Komponenten zur Datenübertragung zu berücksichtigen. Hierbei wird auf die Green Cloud Computing Studie (Gröger *et al.*, 2021) zurückgegriffen, in welcher für einen exemplarischen Datenstrom auf einer Wegstrecke von ca. 500 km innerhalb Deutschlands ein Energiebedarf von 1,6 Wh/GB für eine VDSL-Verbindung angegeben wird.

Tabelle B-80: Für Gaming und Streaming benötigte Bandbreite des Anbieters „Riot Games“ und „Twitch“ in Standardqualität

Bildqualität	Upload/Download	GB/s	GB/hr
720p 60 fps oder 1080p 30 fps (Streaming über Twitch)	4500 kbps	0,0005625	2,025
Standard (Spielen von LoL)	55 MB/h	0,00001527	0,055

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“ 2023), nach Twitch (2023) und Global Gaming (2022)

Eine Zusammenfassung der Wesentlichen für die Fallstudie definierten Rahmenbedingungen und Annahmen ist in Abbildung B-59 aufgeführt.

B.3.9.3.3 Weitere Sachbilanzdaten

Für die Modellierung der Fallstudie E-Sports werden Datensätze für Endgeräte aus der Datenbank Ecoinvent verwendet. Der jeweilige Ressourcenbedarf für die Herstellung der wichtigsten verwendeten Endgeräte (Laptop, Smartphone, Display, Desktop Computer, Smart TV und Tablet) wurde bereits in Kapitel B.2.4 dargestellt.

Unter Betrachtung der Systemgrenzen sind neben der Herstellung der bereits dargestellten Endgeräte folgende weitere Datensätze Teil der Sachbilanz:

- ▶ Router: *market for router, internet | router, internet | Cutoff, U – GLO*
- ▶ Tastatur: *market for keyboard | keyboard | Cutoff, U – GLO*
- ▶ Optische PMAus: *market for pointing device, optical mouse, with cable | pointing device, optical mouse, with cable | Cutoff, U – GLO*
- ▶ Strombedarf der Gaming-Internetverbindung: *market group for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U – NL*
- ▶ Strombedarf durch Leistungsaufnahme der betrachteten Endgeräte, sowie Streaming: *market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U – DE*
- ▶ Strombedarf der Rechenzentren durch Streaming, sowie Streaming: *market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U - DE*
- ▶ Strombedarf der Rechenzentren durch Gaming, sowie Streaming: *market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U - NL*

Die Aufschlüsselung nach konkreten Rohstoffen erfolgt im nachfolgenden Kapitel im Rahmen der Ergebnisse.

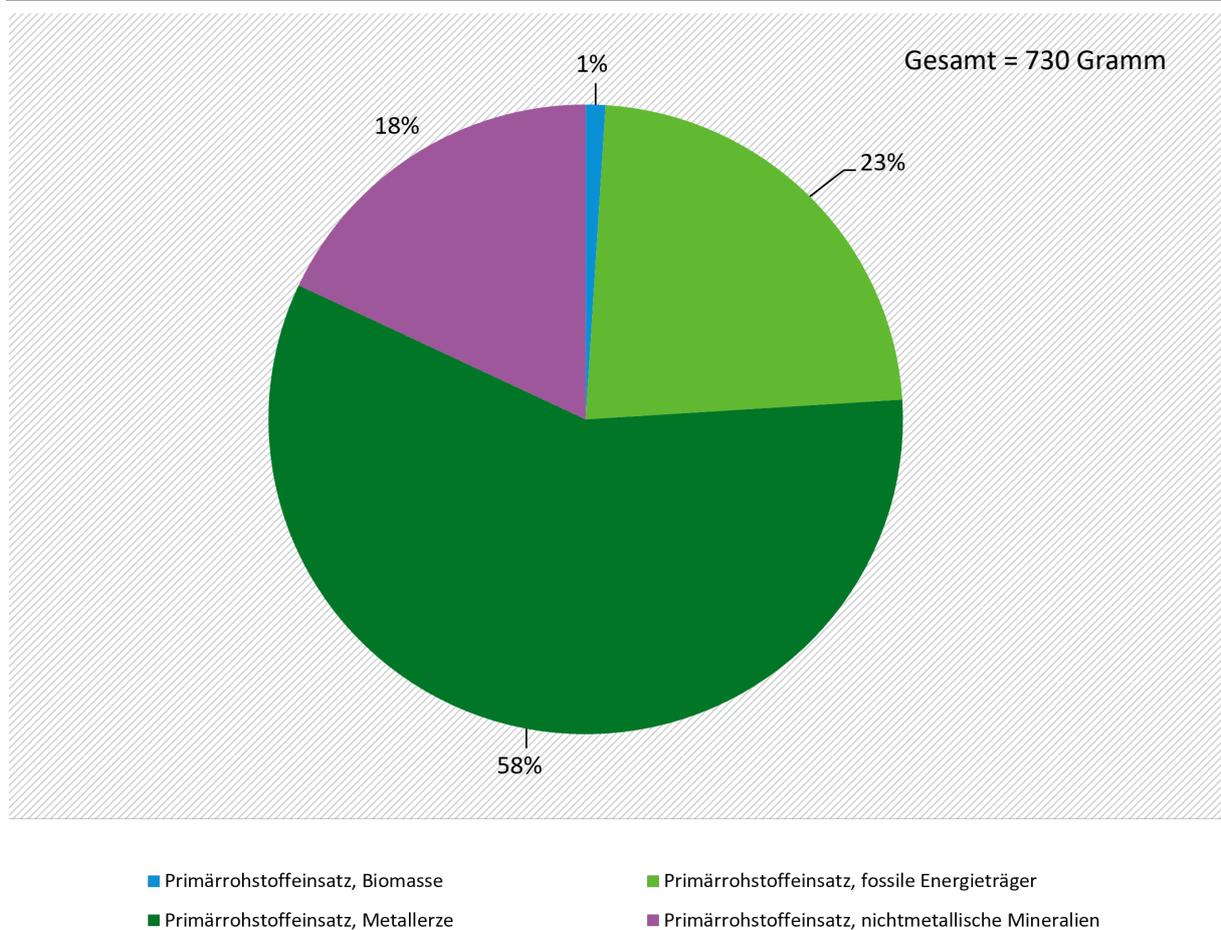
B.3.9.4 Ergebnisse zur Ressourcenintensität

B.3.9.4.1 Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme

B.3.9.4.1.1 Herstellungsphase

Heruntergebrochen auf die verwendete Untersuchungseinheit von einer Stunde E-Sports Gaming wurde ein **Primärrohstoffeinsatz von 730 g/h Gaming** aus der Herstellung der Endgeräte berechnet. Die Anteile der verschiedenen im Primärrohstoffeinsatz berücksichtigten Rohstoffarten sind in Abbildung B-60 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass Metallerze mehr als die Hälfte der zur Herstellung notwendigen Rohstoffe darstellen, fossile Energieträger und nichtmetallische Mineralien in ähnlicher Größenordnung notwendig sind und Biomasse als Rohstoff eine untergeordnete Rolle in der Herstellung des E-Sport-Systems spielt. Wird auch die ungenutzte Materialentnahme in die Erhebung miteinbezogen, ergibt sich für das E-Sport-System ein **Gesamtprimärmaterialaufwand von 830 g/h Gaming**. Die Anteile der einzelnen Rohstoffarten ändern sich hierbei nicht nennenswert im Vergleich zu denen des Primärrohstoffeinsatzes (Abweichung pro Kategorie max. 1 %).

Abbildung B-60: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Herstellung eines E-Sport-Systems in Prozent*



* Die Abbildung zeigt gerundete Zahlen

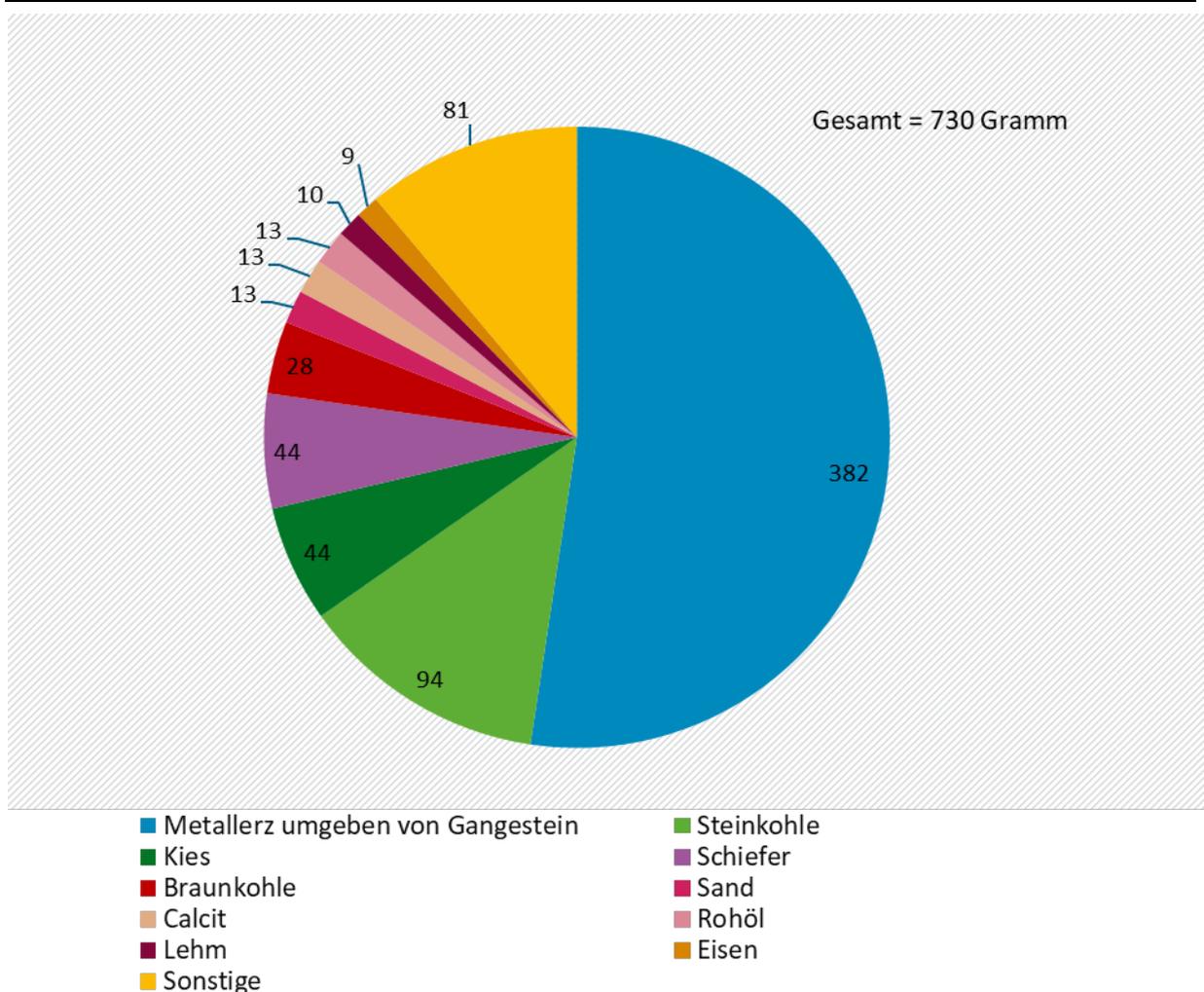
Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Beim Blick auf die einzelnen Elementarflüsse fällt auf: Die Rohstoffintensität der Herstellungsphase ist – rein nach Masse betrachtet – vorrangig durch die Entnahme von Ganggestein, Stein- und Braunkohle, Kies und Schiefer geprägt (vgl. Abbildung B-61). Insgesamt haben die fossilen und mineralischen Rohstoffe einen RMI von 686 g pro Stunde E-Sport (94 % des gesamten RMIs der Herstellungsphase). Bei Betrachtung der einzelnen Elementarflüsse ist die Rohstoffintensität der Herstellungsphase rein massentechnisch vorrangig durch die Entnahme von Ganggestein, Stein- und Braunkohle, Kies und Schiefer (vgl. Abbildung B-61) geprägt. Die Herstellungsphase der Endgeräte umfasst dabei alle Rohstoffaufwendungen inklusive notwendigen Vorketten und benötigter Energiezufuhr³⁴. Vergleicht man diese Ressourcen exemplarisch mit den Bestandteilen eines Desktop-Computers (Gonda & Degrez, 2018) zeichnet sich ab, dass bei den genannten Stoffen (mit der Ausnahme von Eisen, welches in Form von Stahl Bestandteil eines klassischen Desktop-Computers ist) nicht davon auszugehen ist, dass sie in entsprechender Menge in den IKT-Endgeräten selbst vorhanden sind, sondern die Produktionsvorkette und Energienutzung für den Einsatz der entsprechenden Ressourcen verantwortlich ist. Zudem zeigen die Ergebnisse eine Relevanz von Wasser und Gas als Ressourcen zur Herstellung der IKT-Endgeräte – diese werden in diesem Abschnitt jedoch nicht weiter dargestellt, da Gas mittels des kumulierten Energieaufwands und die Wassernutzung

³⁴ Wie beschrieben, entfällt in dieser Betrachtung der Rohstoffbedarf für die Herstellung der Komponenten für Rechenzentren und die Netzinfrastruktur.

durch die Darstellung des Wasserfußabdrucks in der Ergebnisdarstellung Berücksichtigung finden.

Abbildung B-61: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „Eine Stunde E-Sport“ in Gramm*



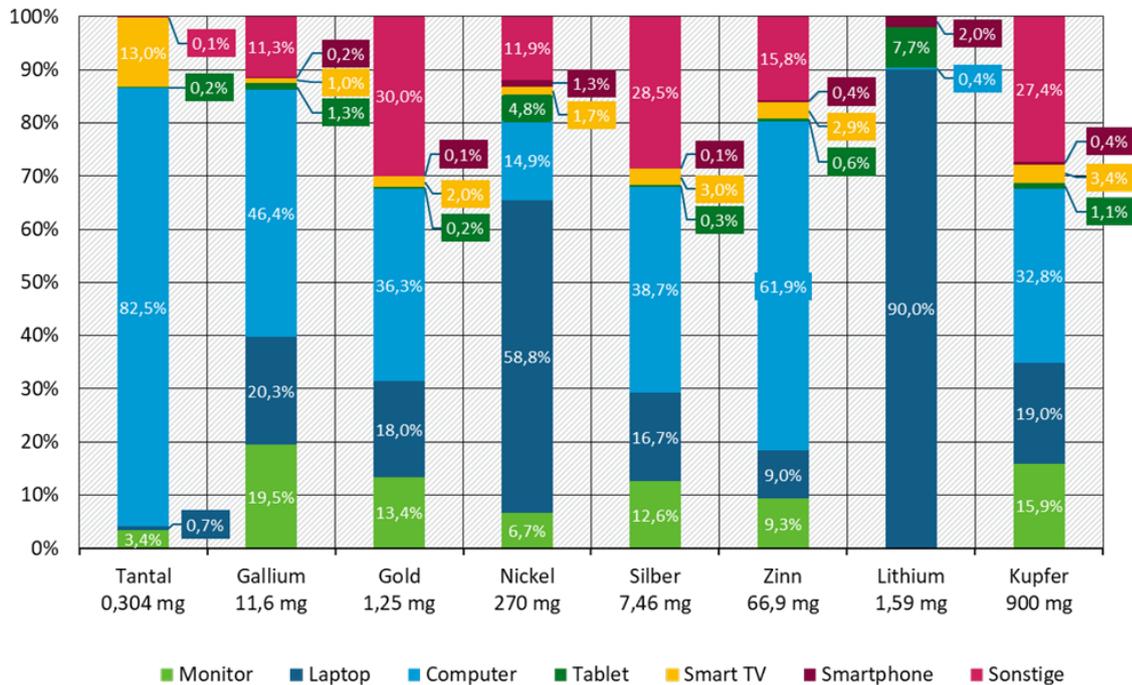
* Die Abbildung zeigt gerundete Zahlen

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

Neben den massenmäßig am meisten aufgewendeten Ressourcen bei der Herstellung des betrachteten Produktsystems sind auch Ressourcen von Interesse, deren Bedarf zwar nominell niedrig erscheint, die jedoch aufgrund ihrer Relevanz für die Digitalisierung von Interesse sind. Diese digitalisierungsrelevanten Rohstoffe umfassen auch eine Reihe sogenannter kritischer Rohstoffe, deren Kritikalität sich aus einer Kombination von wirtschaftlicher Bedeutung für die EU und Versorgungsrisiko ergibt (Europäische Kommission, 2020). Hintergründe zu den verschiedenen Rohstoffkategorien und eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise bei der Auswertung sind in Kapitel B.2 zu finden.

Betrachtet man die wichtigsten Rohstoffe im Detail und durch welche Komponenten ihr Bedarf verursacht wird, ergibt sich das Bild wie in Abbildung B-62 dargestellt. Für ein einstündiges E-Sport-Match fallen dabei neben Lithium und Kupfer, die für alle Fallstudien als relevante Rohstoffe betrachtet werden, weitere sechs Rohstoffe spezifisch für E-Sports ins Gewicht.

Abbildung B-62: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ in Milligramm und Prozent



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

Tabelle B-81: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe je Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ in Prozent und absolut – Tabelle zu Abbildung B-62

Rohstoff	Monitor	Laptop	Computer	Tablet	Smart TV	Smartphone	Sonstige	Total
Tantal	0,00912 (3%)	0,00304 (1%)	0,24928 (82%)	0 (0%)	0,03952 (13%)	0 (0%)	0 (0%)	0,304 (100%)
Gallium	2,204 (19%)	2,32 (20%)	5,346 (46%)	0,116 (1%)	0,116 (1%)	0 (0%)	1,276 (11%)	11,6 (100%)
Gold	0,1625 (13%)	0,225 (18%)	0,45 (36%)	0 (0%)	0,025 (2%)	0 (0%)	0,375 (30%)	1,25 (100%)
Nickel	18,9 (7%)	159,3 (59%)	40,5 (15%)	13,5 (5%)	5,4 (2%)	2,7 (1%)	32,4 (12%)	270 (100%)
Silber	0,9708 (13%)	1,2682 (17%)	2,9094 (39%)	0 (0%)	0,2238 (3%)	0 (0%)	2,1634 (29%)	7,46 (100%)
Zinn	6,021 (9%)	6,021 (9%)	41,478 (62%)	0,669 (1%)	2,007 (3%)	0 (0%)	10,704 (16%)	66,9 (100%)
Lithium	0 (0%)	1,431 (90%)	0 (0%)	0,1272 (8%)	0 (0%)	0,0318 (2%)	0 (0%)	1,59 (100%)
Kupfer	144 (16%)	171 (19%)	297 (33%)	9 (1%)	27 (3%)	0 (0%)	243 (27%)	900 (100%)

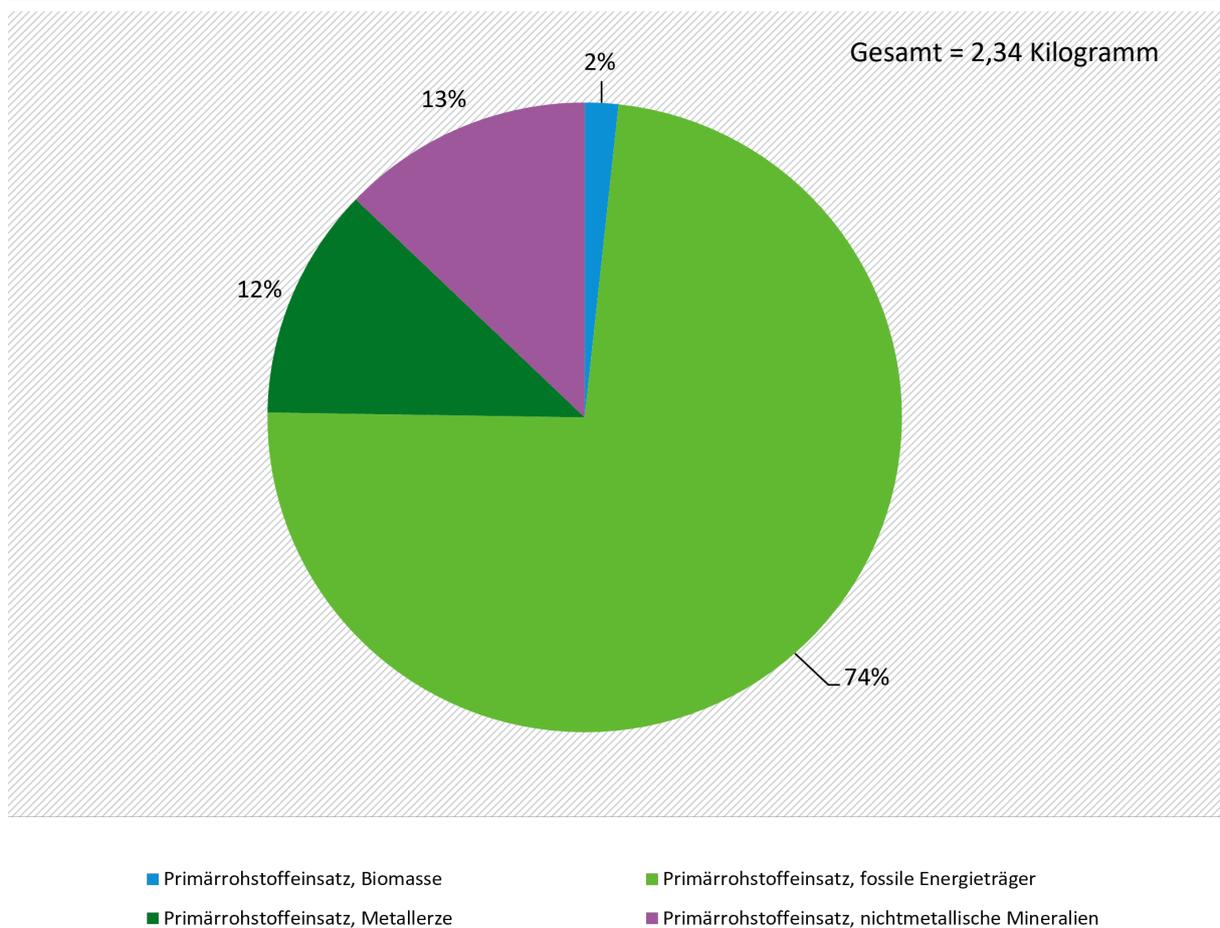
Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Auffällig ist dabei, dass für alle näher betrachteten digitalisierungsrelevanten Rohstoffe der Großteil des Bedarfs auf eines oder mehrere der folgenden Endgeräte entfällt: den Monitor, Computer, Laptop und „Sonstige“. Die Kategorie „Sonstige“ umfasst dabei im Wesentlichen den Router, die Tastatur und die Maus. Die Endgeräte sind wiederum für verschiedene Anteile der Rohstoffe verantwortlich. Besonders markant sind hier für Lithium der Laptop und für Tantal der Computer, die über 90 % bzw. über 80 % des jeweiligen Rohstoffbedarfs verursachen. Bei allen Rohstoffen sorgt die Nutzung eines Computers im E-Sport-System für einen großen Anteil am Ressourcenverbrauch der digitalisierungsrelevanten Rohstoffe. Lediglich in Bezug auf Nickel und Lithium verursacht die Nutzung des Laptops einen höheren Ressourcenverbrauch als der Computer. Der geringe Beitrag des Smartphones zum Rohstoffbedarf ist einerseits durch das Nutzungsprofil bedingt, bei dem lediglich ca. ein Viertel der Zuschauenden ein Smartphone benutzt. Weiterhin wird ersichtlich, dass die Nutzung der betrachteten E-Sports-Anwendung mit dem Smartphone auch generell mit einem deutlich geringeren Bedarf an besonders digitalisierungsrelevanten Rohstoffen dieses Anwendungsfalls verbunden ist als mit größeren Geräten.

B.3.9.4.1.2 Nutzungsphase

Die einstündige Nutzung des aufgezeigten E-Sport-Systems wurde mit einem Primärrohstoffeinsatz von 2,34 kg in der Nutzungsphase berechnet, welcher durch den Strombedarf der Endgeräte der Spielenden maßgeblich bestimmt wird. Der Gesamtprimärmaterialaufwand beläuft sich auf 3,09 kg. Abbildung B-63 zeigt die Anteile der verschiedenen Rohstoffarten am Gesamtwert des Primärrohstoffeinsatzes. Durch den Umstand, dass sich der Primärrohstoffeinsatz der Nutzung lediglich durch die Strombedarfe der Endgeräte wie auch dem Strombedarf der Internetnutzung bedingt, sind die Anteile durch den zugrundeliegenden Strommix der Verwendung geprägt. Sowohl der deutsche Strommix als auch der niederländische Strommix, die den verwendeten Datensätzen zu Grunde liegen, sind stark durch die Verwendung fossiler Energieträger geprägt. Hieraus ergibt sich deren anteilige Dominanz am Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase.

Abbildung B-63: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase des E-Sport-Systems



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

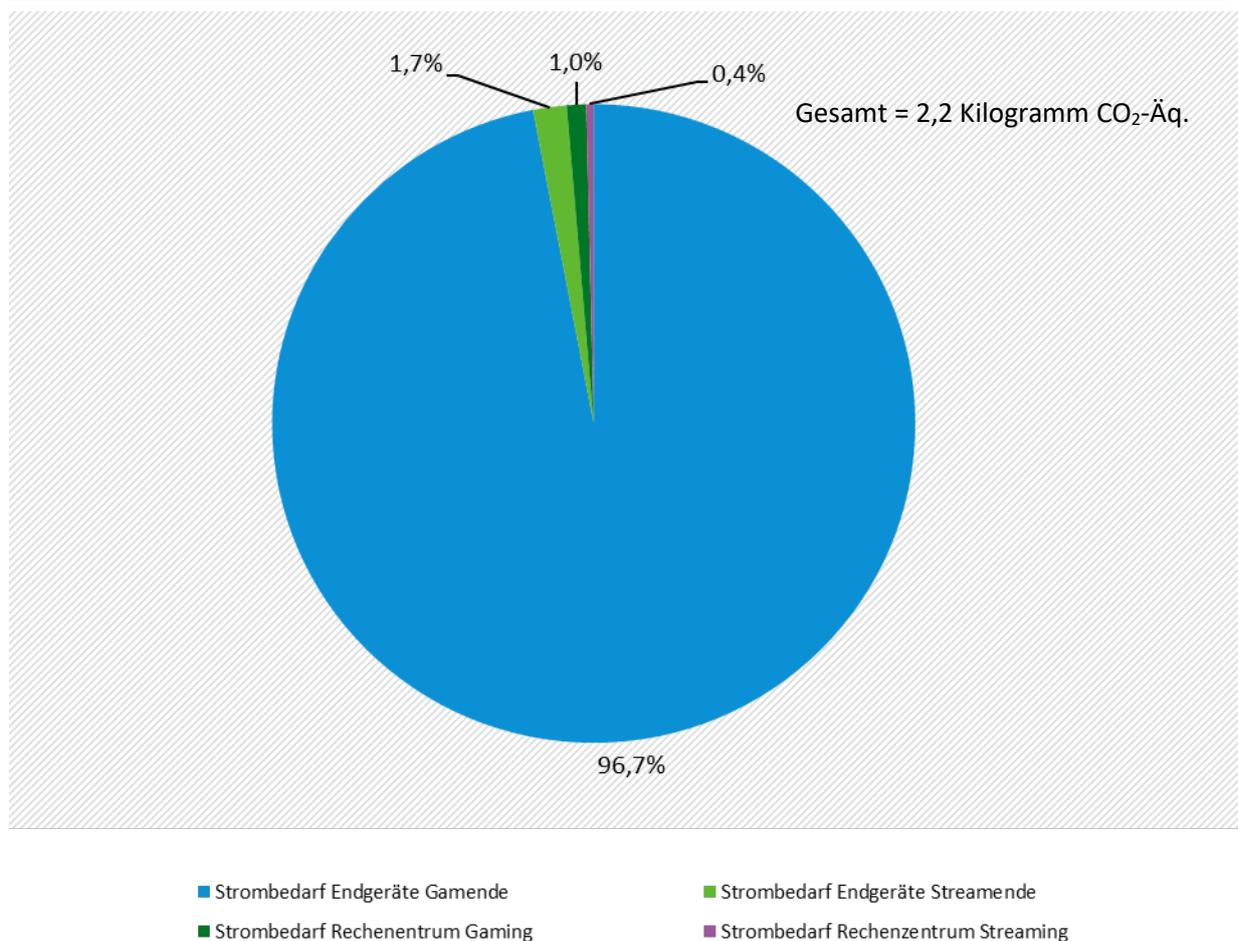
B.3.9.4.2 Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Fußabdruck

Der errechnete kumulierte Energieaufwand (KEA, engl. CED) der Herstellungsphase des genutzten Produktsystems für die Untersuchungseinheit beträgt **5,17 MJ**. Der kumulierte Energieaufwand der einstündigen Nutzung des Produktsystems beträgt **39,8 MJ**.

Ähnliches lässt sich auch für den CO₂-Fußabdruck (als Global Warming Potential GWP100) beobachten, für den sich nach der Allokation auf die Untersuchungseinheit ein GWP von **340 g CO₂-Äq.** für die Herstellung ergibt und ein signifikant höherer CO₂-Fußabdruck für die einstündige Nutzung mit **2,2 kg CO₂-Äq.**

Der kumulierte Energieaufwand wie auch der CO₂-Fußabdruck wird also maßgeblich durch die Nutzungsphase bestimmt. Beide Indikatoren sind in der zusammenfassenden Abbildung B-65 dargestellt und weisen durch die Verwendung fossiler Energieträger und dadurch bedingte Treibhausgasemissionen im Allgemeinen eine hohe Korrelation auf (Valente *et al.*, 2018).

Abbildung B-64: Anteile am CO₂-Fußabdruck der Nutzungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ in Prozent



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

Abbildung B-64 zeigt, dass die Gerätenutzung der Gamenden die Höhe des CO₂-Fußabdrucks maßgeblich prägt. Ein nahezu identisches Bild zeigt sich für den KEA, bei dem 97 % des Energiebedarfs der Nutzungsphase aus dem Strombedarf der Endgeräte bei den Spielenden stammen. Dies ist einerseits durch den höheren Anteil von Spielenden im Anwendungsfall im Vergleich zu Streamenden zu erklären. Weiterhin sind die teils spezialisierten Endgeräte (Gaming Laptop und Gaming Computer) bei den Spielenden in der Regel durch einen hohen Energiebedarf gekennzeichnet.

B.3.9.4.3 Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial

Ähnlich den Ergebnissen bei Rohstoffintensität und Energieaufwand zeigt sich bei der Analyse des Wasserfußabdrucks (WDP), dass im Falle der E-Sport Fallstudie die Ergebnisse maßgeblich durch die Nutzungsphase dominiert werden. Kumuliert betrachtet sorgen die Endgeräte in Herstellungs- und Nutzungsphase für einen Wasserfußabdruck von **0,006 m³** und der Stromverbrauch der Internetnutzung (über die Rechenzentren) für **0,012 m³** pro Untersuchungseinheit. Der Wasserfußabdruck der Herstellungsphase wird hierbei maßgeblich durch die Herstellung der Computer beeinflusst, die für 42,8 % des Wasserbedarfs in dieser Phase verantwortlich sind. In der Nutzungsphase ist der Energiebedarf für die Nutzung der Endgeräte der Gamenden für den Großteil des Wasserfußabdrucks verantwortlich (96,9 %).

Auch beim Landnutzungspotenzial (LOP) ist eine Dominanz der Nutzungsphase festzustellen. Während der Herstellungsphase in dieser Wirkkategorie eine Landnutzung von 0,026 m²a pro Stunde E-Sport-Spiel und -Streaming zugeschrieben werden kann, fallen 0,101 m²a in der Nutzungsphase (beim Gaming selbst) an. Beide Indikatoren und die prozentuale Aufteilung zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase sind in der abschließenden Abbildung B-65 dargestellt.

B.3.9.4.4 Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial

Studien, die sich mit der Thematik des Gamings befassen, betrachten hauptsächlich den Energiebedarf und den CO₂-Fußabdruck durch verschiedene Gaming-Systeme.

In einer Studie des Lawrence Berkeley National Laboratory (Mills *et al.*, 2018) wurden die Energiebedarfe von Gaming-Systemen untersucht. Dabei wurde ermittelt, dass Spielekonsolen weniger Strom verbrauchen als Desktop-Computer. Cloud-basierte Gaming-Dienste verursachen eine größere Arbeitslast in Datenzentren und zwischengeschalteten Netzwerken. Das Lawrence Berkeley National Laboratory schätzt einen zusätzlichen Stromverbrauch von 520 Watt eines 10-Watt-Medien-Streaminggeräts für Cloud Gaming. Für Cloud Spiele auf Konsolen wird ein zusätzlicher Bedarf von 300 Watt geschätzt. Cloud Gaming kann zu einer Steigerung von „etwa 40 bis 60 % zum ansonsten gesamten lokalen jährlichen Stromverbrauch für Desktops, 120 bis 300 % für Laptops, 30 bis 200 % für Konsolen und 130 bis 260 % für Media-Streaming-Geräte“ (Mills *et al.*, 2018) beitragen. Somit „sind Cloud-basierte Spiele bei weitem die energieintensivste Form des Spielens über das Internet (im Vergleich zu herkömmlichen Online-Spielen oder dem Herunterladen von Spielen)“ (Mills *et al.*, 2018). Allerdings hat das Lawrence Berkeley National Laboratory ebenfalls festgestellt, dass das Nutzverhalten die Energieintensität stark beeinflussen kann.

Insgesamt wird dem Herunterladen von Spielen in Kombination mit der Nutzung von energieintensiven Laptops, Computern und Displays im Vergleich zu Konsolen eine höhere Umweltbelastung in Bezug auf den Energiebedarf zugeschrieben, der in Zukunft durch Cloud-Gaming noch rasant ansteigen wird. Umweltentlastungspotenziale können somit durch E-Sports nicht erreicht werden, es sei denn, es findet ein Übergang zu Konsolenspielen statt, was auf Basis der meistgespielten E-Sport Games allerdings unwahrscheinlich erscheint (Mills *et al.*, 2018; PWC, 2022).

E-Sports sind ein eher neues Untersuchungsfeld, zu dem bisher wenig Informationen zu Umweltauswirkungen vorliegen. Umweltentlastungen können, wenn überhaupt, nur in Bezug auf andere Computerspiele und ähnliche Formate hin betrachtet werden. Es gibt mehrere Optionen, E-Sports zu betreiben, sei es über Konsolen-Spiele, wie *Fifa* oder über online Spiele wie *League of Legends*. Die Branche befindet sich aufgrund des rasanten technologischen Fortschritts im stetigen Wandel (ESport-Bund Deutschland e. V., 2018). Eine Studie von Mayers *et al.* (2015) fand heraus, dass Onlinespiele, die auf den PC heruntergeladen werden (z. B. *League of Legends*), zu einem geringeren CO₂-Fußabdruck führen als Konsolenspiele, für die der Kauf einer Disk erforderlich ist (Mayers *et al.*, 2015). Das Lawrence Berkeley National Laboratory (Mills *et al.*, 2018) fand allerdings heraus, dass der Strombedarf bei dem Spielen von Onlinespielen wie *League of Legends* über Laptops und Computer deutlich höher ausfällt als bei Konsolenspielen. Allerdings müssen für Konsolen mittlerweile die Spiele nicht mehr in physischer Form vorliegen, weswegen Onlinespiele kein klares Umweltentlastungspotenzial gegenüber Konsolenspielen zugeschrieben werden kann.

Die hier identifizierte Dominanz der Nutzungsphase aufgrund des hohen Energiebedarfs der Endgeräte bei den Spielenden über alle Indikatoren hinweg zeigt, dass energieeffiziente Geräte

und der Strommix eine bedeutende Rolle in einer zukünftigen Reduktion der Umwelteinflüsse von E-Sports spielen werden. Dieses Ergebnis berücksichtigt allerdings nicht die neusten Entwicklungen zum Cloud Gaming. Momentan ist Cloud Gaming noch ein Nischen-Markt (Game, 2021) und wurde daher nicht in die Berechnungen integriert. Allerdings wird dem Cloud Gaming in Zukunft ein rasantes Wachstum vorhergesagt. Eine Studie der Lancaster Universität hat zukünftige CO₂-Fußabdrücke von Gaming-Optionen untersucht. Dabei wurde herausgefunden, dass bei einem Verlagern der Spielaktivitäten auf Cloud Gaming-Systeme, die Emissionen des Gamings um 30 % steigen werden. Grund hierfür ist der rasant steigende Energiebedarf durch Data Service Center, die für Cloud Gaming mehr Rechenkapazität zur Verfügung stellen müssen als für herkömmliche, auf dem eigenen PC gespielte Onlinespiele (Marsden *et al.*, 2020).

Es darf allerdings nicht außer Acht gelassen werden, dass bei einer Reduktion der Umwelteinflüsse durch einen grünen Strommix dennoch ein hoher Ressourcenverbrauch entsteht. Gamende und Streamende benötigen Hardware, um *League of Legends* und andere E-Sports-Spiele spielen zu können. Des Weiteren weist der E-Sport Markt ein großes Wachstum auf.

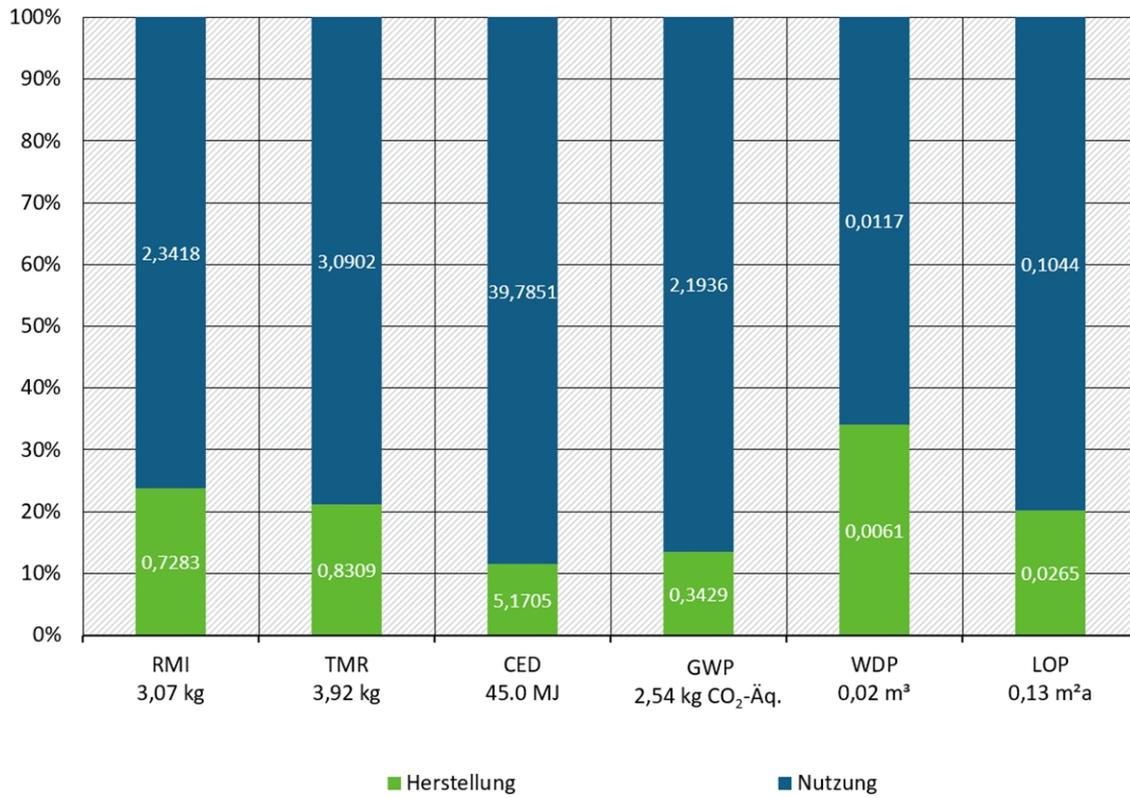
B.3.9.5 Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie

Abbildung B-65 konzentriert sich vergleichend für alle betrachteten Indikatoren auf die Aufteilung der berechneten Ressourcenintensitäten und Wirkkategorien zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase. Es ist deutlich zu erkennen, dass über alle Indikatoren hinweg der Einfluss der Nutzungsphase dominant ist. Die Indikatoren CO₂-Fußabdruck (GWP) und kumulierter Energieaufwand (engl. CED) weisen im Vergleich die höchste Signifikanz der Nutzungsphase gegenüber der Herstellungsphase auf. Hier ist der zuvor beschriebene Energiebedarf der Endgeräte besonders ausschlaggebend.

Der Wasserfußabdruck (WDP) zeigt im Vergleich zu den anderen Indikatoren den höchsten Einfluss der Herstellungsphase (ca. 34 %). Dies ist vorwiegend auf die Produktion des Computers und auch des Laptops zurückzuführen. Alle anderen Endgeräte fallen hier nur mit einem einstelligen Prozentwert in Bezug auf die Herstellungsphase ins Gewicht.

Wie bereits zuvor erläutert, quantifiziert die Fallstudie keine Abfall- oder Recyclingprozesse. Auf Basis bisheriger Studien kann wie beschrieben jedoch angenommen werden, dass der Beitrag im Vergleich zu Herstellung und Nutzung wenig relevant ist.

Abbildung B-65: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-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 = CO₂-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial. Diese Abbildung zeigt gerundete Werte

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

Tabelle B-82: Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-Fußabdrucks zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“ absolut und in Prozent nach Herstellungs- und Nutzungsphase – Tabelle zu Abbildung B-65

Indikatoren	Herstellung	Nutzung
RMI (in kg)	0.72827 (23,6%)	2.34179 (76,4%)
TMR (in kg)	0.83088 (20,9%)	3.09016 (78,2%)
CED (in MJ)	5.17051 (11,5%)	39.7850526103375 (89,5%)
GWP (in kg CO ₂ -Äq.)	0.34288 (13,5%)	2.19363 (85,5%)
WDP (in m ³)	0.00607 (30,35%)	0.01172 (58,6%)
LOP (in m ² a)	0.02653 (20,4%)	0.10441 (77,6%)

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

E-Sports sind in den vergangenen Jahrzehnten sehr populär geworden (Gray, 2018) und der technologische Fortschritt sorgt dafür, dass sich die Branche in regem Wandel befindet. Die Fallstudie beschäftigt sich mit der Frage, mit welcher Ressourcenintensität und ausgewählten anderen Umweltwirkungen diese digitale Anwendung einhergeht. Sie betrachtet vor diesem

Hintergrund ein einstündiges E-Sports Match inklusive der dafür benötigten IKT-Endgeräte, ihrer Herstellung und Energiebedarfe bei der Datenbereitstellung und -übertragung. Hierbei wurde repräsentativ das am meisten kompetitiv gespielte Onlinespiel *League of Legends* herangezogen. Der Fokus der Auswertung liegt dabei auf den verwendeten Rohstoffen, wobei die Betrachtung zwischen mengenmäßig relevanten und im Verhältnis zur Verfügbarkeit digitalisierungsrelevanten Rohstoffen unterscheidet. Aus der Publikation des Lawrence Berkeley National Laboratory (Mills *et al.*, 2018) wird ersichtlich, dass der Großteil des Stromverbrauchs auf die Nutzungsphase zurückzuführen ist. Über die Ressourcenintensität geben die vorliegenden Quellen keine spezifische Auskunft.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Ressourcenintensität in dieser Fallstudie stark durch die Nutzungsphase dominiert wird, da über alle Indikatoren hinweg mehr als 65 % der Auswirkungen auf diesen Teil des Lebenszyklus entfallen. Hierbei ist wiederum hervorzuheben, dass sich der größte Teil der Auswirkungen in der Nutzungsphase mit den Energiebedarfen der Endgeräte bei den Spielenden erklären lässt (z. B. ca. 97 % für KEA und GWP). Dies ist durch das gewählte Produktsystem, teils mit Gaming Laptop bzw. Gaming Computer und ein bis zwei Monitoren, zu erklären, die jeweils einen hohen Energiebedarf aufweisen. Die Zusammensetzung des Produktsystems wurde auf Basis der Literaturrecherche abgeschätzt. Die Leistungsaufnahme der Geräte konnte jedoch zuverlässig ermittelt werden. Bezüglich der Ressourcenintensität durch die Datenübertragung über das Internet kann zwar in dieser Fallstudie von einer untergeordneten Rolle gesprochen werden; dennoch ist es im Kontext steigender Datenübertragungsmengen und einem möglichen Übergang zum Cloud Gaming essentiell, ein genaueres Bild des Energiebedarfs für die Datenübertragung und -verarbeitung zu gewinnen (vgl. z. B. Fallstudie zur Videokonferenz, die bereits auf die Relevanz von Aktualität der Daten sowie Methodik bei der Ermittlung der Energiebedarfe eingeht). Um die Ergebnissensitivität in Bezug auf die Herstellungsphase der Rechenzentren zu beurteilen, wurde eine überschlägige Abschätzung mittels ADP und GWP vorgenommen. Auch wenn Rechenzentren einen relevanten Ressourcenfußabdruck aufweisen, ist dieser im Kontext der hier betrachteten Anwendung gering (0,3 bzw. 0,6 % bezogen auf die gesamte Herstellungsphase).

Die in den Ergebnissen deutlich zu erkennende Dominanz der Nutzungsphase auf die Umwelt- und Ressourcenwirkungen könnte durch die Verwendung energiesparender Geräte reduziert werden. Gleichzeitig zeigt sich auch die hohe Relevanz der Energiewende, um zukünftig den Umwelteinfluss durch den Strommix deutlich verringern zu können.

Es gilt besonders hervorzuheben, dass alle Ergebnisse lediglich eine Annäherung an das Thema widerspiegeln. Aufgrund des stark wachsenden E-Sports-Markts steigt die Dringlichkeit für die Erhebung einer validen Datengrundlage. Im Zuge dieser Fallstudie werden die Top 100 Streamer als Grundlage für die Berechnung der Zuschauerzahl genutzt. Dadurch werden die Umwelteinflüsse teilweise überschätzt, da streamende Spielende mit einer geringeren Zuschauerzahl nicht in die Betrachtung einbezogen werden. Andererseits ist aufgrund des hohen erwarteten Wachstums des Marktes mit einem steigenden Ressourcenbedarf durch E-Sports zu rechnen. Bei einer überschlägigen Hochrechnung zur Einordnung der Ergebnisse vor dem Hintergrund dieser steigenden Popularität wurde auf Basis von LeagueFeed (2023) und Tripathi (2020) angenommen, dass in Deutschland im Durchschnitt ca. 20.895 Personen gleichzeitig für eine Stunde *League of Legends* spielen. Das führt zu einem RMI von 1.446 kg pro Stunde Gaming von *League of Legends*, das hier als am weitesten verbreitetes E-Sports-Spiel als Grundlage für den Anwendungsfall gewählt wurde.

B.3.10 Fallstudie privater 3D-Druck

B.3.10.1 Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung

3D Drucker ermöglichen es, jedwede erdenkliche Form von einem CAD-Modell in einem haptischen Produkt zu verwirklichen. Beim Aufkommen der 3D Drucktechnologie wurde nicht weniger als eine Revolution der Industrie vorhergesagt, wobei die Anfänge der Technologie bis in die 1980er Jahre zurückgehen. Das im Heimgebrauch bekannte Fused Filament Fabrication Fertigungsverfahren (FFF) wurde 1988 entwickelt (Keppner *et al.*, 2018). Über 30 Jahre später ist der 3D Druck immer noch eine Nischentechnologie, um Produkte in hoher Stückzahl zu fertigen. In der Industrie konnte sich der 3D Druck nicht gegen die bewährten Fertigungsverfahren Urformen (z. B. Spritzgießen) und Umformen (Walzen, Pressen, Ziehen, Biegen) behaupten (Keppner *et al.*, 2018).

In der Heimanwendung werden Kunststoffprodukte zumeist aus lediglich einem einzigen Material, innerhalb mehrerer Stunden Druckzeit, erzeugt. Der Fokus der Heimanwendung liegt tendenziell eher im Freizeitbereich, anstatt eine Alternative zum industriegefertigten Produkt zu bieten. Von der Erfindung des 3D Druckes sind eine Vielzahl von Erwartungen entstanden. Die Verlagerung von Industriehallen in das eigene Zuhause ist nicht eingetroffen. Weltweit wird bis 2027 für den privaten 3D Druck-Markt dennoch ein durchschnittliches jährliches Wachstum von 16 % erwartet. Im privaten Bereich sind mehr und mehr kostenlose und quelloffene Open-Source 3D-Druckdesigns verfügbar und die Preise für 3D Drucker sinken (3D Printing Industry, 2023). Zusätzlich wird erwartet, dass die zunehmende Zusammenarbeit von wichtigen Akteuren*Akteurinnen der Branche und das wachsende Bewusstsein der Verbraucher*innen das Wachstum des Marktes weiter ankurbeln werden (Research & Markets, 2022). Deutschland ist dabei nicht nur für den industriellen sondern auch für den privaten 3D Druck einer der führenden Märkte weltweit³⁵.

B.3.10.2 Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie

Im Folgenden wird beschrieben, was ein gängiges 3D Druckermodell für die Heimanwendung an Ausstattung umfasst, um anschließend die Ressourcenintensität der Anwendung zu bewerten.

Grundlage für die Berechnung der Ressourcen- und Umweltimplikationen ist ein 3D Drucker für die Heimanwendung. Der Strombedarf während des Drucks soll 0,15 kW betragen, der Filamentbedarf 10 g pro Stunde.

Die Lebenszyklusbetrachtung umfasst die Rohstoffentnahme, Produktion der Komponenten, und die Nutzungsphase, welche 77 Stunden umfasst. Dies entspricht einem Verbrauch von einer Filamentspule. Die Filamentspule ist das aufgewickelte Material, welches zum 3D-Druck verwendet wird. Weitere Nutzungen wurden von der Betrachtung exkludiert, da nur unzureichend Informationen hinsichtlich der Anzahl der Druckvorgänge eines heimischen 3D Druckers während seines Lebenszyklus in der Recherche identifiziert werden konnten³⁶. Die Entsorgung der End- und Heimvernetzungsgeräte findet in der hier durchgeführten Betrachtung keine Berücksichtigung. Grund hierfür ist die große Unsicherheit, die generell mit dem Ende des Lebenszyklus solcher Geräte verbunden ist (siehe auch Kapitel B.2). Zudem ist auf Basis der

³⁵ <https://www.gtai.de/en/invest/industries/industrial-production/3d-printing-industry> (Stand: 20. Februar. 2023)

³⁶ Die einzelnen Komponenten des 3D Druckers weisen teils eine sehr unterschiedliche Nutzungsdauer auf, sodass auf die vereinfachende Annahme einer gleichen Nutzungsdauer verzichtet wurde und stattdessen der Fokus auf die Herstellung und Nutzung einer Filamentspule gelegt wurde. Dieser Betrachtungsfokus wird entsprechend in der Interpretation der Ergebnisse berücksichtigt und diskutiert.

verbauten Komponenten von einer dominanten Umweltwirkung der Herstellung und Nutzungsphase gegenüber der Entsorgung auszugehen.

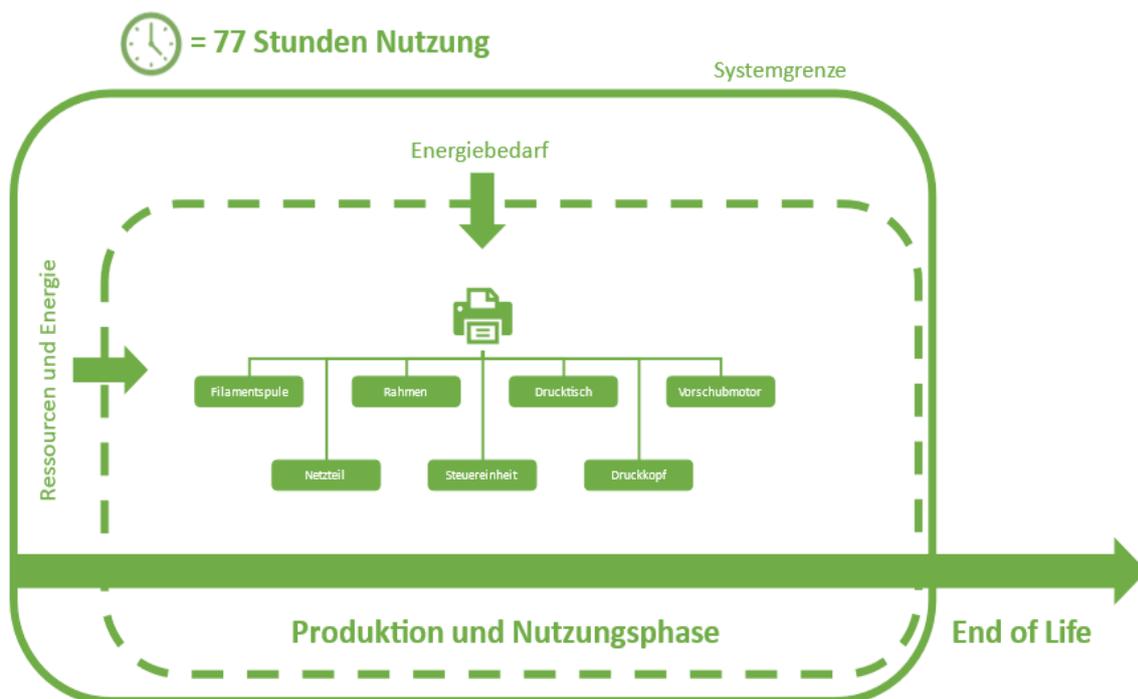
B.3.10.3 Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie

Für den Anwendungsfall des 3D Druckers wurde folgende Untersuchungseinheit gewählt:

Herstellung eines Desktop 3D Druckers für den Heimgebrauch und Nutzung einer Filamentspule zur Druckprodukterzeugung

Abbildung B-66 skizziert den betrachteten Untersuchungsrahmen. Im Folgenden wird genauer beschrieben, welche Komponenten und Rahmenbedingungen für die Fallstudie berücksichtigt wurden.

Abbildung B-66: Veranschaulichung der wesentlichen Rahmenbedingungen (Betrachtungsrahmen) für die Fallstudie „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“

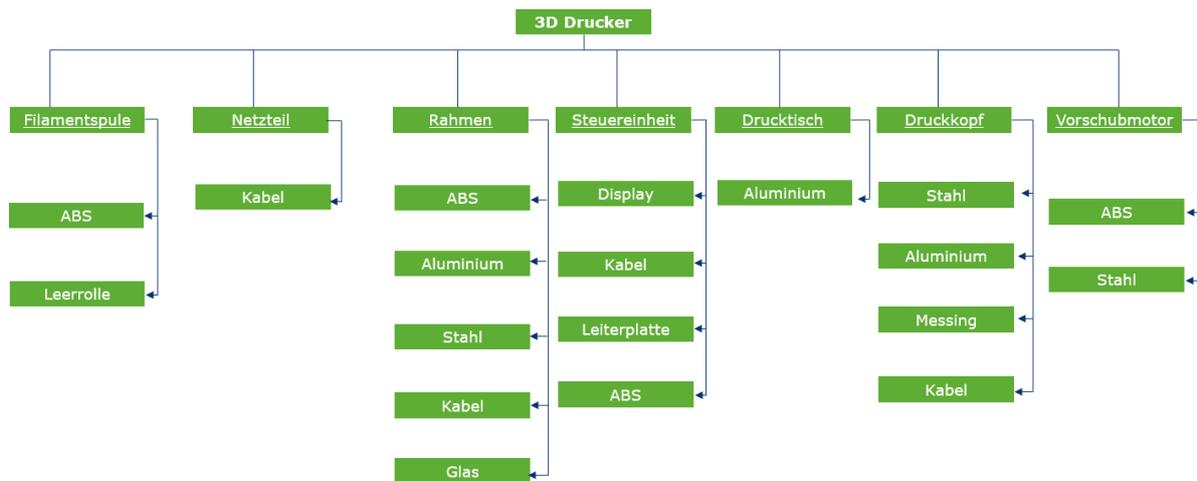


Die einzelnen Komponenten des 3D-Druckers weisen teils eine sehr unterschiedliche Nutzungsdauer auf. Daher bezieht sich die Ressourcenintensität der Herstellungsphase auf die einmalige Erzeugung aller Komponenten. Die Ressourcenintensität der Nutzungsphase bezieht sich auf einen Druckzyklus (= Verbrauch einer Filamentspule) von 77 Stunden Druckzeit. Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

B.3.10.3.1 Komponenten und betrachteter 3D Drucker

Die Einschätzung der Rohstoffintensität und weiterer Umweltwirkungen basiert auf einem beispielhaften Aufbau von Komponenten eines 3D Druckers für die Heimanwendung. Abbildung B-67 zeigt den generellen Zusammenhang der einzelnen Komponenten, aus denen sich der zu bilanzierende 3D Drucker aufbaut.

Abbildung B-67: Komponenten des 3D Druckers



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach Raab (2014)

Die jeweilige Material- und Produktzusammensetzung der angeführten Komponenten wird in Tabelle B-83 detailliert. Diese Mengenangaben bilden die Basis für die Abschätzung der Ressourcenintensität sowie weiterer Umweltwirkungen aus der Herstellungsphase.

Tabelle B-83: Spezifika des 3D Druckers je Bauteileinheit

Komponenten 3D Drucker	Spezifikationen	Quelle
Filamentspule		
ABS (Acrylnitril-Butadien-Styrol)	0,77 kg	(Flugwiese, 2022) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8 https://v38.ecoquery.ecoinvent.org/Details/UPR/997037ea-2935-4979-a1cc-66a2e4e3ee13/8b738ea0-f89e-4627-8679-433616064e82
Leerrolle (Polycarbonat)	0,23 kg 19,5 cm Außendurchmesser, 5,2 cm Innendurchmesser, 6,3 cm Breite	(Filamentworld, 2023) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Netzteil		
	1,47 kg	Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Kabel	0,1 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Raab, 2014) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8

Komponenten 3D Drucker	Spezifikationen	Quelle
Rahmen (Druckachsen)		
PC (Polycarbonat)	0,2 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Printing It 3D, 2023) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Aluminium	1 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Printing It 3D, 2023) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Stahl	1 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Printing It 3D, 2023) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Kabel	0,1 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Raab, 2014) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Glas	0,5 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Printing It 3D, 2023) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Steuereinheit		
Display	2 Zoll beide Diagonalen (Annahme)	(Solectro, 2020) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Kabel	0,1 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Raab, 2014) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Leiterplatte	0,004935 kg (15 cm ² Annahme)	(Raab, 2014) https://www.leiton.de/leiton-tools-gewichtsberechnung.html (Stand: 10. Januar 2023) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Kunststoffgehäuse (Polycarbonat)	0,1 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Raab, 2014) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Drucktisch		
Aluminium	22 cm x 22 cm x 1 cm 484 cm ³ 1,3068 kg (2,7 g/cm ³)	(Solectro, 2020) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Druckkopf		
Stahl	0,05 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Mensley & O'Connell, 2021) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Aluminium	0,05 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Mensley & O'Connell, 2021) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8

Komponenten 3D Drucker	Spezifikationen	Quelle
Messing	0,02 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Mensley & O’Connell, 2021) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Kabel	0,02 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Mensley & O’Connell, 2021) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Vorschubmotor		
PC (Polycarbonat)	0,05 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Mensley & O’Connell, 2021) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8
Stahl	0,1 kg (Annahme, keine Aufteilung möglich)	(Mensley & O’Connell, 2021) Eigene Berechnungen auf Basis von Ecoinvent v. 3.8

B.3.10.3.2 Rahmenbedingungen der Nutzungsphase

Die Nutzungsphase der betrachteten Fallstudie bezieht sich auf den Verbrauch einer Filamentrolle, auf welcher 0,77 kg Filament gewickelt sind. Das Filament ist das Verbrauchsmaterial, aus welchem das Druckerzeugnis Schicht für Schicht aufgetragen wird. Die Herstellung des Filaments selbst ist, wie in Tabelle 85 aufgeführt, bereits der Herstellungsphase zugeordnet. Der Betrieb des Druckers benötigt Strom zur Erhitzung und zum Auftragen des Kunststoffes. Pro Stunde wird ein Bedarf von 0,15 kWh angenommen (Punzet, 2022). Innerhalb einer Stunde trägt der Drucker 10 g flüssiges Filament auf dem Drucktisch auf. Auf dem Drucktisch entsteht das zu druckende Produkt (Tablepott, 2018). Aus diesen Parametern folgt ein Strombedarf von 11,55 kWh für eine Druckzeit von 77 h, um 0,77 kg Filament zu verarbeiten. Eine Allokation der Herstellung auf die gesamte Nutzungsphase ist für 3D Drucker nicht exakt festzulegen. Bauteile, die Verschleißerscheinungen aufweisen, hiervon ist insbesondere der Druckkopf betroffen, können ohne Einfluss auf die anderen Komponenten ausgetauscht werden. Das Lebenszyklusende kann daher nicht eindeutig definiert werden. Bauteile wie der Rahmen sind nicht von Verschleiß betroffen und lassen somit keinerlei Rückschlüsse auf das Lebenszyklusende eines 3D Druckers zu. Die Nutzungsphase wurde für die Analyse daher so gewählt, dass sie sich beliebig oft skalieren lässt. Ist die Filamentspule aufgebraucht, kann nicht weiter gedruckt werden, dies kann als ein einzelner Druckzyklus betrachtet werden. Im Rahmen der Fallstudie wird die einmalige Herstellung aller Komponenten sowie ein Druckzyklus betrachtet.

B.3.10.4 Ergebnisse zur Ressourcenintensität

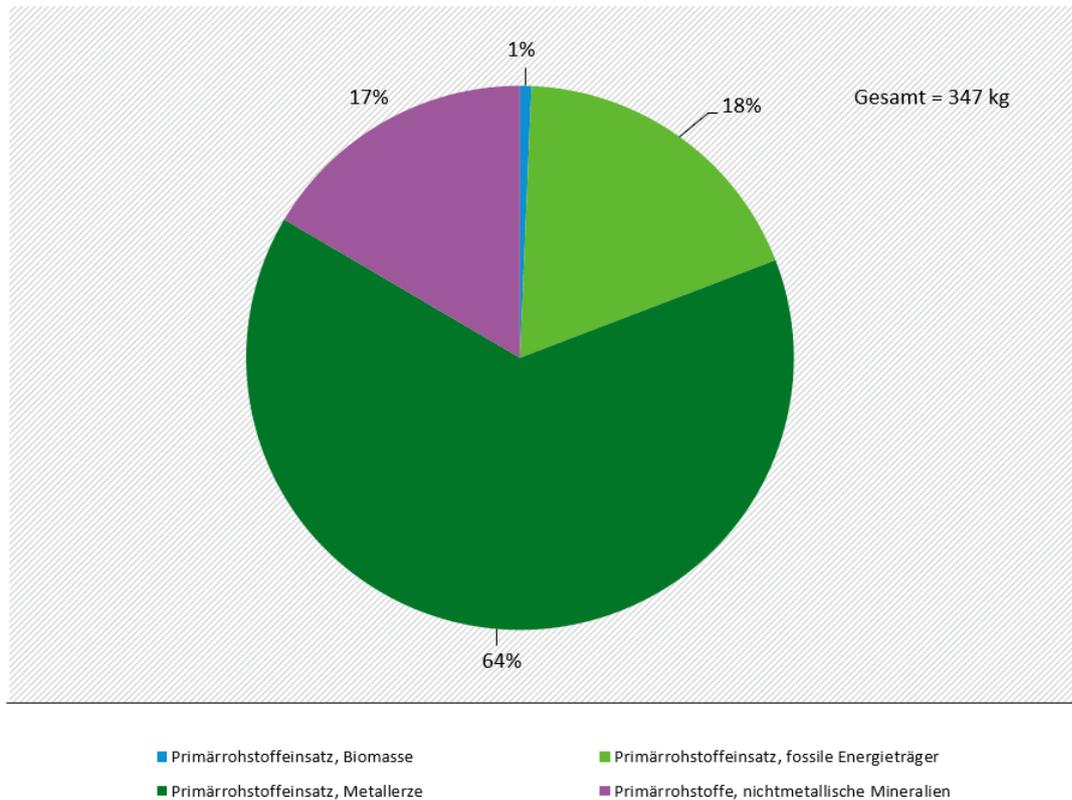
B.3.10.4.1 Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme

B.3.10.4.1.1 Herstellungsphase

Der durch die Modellierung **errechnete Gesamtprimärmaterialaufwand beläuft sich auf 429,6 kg**. Der Primärrohstoffbedarf (auf Basis der in genannten Elementarflüsse) für die

Herstellung des 3D-Druckers beläuft sich auf insgesamt **347,4 kg** (vgl. Abbildung B-68). Davon sind 97% (336,5 kg, vgl. Abbildung B-69) der RMI von fossilen und mineralischen Rohstoffen. Abbildung B-68 zeigt den Primärrohstoffeinsatz nach Rohstoffart in der Herstellungsphase.

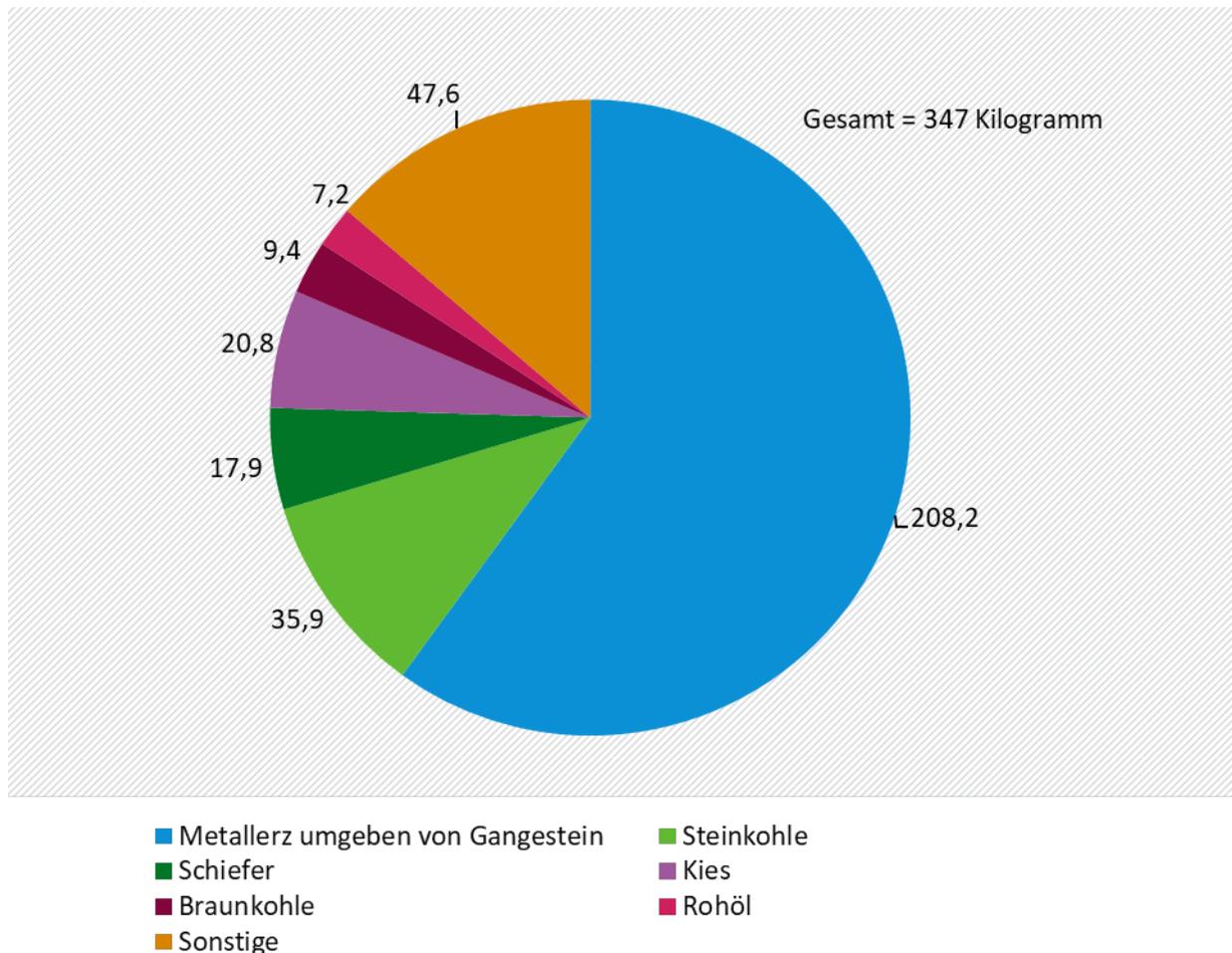
Abbildung B-68: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Herstellung eines 3D Druckers zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Prozent



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

Die Rohstoffintensität der Herstellungsphase ist rein massentechnisch betrachtet durch die Entnahme von Ganggestein geprägt, wie Abbildung B-69 zeigt. Es entspricht knapp dem Sechsfachen gegenüber dem mengenmäßig nächstwichtigsten Rohstoff Steinkohle (60 % bzw. 10,3 %). Darauf folgen Kies (6,0 %), Schiefer (5,2 %), Braunkohle (2,7 %) und Rohöl (2,1 %); sonstige Rohstoffe machen zusammengenommen noch 13,7 % des Rohstoffbedarfs aus.

Abbildung B-69: 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 Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

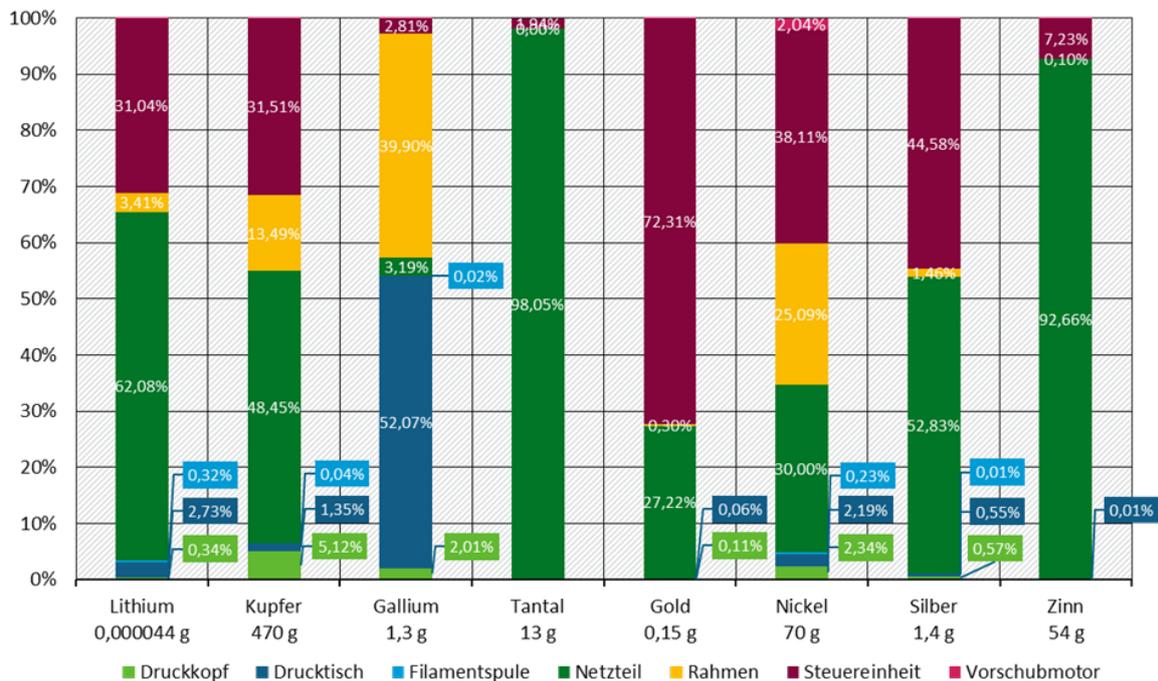
Bei Betrachtung ausgewählter digitalisierungsrelevanter Rohstoffe (vgl. Abbildung B-70) des 3D Druckers fällt auf, dass die Netzteil-Komponente gegenüber den weiteren Komponenten des 3D Druckers den höchsten prozentualen Anteil auf sich vereint. Dies kann zum einen mit dem hohen Gewicht der Komponente erklärt werden (rund 20% Gewichtsanteil bezogen auf das Gesamtgewicht des Druckers), jedoch auch mit den spezifischen Bestandteilen des Netzteils. Tantal ist ein wichtiger Bestandteil von Kondensatoren, welche im Netzteil verbaut sind. Die Leiterplatte der Steuereinheit besitzt ebenfalls Kondensatoren. Das geringe angenommene Gewicht der Leiterplatte führt jedoch dazu, dass lediglich knapp 2 % des Tantalbedarfs des 3D Druckers auf die Leiterplatte entfallen und die restlichen 98 % vollständig dem Netzteil zugerechnet werden. Auch beim Bedarf von Zinn und Lithium hat die Netzteilkomponente einen mindestens doppelt so hohen Prozentanteil wie die nächstgrößte Komponente.

Gold wird zu ca. 72 % des Gesamtbedarfes für die Steuereinheit des 3D Druckers eingesetzt, obwohl die Steuereinheit lediglich ca. 2,6 % des Systemgesamtwichtes ausmacht. Der Goldbedarf kann auf die Beschichtung der Leiterplatte zum Korrosionsschutz zurückgeführt werden.

Gallium hat besonders dort einen hohen prozentualen Anteil, wo Aluminium verbaut ist, da Gallium in Aluminiumen gebunden vorkommt. Dies trifft auf den Drucktisch und den Rahmen zu. Beide bestehen zu mindestens 1 kg aus Aluminium, das spiegelt sich im Galliumbedarf wider.

Bezogen auf die Entnahmemenge digitalisierungsrelevanter Ressourcen nimmt Kupfer die wichtigste Rolle ein. Zur Herstellung des hier skizzierten 3D Druckers wurde 0,47 kg Kupfer benötigt. Bezogen auf die jährliche Gesamtentnahme von Kupfer macht dies jedoch lediglich 0,0000000099% aus, nur der Lithiumanteil fällt noch unkritischer aus. Unter den digitalisierungsrelevanten Ressourcen ist der Bedarf für den 3D Drucker im Verhältnis zur jährlichen Gesamtentnahme der Rohstoffe für Tantal am kritischsten (0,00000068%). Würde jede*r Deutsche einen gleichartigen 3D Drucker erwerben, würde dies 57 % des jährlich verfügbaren Tantals für sich beanspruchen.

Abbildung B-70: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Gramm und Prozent



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

Tabelle B-84: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Gramm - Tabelle zu Abbildung B-70

Rohstoffe	Gerät	[g]
Lithium	Druckkopf	1,5E-07
Lithium	Drucktisch	1,19E-06
Lithium	Filamentspule	1,38E-07
Lithium	Netzteil	2,7E-05
Lithium	Rahmen	1,49E-06
Lithium	Steuereinheit	1,35E-05
Lithium	Vorschubmotor	3,37E-08

Rohstoffe	Gerät	[g]
Kupfer	Druckkopf	23,93
Kupfer	Drucktisch	6,30
Kupfer	Filamentspule	0,209853
Kupfer	Netzteil	226,578214
Kupfer	Rahmen	63,100320
Kupfer	Steuereinheit	147,355102
Kupfer	Vorschubmotor	0,148756
Gallium	Druckkopf	0,026869
Gallium	Drucktisch	0,697426
Gallium	Filamentspule	0,000247
Gallium	Netzteil	0,042731
Gallium	Rahmen	0,534410
Gallium	Steuereinheit	0,037617
Gallium	Vorschubmotor	0,000032
Tantal	Druckkopf	0,000014
Tantal	Drucktisch	0,000125
Tantal	Filamentspule	0,000019
Tantal	Netzteil	12,391892
Tantal	Rahmen	0,000157
Tantal	Steuereinheit	0,245595
Tantal	Vorschubmotor	0,000002
Gold	Druckkopf	0,000154
Gold	Drucktisch	0,000086
Gold	Filamentspule	0,000005
Gold	Netzteil	0,039651
Gold	Rahmen	0,000431
Gold	Steuereinheit	0,105318
Gold	Vorschubmotor	0,000001
Nickel	Druckkopf	1,631143
Nickel	Drucktisch	1,524479
Nickel	Filamentspule	0,163405
Nickel	Netzteil	20,897776
Nickel	Rahmen	17,476432

Rohstoffe	Gerät	[g]
Nickel	Steuereinheit	26,551926
Nickel	Vorschubmotor	1,421709
Silber	Druckkopf	0,007685
Silber	Drucktisch	0,007399
Silber	Filamentspule	0,000117
Silber	Netzteil	0,716251
Silber	Rahmen	0,019806
Silber	Steuereinheit	0,604400
Silber	Vorschubmotor	0,000044
Zinn	Druckkopf	0,000632
Zinn	Drucktisch	0,005836
Zinn	Filamentspule	0,000353
Zinn	Netzteil	50,197743
Zinn	Rahmen	0,054768
Zinn	Steuereinheit	3,915361
Zinn	Vorschubmotor	0,000149

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

B.3.10.4.1.2 Nutzungsphase

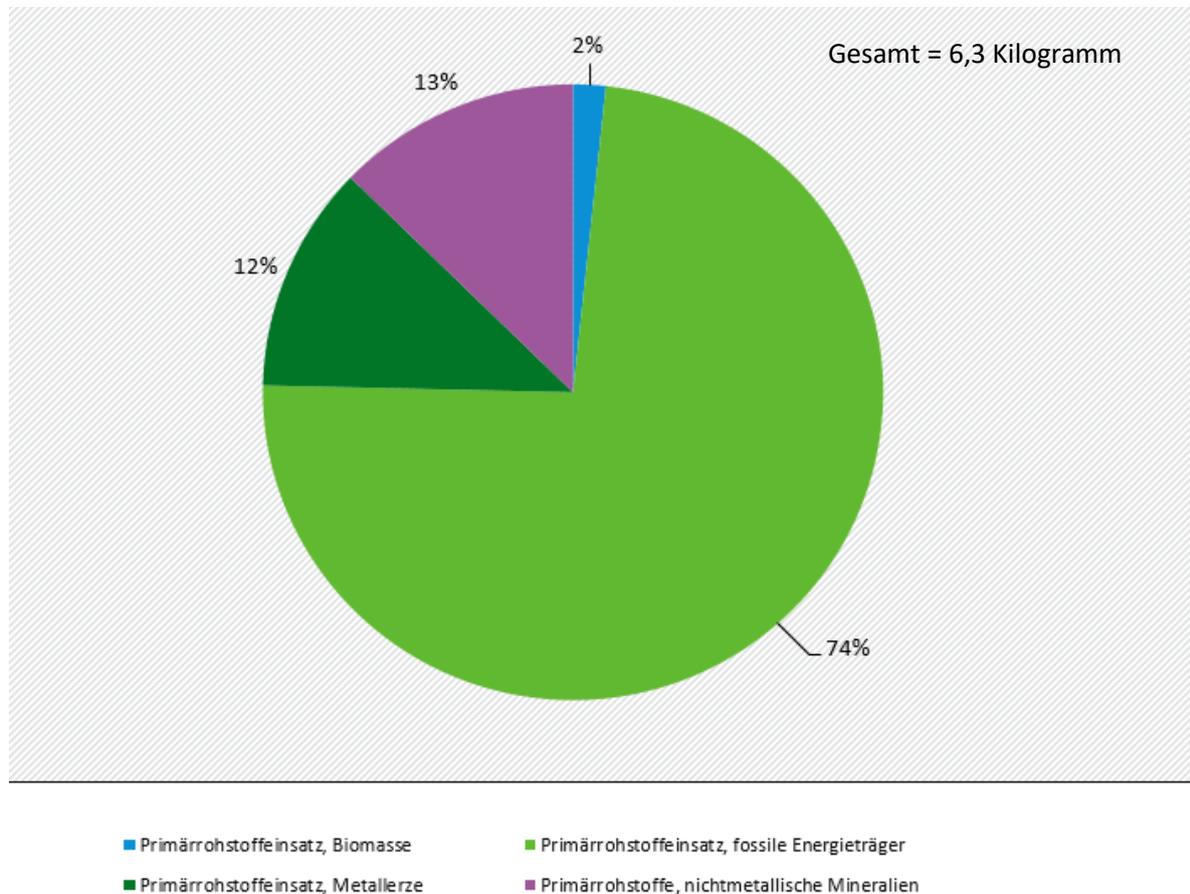
Die betrachtete Nutzung des aufgezeigten 3D Druckers bedingt einen Primärrohstoffeinsatz von 6,3 kg, welcher durch den Stromverbrauch während des Druckvorgangs bedingt wird. Der durch die Modellierung errechnete Gesamtprimärmaterialaufwand beläuft sich auf 8,3 kg. Ein Vergleich zwischen Herstellung und Nutzung ist nur bedingt möglich, da für 3D Drucker keine feste Lebensdauer definiert werden kann, da sich prinzipiell Verschleißteile fortwährend austauschen lassen. Alle Verbrauchsmaterialien und Verschleißteile nach einmaliger Herstellung der 3D Drucker-Komponenten können der Nutzungsphase zugerechnet werden. Dies würde bedingen, dass der Ressourcenverbrauch der Nutzungsphase fortlaufend wächst und die Herstellung ab einem bestimmten Punkt überholt. Die folgende Gegenüberstellung der Herstellung und Nutzung ist deshalb explizit auf die untersuchte Nutzphase von einer einzelnen Filamentspule zu verstehen.

Der Druck eines Produkts mit einem 3D Drucker für Heimanwendungszwecke nimmt mehrere Stunden in Anspruch. Die in dieser Fallstudie gewählte Untersuchungseinheit reicht je nach Druckteil etwa für zehn Produkte bzw. Druckvorgänge aus. Dieser Aussage unterliegt die Annahme eines Produktgewichtes von etwa 70 g und sieben Stunden Druckzeit.

Abbildung B-71 zeigt die Anteile der verschiedenen Rohstoffgruppen am Gesamtbedarf. Während die Anteile des Primärrohstoffeinsatzes der Herstellung vorrangig aus Metallerzen stammen, ist die Nutzungsphase vorrangig (74 %) vom Bedarf an fossilen Energieträgern geprägt, was aufgrund des verwendeten deutschen Strommixes zu erwarten war. Massenmäßig an erster Stelle liegt die Braunkohle, diese macht mehr als das Dreifache gegenüber dem

nächstwichtigsten Primärrohstoff Steinkohle aus. Hierin zeigt sich die weiterhin wichtige Rolle der Braunkohle im deutschen Strommix. Ein Rückgang dieses Primärrohstoffeinsatzes ist aufgrund der Energiewende zukünftig zu erwarten.

Abbildung B-71: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Prozent*



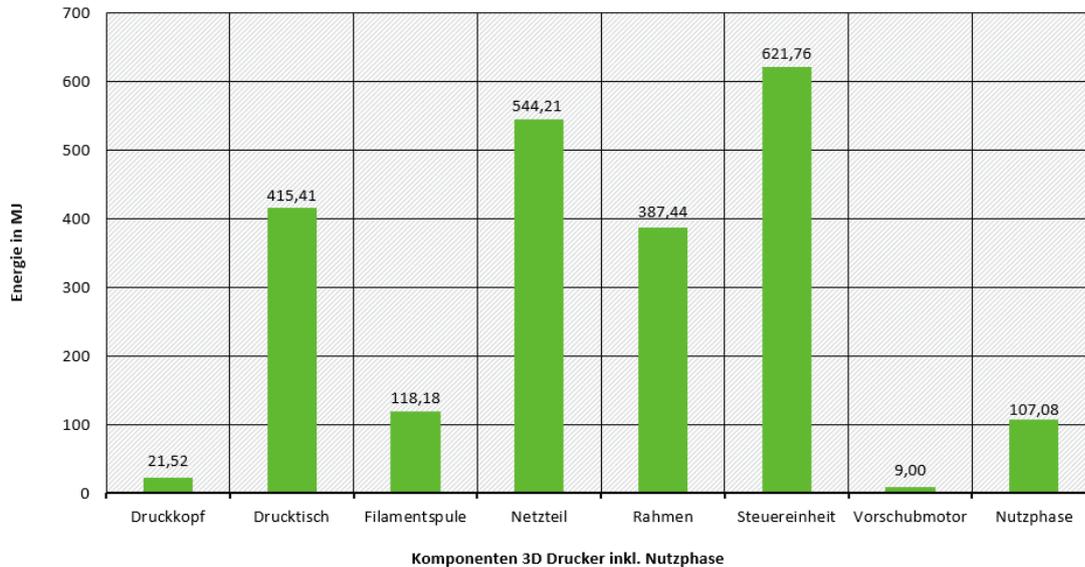
* Die Abbildung zeigt gerundete Zahlen

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

B.3.10.4.2 Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Fußabdruck

Der KEA dient zur Bemessung des energetischen Aufwands des 3D Druckers. Der kumulierte Energieaufwand beträgt 2.225 MJ. Die einzelnen Beiträge zum kumulierten Energieaufwand werden pro Komponente in Abbildung B-72 dargestellt. Unterschieden in Herstellung und Nutzungsphase beträgt der Energieaufwand der Herstellung 2.118 MJ (95,2 %) und der Energieaufwand der Nutzung 107 MJ (4,8 %).

Abbildung B-72: Kumulierter Energieaufwand der Herstellung und Nutzungsphase (Strombedarf während der Verwendung einer Filamentspule) zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in MJ

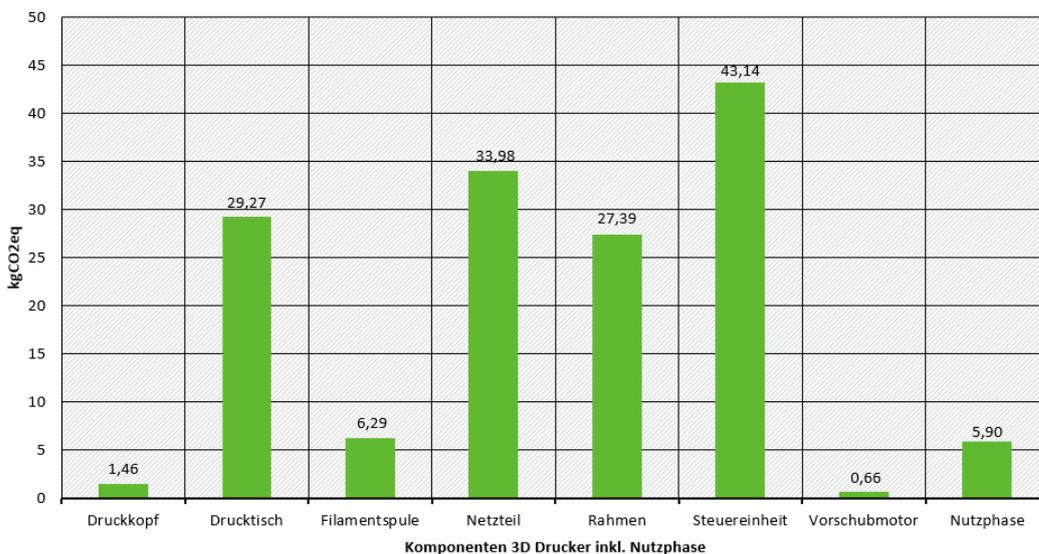


Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023

Abbildung B-73 bildet die jeweiligen THG-Beiträge der einzelnen Komponenten sowie der Nutzungsphase ab. In Summe beträgt das THG-Potenzial 148 kg, wovon 142 kg (96 %) auf die Herstellung entfallen und 5,9 kg (4 %) auf die Emissionen der Stromnutzung während der Druckphase. 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 Abnutzungserscheinungen aufweisen, die einen Austausch unabdingbar machen (Klauser, 2019).

Abbildung B-73: Treibhausgasemissionen der Herstellung und Nutzungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in kg CO₂-Äq.

Kumuliertes Treibhausgaspotential



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

B.3.10.4.3 Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial

Auch beim Wasserfußabdruck (WDP) und dem Landnutzungspotenzial (LOP) ist ein Überhang der Herstellung gegenüber der betrachteten Nutzungsphase zu erkennen. Der WDP beträgt in Summe **1,06 m³**, aufgeteilt in 1 m³ Herstellung und 0,06 m³ Nutzungsphase.

Beim LOP zeigt sich das gleiche Verhältnis, in Summe **9,08 m²a**, davon 8,8 m²a Herstellung und 0,28 m²a während der Nutzungsphase.

Dieser eindeutige Überhang der Herstellung wird nochmals bei Hochskalierung der Nutzungsphase auf ein gleiches Niveau wie die Herstellung deutlich. Um einen ebenso hohen WDP und LOP zu verursachen, muss die Nutzungsphase mehr als verdreißigfach werden. Das entspricht einem Druckprozess von 100 Tagen. Damit wäre bereits die optimistische Lebensdauer des Druckkopfes überschritten und die Beschaffung von Ersatzteilen notwendig (Klauser, 2019).

B.3.10.4.4 Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial

Weniger Transport und Materialbedarf sind die wesentlichen Vorteile der 3D Drucktechnologie, die den Gegenargumenten hinsichtlich des Zeit- und Qualitätsfaktors entgegenstehen. Der Materialbedarf wird gesenkt, da durch das schichtweise Auftragen des Filaments der Kunststoff in den meisten Fällen ausschließlich zur Produktfertigung eingesetzt wird. Ausnahmen ergeben sich, wenn Stützkonstruktionen beim Druck benötigt werden, die nach Abschluss des Druckprozesses vom fertigen Produkt weggebrochen werden. Aufgrund der teils filigranen Bauteile und dem zeitintensiven Druckprozess muss das zu fertigende Bauteil währenddessen seine Form behalten, wodurch der zusätzliche Druck einer Stützkonstruktion von Nöten sein kann. Beim Spritzgussverfahren kommt es jedoch regelmäßig zu Verschnitt, wodurch der 3D Druck durchaus als materialsparender angesehen werden kann.

Logistik und Transport können durch die 3D Druckfertigung positiv beeinflusst werden, indem weniger auf Lager produziert wird und stattdessen gedruckt wird, wenn Bedarf besteht. Ein kontinuierlicher Betrieb der Produktionsanlagen ist somit nicht notwendig. Allerdings muss zum Druck der Heimanwendung das Druckmaterial in Form des Filaments ebenfalls geliefert werden, eine Einsparung des Transportweges kann hiermit nicht argumentiert werden (Keppner *et al.*, 2018).

Eine Vielzahl an Produkten, die in der Heimanwendung gefertigt werden, haben aufgrund ihrer Beschränkung auf ein Material nicht die notwendigen Eigenschaften, um mit den komplexeren Produkten der industriellen Fertigung zu konkurrieren. Daher werden neben dekorativen Produkten wie Kunststoffvasen häufig Figuren in der Heimanwendung hergestellt.

Weiterhin steht der hohe Energiebedarf von 3D gedruckten Produkten in der Kritik (Keppner *et al.*, 2018). Angesichts von mehreren Stunden Druckzeit, um ein einzelnes Kunststoffprodukt herzustellen, ist dieses Argument durchaus berechtigt, liegt die Produktionszeit für ein Kunststoffprodukt im Spritzgussverfahren doch bei wenigen Sekunden. Ist die Produktionsstraße einmal errichtet, können so massenweise gleichartige Produkte in kürzester Zeit produziert werden.

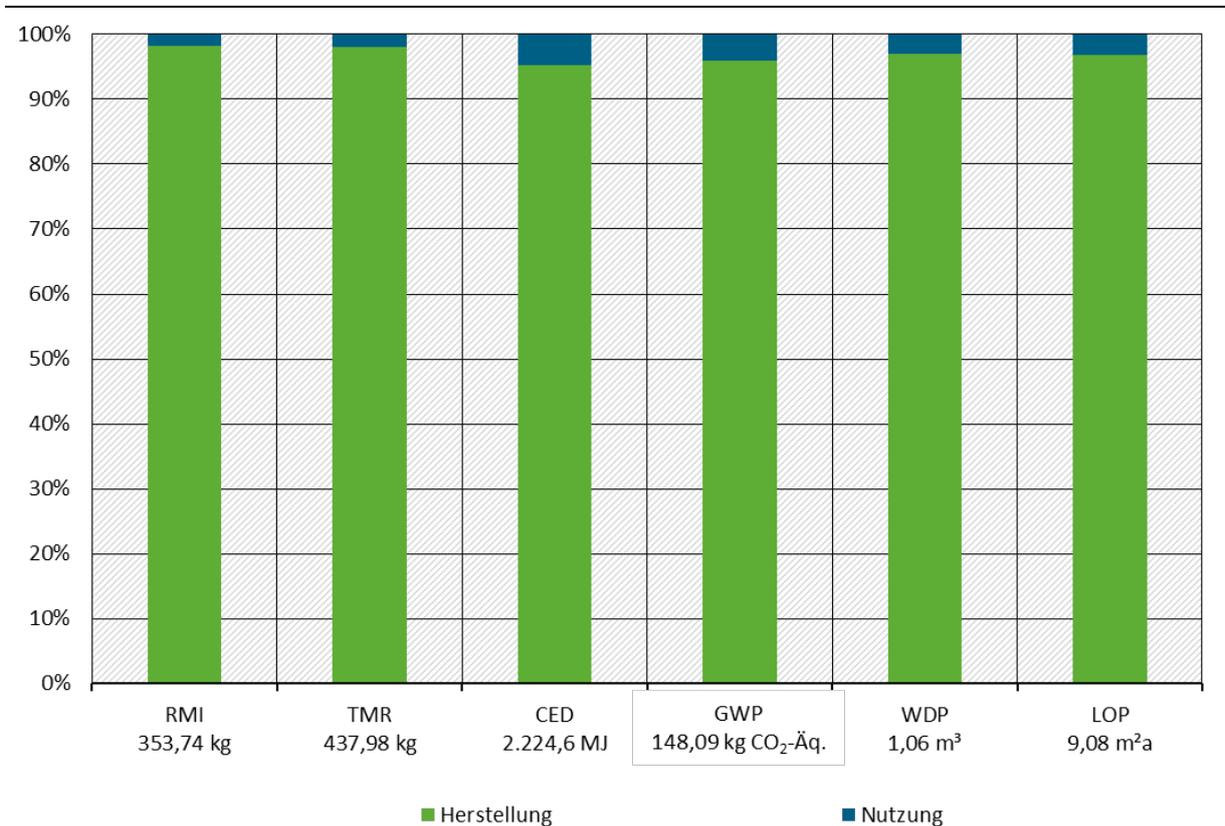
Für die Fallstudienbetrachtung einer 3D Druckeranwendung für den Heimgebrauch konnte kein Umweltentlastungspotenzial ermittelt werden. Zwar sind durchaus positive Errungenschaften mit der Entwicklung des 3D Druckes entstanden. Diese betreffen aber nicht die Heimanwendung, sondern die Individualisierung spezifischer Produkte beispielsweise in der Medizintechnik, z. B. die Einzelanfertigung für Prothesen. Das klassische Produkt für 3D Drucker

in der Heimanwendung sind Dekorationsartikel, deren Nutzen nicht über das persönliche Vergnügen und die Anwendung der 3D Drucktechnik hinausgeht (Keppner *et al.*, 2018).

B.3.10.5 Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie

Abbildung B-74 zeigt das Verhältnis zwischen Herstellung und Nutzungsphase nach dem Verbrauch einer Filamentspule mit 0,77 kg Druckmaterial. Ausnahmslos jede der sechs Umweltwirkkategorien zeigt einen eindeutigen Überhang der Herstellung gegenüber der Nutzung der Druckerkomponenten. Der Break-Even-Point zwischen der Herstellung und Nutzung wird nach 35 zugekauften Filamentspulen erreicht. Das ist gleichzusetzen mit ca. 2.700 Druckstunden bzw. 112 Tagen durchgehendem Druckprozess. Während dieser Zeit wird ein zweimaliger Austausch des Druckkopfes und ggf. weiterer Komponenten erwartet, was wiederum den Ressourcenbedarf für die Herstellung der Komponenten erhöht.

Abbildung B-74: Aufteilung der Anteile zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase für die betrachteten Ressourcenintensitäts- und Umweltwirkkategorien zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ in Prozent*



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

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

Tabelle B-85: Aufteilung der Anteile zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase für die betrachteten Ressourcenintensitäts- und Umweltwirkkategorien zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“ – Tabelle zu Abbildung B-74*

Indikator	Herstellung	Nutzung
RMI	347,4 kg	6,3 kg
TMR	429,6 kg	8,3 kg
CED	2.118 MJ	107 MJ
GWP	142 kg CO ₂ -Äq	5,9 kg CO ₂ -Äq
WDP	1 m ³	0,1 m ³
LOP	8,8 m ² a	0,3 m ² a

* Die Tabelle zeigt gerundete Zahlen

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

Im Zusammenhang mit digitalen Anwendungen wird häufig das Beispiel der 3D Drucktechnologie angeführt. Um dem Privatanwenderbezug der Fallstudien insgesamt gerecht zu werden, untersucht diese Fallstudie einen beispielhaften Aufbau eines 3D Druckers für die Heimanwendung hinsichtlich seiner Ressourcenintensität. Die einzelnen Komponenten basieren auf mehreren Materiallisten, die sich auf webbasierter Recherche stützen. Unsicherheiten bleiben bezüglich der Vollständigkeit der Materialien sowie die Nichtberücksichtigung des Zusammenbaus, wenn einzelne Materialien eine Komponente ergeben. Teilweise konnten Komponenten als fertiges Produkt aus der LCA-Datenbank entnommen werden. Rohstoffe und Emissionsfaktoren zu den einzelnen Komponenten stammen aus der Datenbank von Ecoinvent 3.8.

Der Ressourcenbedarf an materiellen Rohstoffen ist in Bezug auf benötigte Displays und Leiterplatten mit anderen elektronischen Alltagsgegenständen wie Mobiltelefonen, Fernsehgeräten und Laptops vergleichbar. Aluminium, Stahl und Kunststoffe sind im Alltag in unterschiedlichsten Gegenständen verarbeitet und daher nicht kritisch hervorzuheben. Eine explizite Verknappung durch 3D Druckgeräte in Privathaushalten lässt sich aus den Ergebnissen nicht ableiten. Lediglich der Tantalbedarf durch den Verbau von Netzteilen und Leiterplatten würde sich unter Annahme, dass jede*r deutsche Einwohner*in innerhalb eines Jahres einen 3D Drucker erwerben würde, durch eine Verknappung bemerkbar machen. Dies ist ein unwahrscheinliches Szenario, wenn der derzeitige Nutzen von 3D Druckern für den Heimgebrauch weiterhin primär dem Spaß an der Technik einer Gruppe von Nischenanwender*innen gilt.

B.3.11 Fallstudie E-Health: Smartwatch für digitale Fitness und Gesundheit

B.3.11.1 Gegenwärtige und zukünftige Bedeutung

Digitale Technologien sind mittlerweile nicht mehr aus dem alltäglichen Leben wegzudenken und breiten sich weiterhin in allen Lebensbereichen aus. So kommen digitale Technologien auch immer mehr im Gesundheits-, Fitness und *Wellbeing*-Bereich zum Einsatz (Hollasch & Sahl, 2021). Hier werden besonders Smartwatches nachgefragt (Hollasch & Sahl, 2021), die mit dem Smartphone verbunden werden können und neben der Uhrzeit verschiedene andere Informationen vermitteln und Daten wie Schrittzahl oder Puls erfassen (Bendel, 2021). Im

Jahr 2019 trugen bereits 36 % der Deutschen eine Smartwatch (Tenzer, 2022). Allein von 2019 auf 2020 ist der Anteil an deutschen Smartwatch-Tragenden um 9 % gestiegen (Hollasch & Sahl, 2021). Die German Watch Studie nennt als Grund für den rasanten Anstieg die geschlossenen Fitnessstudios und den Wegfall von Sportgruppen, um die Covid-19 Pandemie einzudämmen (Hollasch & Sahl, 2021). Die meisten der 500 Befragten gaben an, die Uhr zum Messen ihres Fitnesslevels (26 %) und ihrer Gesundheit (24 %) zu nutzen, gefolgt von dem Empfang von Textnachrichten und Anrufen (20 %). Für 2023 wird der Branche ein Umsatz von 1.253 Mio. Euro prognostiziert (Hollasch & Sahl, 2021). Der Markt wird derzeit von Apple (40 %) und Samsung (30 %) beherrscht (BVDW, 2016).

Trotz des starken Wachstums des Marktes und der Vielzahl an Nutzenden wurden bisher kaum Ökobilanzierungen auf diesem Themengebiet durchgeführt. Lediglich Apple veröffentlicht zu jeder Apple Watch-Serie einen produktbezogenen Umweltfußabdruck (Apple, 2018; Apple 2019; Apple, 2020; Apple, 2021; Apple, 2022). Des Weiteren wurde eine Analyse vom Green Electronics Council durchgeführt, in der die Umwelt- und sozialen Einflüsse durch Smartwatches untersucht wurden (Green Electronics Council, 2020). Somit ist es von hoher Relevanz eine Untersuchung der Ressourcenintensität von Smartwatches durchzuführen.

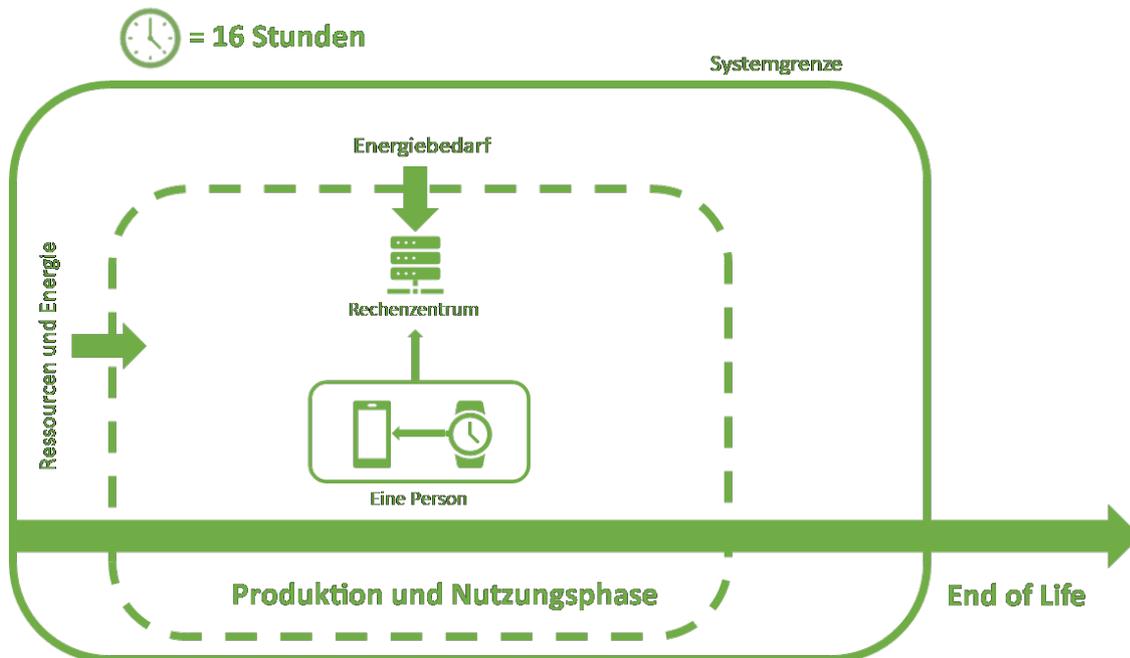
B.3.11.2 Betrachtungsgrenzen und Systematik der Fallstudie

Aufgrund der starken Marktdominanz (40 % der Nutzenden tragen eine Apple Watch (BVDW, 2016)) und der verfügbaren Daten wird die Apple Watch beispielhaft für diese Fallstudie herangezogen. Um die Apple Watch nutzen zu können, müssen die Nutzer*innen im Besitz eines Smartphones sein und die für die Nutzung notwendigen Apps zu Kopplung der Uhr installiert haben. Insgesamt werden in diesem Fall drei verschiedene Apps für Kopplung, Aktivitäts- und Gesundheitsanalysen benötigt. Es werden bei der Nutzung der Apple Watch Daten erzeugt und empfangen. Die Smartwatch überträgt die Daten über Bluetooth auf das Smartphone. Das Smartphone wiederum speichert die Daten über den Fitness- und Gesundheitszustand in der Cloud (Abbildung B-75) (Aroganam *et al.*, 2019). Diese Kombination des Datentransfers wird für diese Fallstudie zugrunde gelegt. Außerdem wird davon ausgegangen, dass die Apple Watch 16 Stunden am Tag genutzt und nachts geladen wird. Diese Annahmen basieren auf der Statistik vom BVDW (2016) zur Nutzung von Smartwatches in Deutschland, bei der erhoben wurde, dass 79 % der 504 Befragten ihre Uhr nachts laden (BVDW, 2016). Außerdem beträgt die Akkulaufzeit einer Smartwatch, wie die der Apple Watch Series 4, maximal 18 Stunden. Wie Eingangs beschrieben, wird die Applewatch von der Mehrheit zum Messen von Gesundheits- und Fitnessdaten genutzt (Hollasch & Sahl, 2021). Je nach Nutzung der Anwendungen kann die Laufzeit zwischen einer und 18 Stunden am Tag betragen. Die WHO empfiehlt 21 bis 43 Minuten Sport pro Tag also im Schnitt ca. eine halbe Stunde pro Tag (Techniker Krankenkasse, 2022). Machen die Nutzenden eine halbe Stunde am Tag Sport (z. B. Laufen gehen mit GPS Funktion), verringert das die Akkulaufzeit um ca. eine Stunde. Wird dabei noch Musik gehört, verringert sich die Laufzeit um ca. eine weitere Stunde. Bei einer halben Stunde Fitnesstraining mit Audio-Stream wird die Laufzeit um zwei Stunden verringert. Aus diesem Grund wird eine maximale Akkulaufzeit von 16 h angenommen (Kägler, 2018). Neben der Hardware ist zudem das Übertragungsnetz und das Rechenzentrum für die Nutzung der Smartwatch relevant. Wie zuvor erläutert, werden die Rechenzentren in Form ihres Energieaufwands für die Datenübertragung in die Betrachtung einbezogen. Der Stromverbrauch der Server- und Übertragungsnetznutzung wird über einen aus der Fachliteratur hergeleiteten Berechnungsschlüssel für die Nutzungsphase in das Modell mit integriert (Zimmermann *et al.*, 2020).

Die Entsorgung der End- und Heimvernetzungsgeräte findet in der hier durchgeführten Betrachtung keine Berücksichtigung. Grund hierfür ist die große Unsicherheit, die generell mit

dem Ende des Lebenszyklus solcher Geräte verbunden ist (siehe Kapitel B.2). Zudem ist auf Basis bisheriger Studien von einer dominanten Umweltwirkung der Produktion und Nutzungsphase gegenüber der Entsorgung auszugehen (Prakash *et al.*, 2012; Joshi *et al.*, 2021). Somit ergibt sich das in Abbildung B-75 dargestellte Produktsystem.

Abbildung B-75: 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.

B.3.11.3 Untersuchungseinheit und Sachbilanzdaten der Fallstudie

Für den Anwendungsfall wurde folgende Untersuchungseinheit gewählt:

Nutzung einer Smartwatch in Kombination mit einem Smartphone für 16 h

Aufgrund der Multifunktionalität einer Smartwatch (Telefonie, Kartenzahlung, Fitness- und Gesundheitsanalysen etc.) bietet sich ein breites Spektrum an Anwendungsfällen der Nutzenden. Auch die tägliche Nutzung und das Ladeverhalten variiert unter den Nutzenden. Die verwendete Untersuchungseinheit basiert auf oben beschriebenen Literaturdaten und Annahmen.

Da die Smartwatch zwar in Kombination mit einem Smartphone genutzt wird, das Smartphone aber primär im Tagesverlauf zu anderen Zwecken genutzt wird, wird geschätzt, dass das Smartphone innerhalb der 16 h für eine halbe Stunde zur Analyse der Gesundheits- und Fitnessdaten genutzt wird.

B.3.11.3.1 Sachbilanz der Smartwatch

Um die Smartwatch im Zuge der Fallstudie abbilden zu können, wurde anhand von einer Literaturrecherche eine Sachbilanz erstellt. Die detailliertesten und umfassendsten Informationen konnten in den Umweltreporten von Apple (Apple, 2018) und in dem Bericht vom Green Electronic Council und EPEAT (Green Electronics Council 2020) über die Apple

Watch Series 4 (GPS- Cellular Ausstattung) gefunden werden. Dieses Apple Watch Modell wird in seinen Mengenanteilen in Tabelle B-86 dargestellt. Das Smartphone wurde, wie in anderen Fallstudien, aus Ecoinvent entnommen. Ein Router wurde in dieser Fallstudie nicht betrachtet, da die Routernutzung zur Datenübertragung von Smartwatch-Daten deutlich geringer ausfällt als für Videokonferenzen oder Videostreams. Für die Smartwatch wird eine Lebensdauer von drei bis vier Jahren angegeben, da nach diesem Zeitraum keine Updates für die Uhren verfügbar sind und somit die Uhr in ihrer Nutzung eingeschränkt wird (Pache, 2022) Zur Vereinfachung wurde für das Smartphone ebenfalls eine Lebensdauer von vier Jahren angenommen.

Tabelle B-86: Bill-of-Materials Apple Watch Series 4 (GPS + Cellular)

Material	Gewicht [g]
Keramik	5
Magneten	1
Display	1
Glas	5
Leiterplatte (Circuit Board)	6
Batterie	5
Aluminium	5
Stahl	8
Plastik	35
Andere	1

Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach Apple (2018)

B.3.11.3.2 Rahmenbedingungen der Nutzungsphase

Für die Nutzungsphase der Fallstudie sind vor allem die Energiebedarfe relevant. Tabelle B-87 listet die Leistungsaufnahme der betrachteten Endgeräte und den Strombedarf durch Datenübertragung und den Ladevorgang auf.

Tabelle B-87: Leistungsaufnahme der betrachteten Geräte pro 16 h Smartwatch Nutzung in Wh

Gerät	Leistungsaufnahme	Quelle
Smartphone	32 Wh	3227 mAh (0,0124 kWh) Akkukapazität (iPhone 13), 1x täglich laden (Hristov, 2022)
Smartwatch, Energiebedarf App	0,448 Wh	(Prakash <i>et al.</i> , 2016)
Smartwatch/-phone, Energiebedarf Datenübertragung	5,4 Wh	(Choi <i>et al.</i> , 2017)
Smartwatch, wireless charging	3,5 Wh	(Wiesend, 2023)
Rechenzentren	65,6 Wh	(Gröger, 2020)

Um den Strombedarf einer Smartwatch abzubilden, muss auch jener Strom berücksichtigt werden, der durch die Internetverbindung und Servernutzung in Anspruch genommen wird (Übertragungsnetz und Server/Rechenzentrum) (Tabelle B-87).

Zusätzlich zum Energiebedarf des Rechenzentrums ist auch die Leistungsaufnahme der Komponenten zur Datenübertragung zu berücksichtigen. Hierbei wird ebenfalls auf die Green Cloud Computing Studie (Gröger *et al.*, 2021) zurückgegriffen, in welcher für einen exemplarischen Datenstrom auf einer Wegstrecke von ca. 500 km innerhalb Deutschlands ein Energiebedarf von 0,0016 kWh/GB für eine VDSL-Verbindung angegeben wird. Die Annahmen des Datenverbrauchs von Smartwatch-Apps basieren auf den in der Literatur verfügbaren Informationen zu allgemeinen App-Verbräuchen von Smartphones, da keine spezifischen Verbräuche von Smartphone-Apps in der Literatur vorlagen (Choi *et al.*, 2017). Diese Annäherung stützt sich auf die Tatsache, dass generell eine Übertragbarkeit von Smartphone-Apps auf die Smartwatches vorliegt.

Für den Strombedarf des Rechenzentrums wurde der Wert 0,0041 kWh/h aus der Green Cloud Computing Studie herangezogen. Dieser Wert bezieht sich allerdings auf Videostreaming. Zunächst lässt sich vermuten, dass dieser Wert zu hoch sein muss für eine Datenspeicherung von Gesundheits- und Fitnessdaten. Allerdings gibt es auch eine Veröffentlichung des Stanford Magazines, in der Werte von 3,1 kWh/GB und 7 kWh/GB für einen Strombedarf von Rechenzentren für Datenspeicherung im Allgemeinen angegeben wird (Adamson, 2017). Die Smartwatch in Kombination mit dem Smartphone generieren an einem Tag 2 bis 5 GB Daten über den Gesundheits- und Fitnesszustand der Nutzenden (Neto, 2020). Unter diesen Annahmen wäre der Strombedarf des Rechenzentrums also deutlich höher (min. 6,2 kWh/Tag). Somit ist der Wert für den Strombedarf des Rechenzentrums mit großen Unsicherheiten verbunden. Aus diesem Grund wird eine überschlägige Sensitivitätsanalyse im Zuge dieser Fallstudie vorgenommen.

Eine Zusammenfassung der Wesentlichen für die Fallstudie definierten Rahmenbedingungen und Annahmen ist in Abbildung B-75 aufgeführt.

B.3.11.3.3 Weitere Sachbilanzdaten

Für die Modellierung der Fallstudie werden neben den oben geschilderten Sachbilanzdaten Datensätze aus der Datenbank Ecoinvent verwendet.

Unter Betrachtung der Systemgrenzen sind neben der Herstellung der bereits dargestellten Endgeräte folgende weitere Datensätze Teil der Sachbilanz:

- ▶ Smartphone: *market for consumer electronics, mobile device, smartphone | consumer electronics, mobile device, smartphone | Cutoff, U - GLO*
- ▶ Strombedarf der Datenspeicherung: *market group for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U - DE*
- ▶ Strombedarf der Datenübertragung: *market group for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U - DE*
- ▶ Strombedarf durch Leistungsaufnahme der betrachteten Endgeräte: *market for electricity, low voltage | electricity, low voltage | Cutoff, U - DE*

Die Aufschlüsselung nach konkreten Rohstoffen erfolgt im nachfolgenden Kapitel im Rahmen der Ergebnisse. Eine tabellarische Übersicht über die gesamte Sachbilanz ist im Kapitel B.20 enthalten.

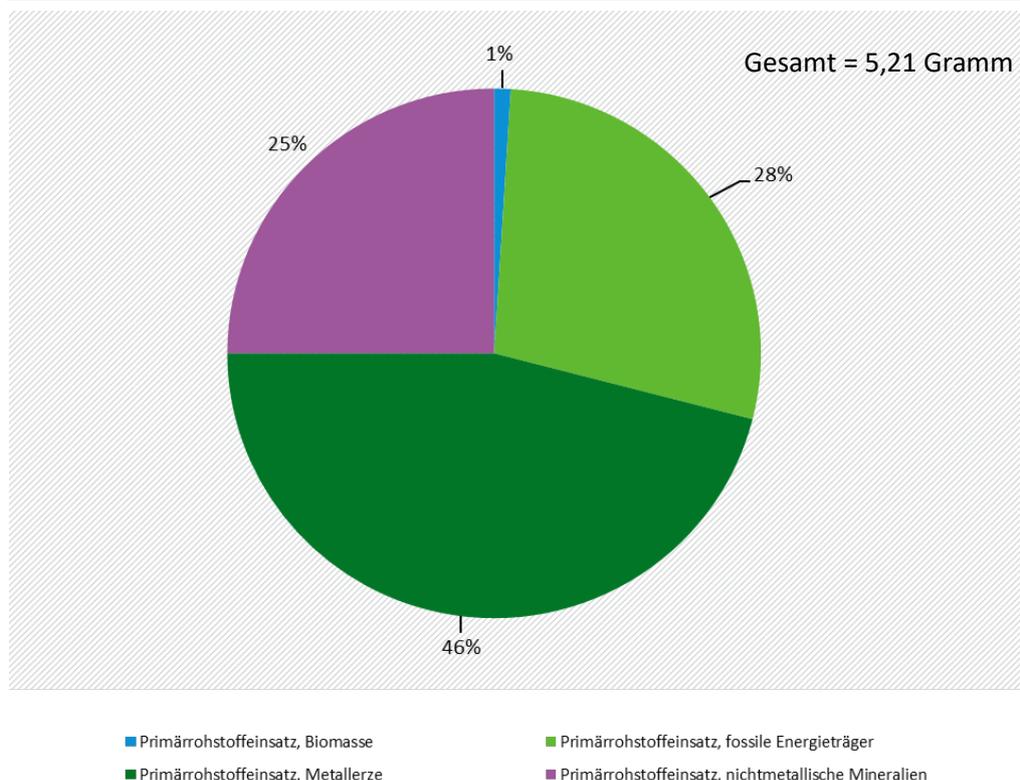
B.3.11.4 Ergebnisse zur Berechnung der Ressourcenintensität

B.3.11.4.1 Rohstoffe und ungenutzte Materialentnahme

B.3.11.4.1.1 Herstellungsphase

Heruntergebrochen auf die verwendete Untersuchungseinheit von 16 Stunden Smartwatch-Nutzung ergibt sich ein **Primärrohstoffeinsatz von 5,21 g/16 h**, der dieser zeitlichen Verwendung der Geräte zugeschrieben werden kann. Die Anteile der verschiedenen im Primärrohstoffeinsatz berücksichtigten Rohstoffarten sind in Abbildung B-76 dargestellt. Es ist ersichtlich, dass Metallerze fast die Hälfte der zur Herstellung notwendigen Rohstoffe darstellen, fossile Energieträger und nichtmetallische Mineralien in ähnlicher Größenordnung notwendig sind und Biomasse als Rohstoff eine untergeordnete Rolle in der Herstellung des E-Health Systems spielt. Wird auch die ungenutzte Materialentnahme in die Erhebung miteinbezogen, ergibt sich für das hier betrachtete E-Health-System ein **Gesamtprimärmaterialaufwand von 6,6 g/16 h** Smartwatch-Nutzung. Die Anteile der einzelnen Rohstoffarten ändern sich hierbei nicht nennenswert im Vergleich zu denen des Primärrohstoffeinsatzes (Abweichung pro Kategorie max. 1 %).

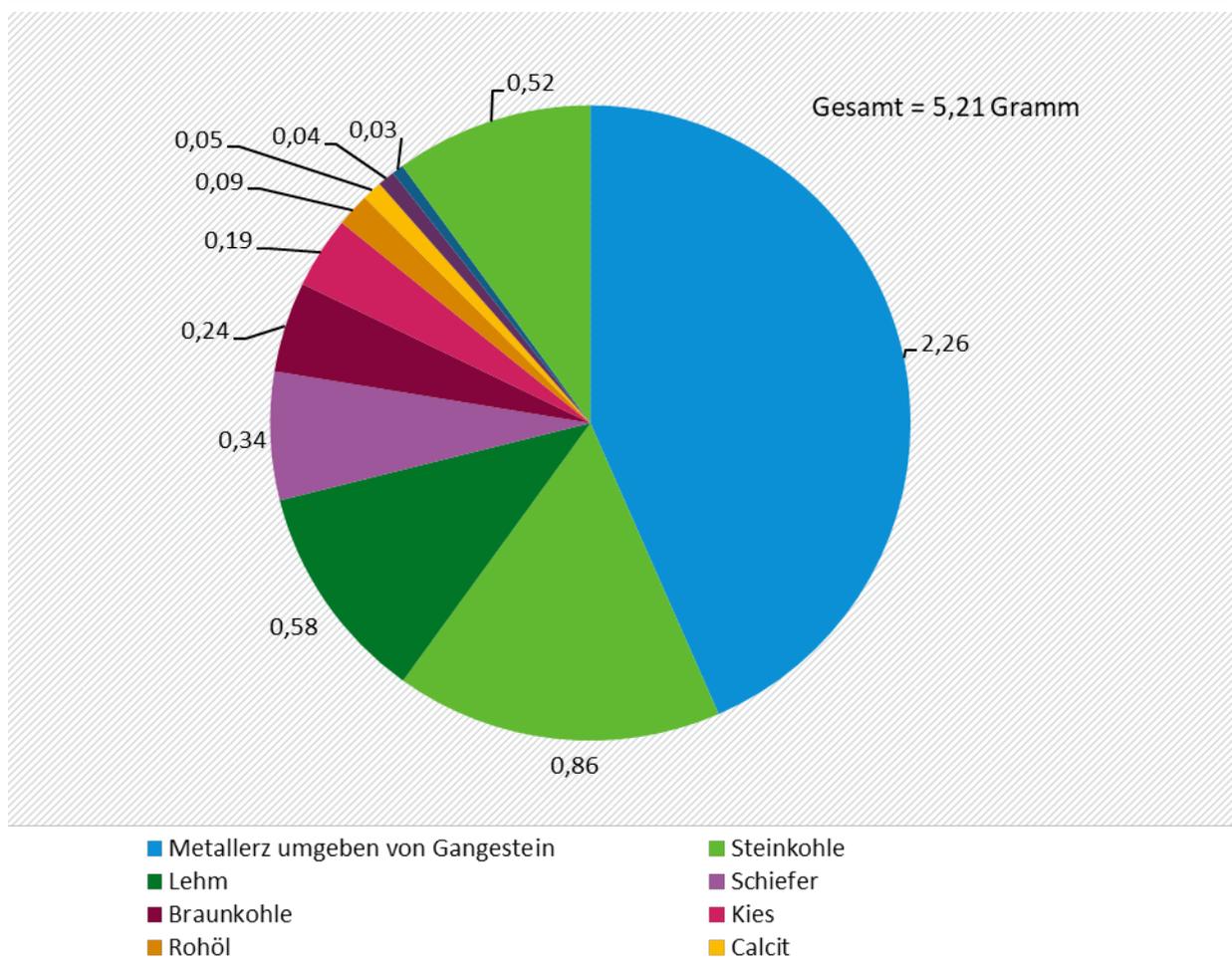
Abbildung B-76: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ in Prozent



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

Der RMI der Herstellungsphase von 5,21 g besteht zu 99 % (5,18 g, vgl. Abbildung B-77). Bei Betrachtung der einzelnen Elementarflüsse ist die Rohstoffintensität der Herstellungsphase rein massentechnisch vorrangig durch die Entnahme von Ganggestein, Stein- und Braunkohle, Lehm und Schiefer (vgl. Abbildung B-77) geprägt. Im verbleibenden Anteil von 17 % sind vorrangig Kies (0,19 g), Rohöl (0,088 g), Calcit (0,052 g), Sand (0,045 g) und Eisen (0,031 g) zu nennen. Die Herstellungsphase der Endgeräte umfasst dabei alle Rohstoffaufwendungen inklusive notwendigen Vorketten und benötigter Energiezufuhr³⁷. Vergleicht man diese Ressourcen exemplarisch mit den Bestandteilen eines Smartphones (entnommen aus (Rizos *et al.*, 2019)) zeichnet sich ab, dass bei den meisten genannten Stoffströmen nicht davon auszugehen ist, dass sie in entsprechender Menge in den IKT-Endgeräten selbst vorhanden sind, sondern die Produktionsvorkette und Energienutzung für den Einsatz der entsprechenden Ressourcen verantwortlich ist.

Abbildung B-77: Primärrohstoffeinsatz (RMI) der Herstellungsphase nach Rohstoffarten zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit von „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ in Gramm



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

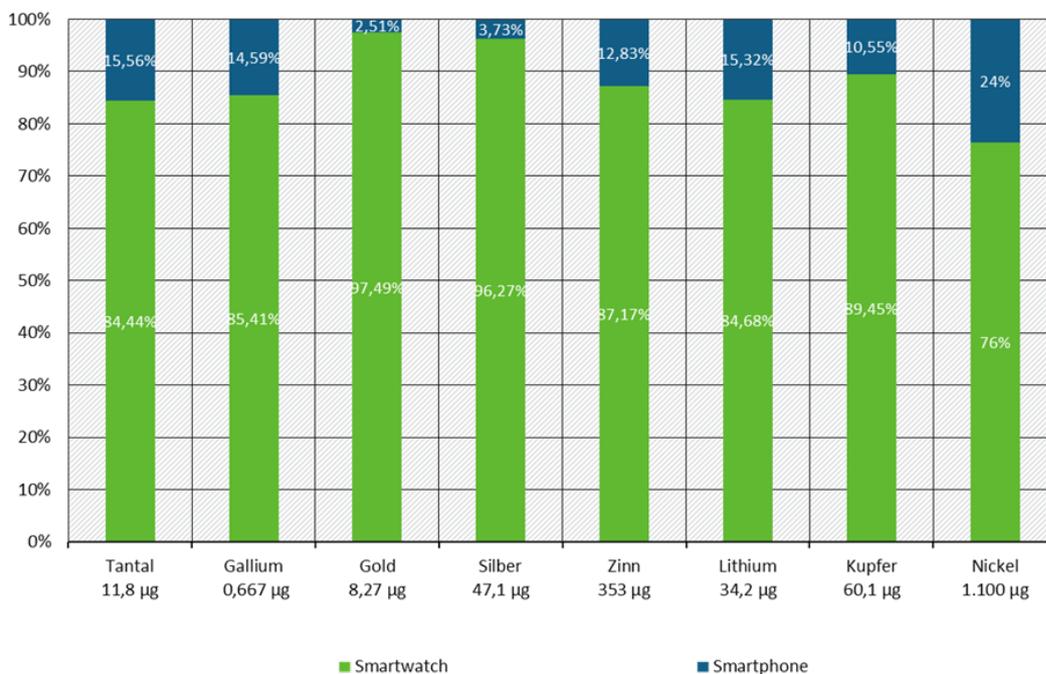
Neben den massenmäßig am meisten aufgewendeten Rohstoffe bei der Herstellung des betrachteten Produktsystem sind auch Ressourcen von Interesse, deren Bedarf zwar nominell niedrig erscheint, die jedoch aufgrund ihrer Relevanz für die Digitalisierung von Interesse sind.

³⁷ Wie in Kapitel 4 des Abschlussberichts „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Rohstoffintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a) beschrieben, entfällt in dieser Betrachtung der Rohstoffbedarf für die Herstellung der Komponenten für Rechenzentren und die Netzinfrastruktur

Diese digitalisierungsrelevanten Rohstoffe umfassen auch eine Reihe sogenannter kritischer Rohstoffe, deren Kritikalität sich aus einer Kombination von wirtschaftlicher Bedeutung für die EU und Versorgungsrisiko ergibt (Europäische Kommission, 2020). Hintergründe zu den verschiedenen Rohstoffkategorien und eine genaue Beschreibung der Vorgehensweise bei der Auswertung sind in Kapitel 4 des Abschlussberichts „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Rohstoffintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023a) zu finden.

Für eine 16-stündige Nutzung einer Smartwatch fallen neben Lithium und Kupfer, die für alle Fallstudien als relevante Rohstoffe betrachtet werden, weitere zwölf Rohstoffe spezifisch für die Herstellungsphase der Fallstudie ins Gewicht. Die Auswahl erfolgte durch eine Gegenüberstellung der für den Anwendungsfall benötigten Rohstoffmenge und deren globaler jährlicher Produktion/Entnahme (siehe auch B.2.4.2). In Abbildung B-78 sind sechs der zwölf Rohstoffe dargestellt. Bei den anderen sechs Rohstoffen (Samarium, Praseodymium, Cerium, Lanthanum, Nickel und Europium) liegt ein Verhältnis von 99 % Smartwatch-Produktion zu 1 % Smartphone-Produktion vor. Laut der Analyse sind Tantal und Scandium am relevantesten, da ihre Entnahme im Vergleich zu ihrer Verfügbarkeit am höchsten ist. Scandium ist dabei auf die Produktion des Magneten zurückzuführen. Tantal wird in der Mikroelektronik von Smartphones und Smartwatches verbaut wird. Des Weiteren fallen in dieser Fallstudie mehr kritische Rohstoffe ins Gewicht als in anderen Fallstudien, da das Massenverhältnis von seltenen und kritischen Rohstoffen im Vergleich zu der Hülle bei einem Smartphone und einer Smartwatch anders ausfällt als bei einem Laptop.

Abbildung B-78: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ in Mikrogramm und Prozent



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

Tabelle B-88: Anteile besonders digitalisierungsrelevanter Rohstoffe an der Herstellungsphase zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ – Tabelle zu Abbildung B-78

Rohstoff	Smartwatch	Smartphone
Tantal	63,33 (84,44%)	23,34 (15,56%)
Gallium	0,57 (85,41%)	0,099 (14,59%)
Gold	8,06 (97,49%)	0,21 (2,51%)
Silber	45,09 (96,27%)	1,62 (3,73%)
Zinn	309,09 (87,17%)	42,91 (12,83%)
Lithium	29,12 (84,68%)	5,09 (15,32%)
Kupfer	54,1 (89,45%)	6,07 (10,55%)
Nickel	836 (76%)	264 (24%)

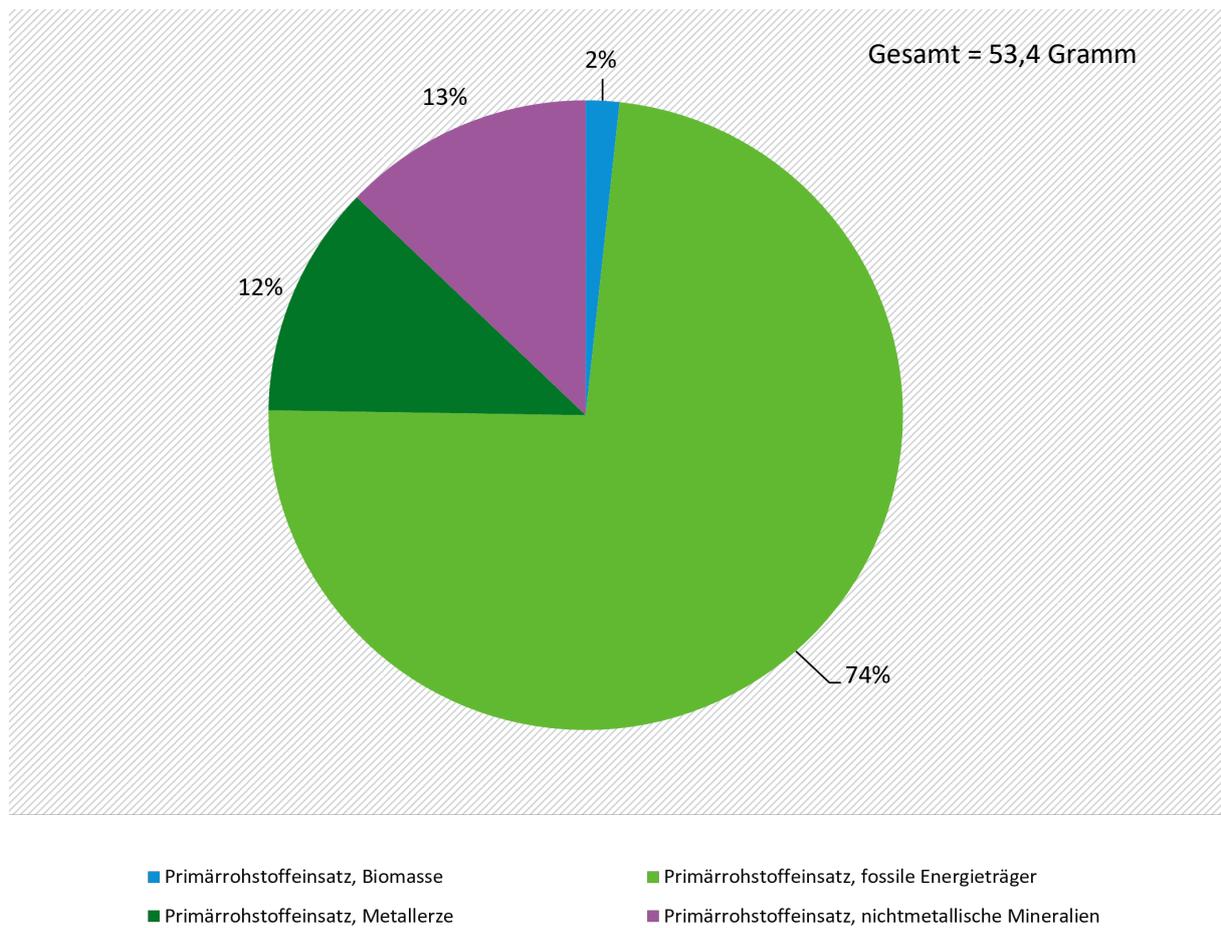
Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023 auf Basis von Ecoinvent v. 3.8.

Auffällig ist dabei, dass für alle näher betrachteten digitalisierungsrelevanten Rohstoffe der Großteil des Bedarfs auf die Smartwatch entfällt. Bemerkenswert ist der geringe Beitrag des Smartphones zum Rohstoffbedarf – dieser ist durch die im Nutzungsprofil hinterlegten direkten Nutzung von einer halben Stunde innerhalb der 16-stündigen Smartwatch-Nutzung bedingt.

B.3.11.4.1.2 Nutzungsphase

Die 16-stündige Nutzung des aufgezeigten E-Health-Systems bedingt einen **Primärrohstoffeinsatz von 53,4 g in der Nutzenphase**, welcher hauptsächlich durch die Datenspeicherung in den Rechenzentren bedingt wird. Der durch die Modellierung errechnete **Gesamtprimärmaterialaufwand beläuft sich auf 70,5 g**. Abbildung B-79 zeigt die Anteile der verschiedenen Rohstoffarten am Gesamtwert des Primärrohstoffeinsatzes. Durch den Umstand, dass sich der Primärrohstoffeinsatz der Nutzung über die Hälfte durch die Strombedarfe der Rechenzentren bedingt, sind die Anteile durch den zugrundeliegenden Strommix der Verwendung geprägt. Der verwendete deutsche Strommix ist stark durch die Verwendung fossiler Energieträger geprägt. Hieraus ergibt sich deren anteilige Dominanz am Primärrohstoffeinsatz der Nutzenphase.

Abbildung B-79: Anteile Primärrohstoffeinsatz der Nutzungsphase zur Bereitstellung Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ in Prozent



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

B.3.11.4.2 Kumulierter Energieaufwand und CO₂-Fußabdruck

Der errechnete kumulierte Energieaufwand (KEA, engl. CED) der Herstellungsphase des genutzten Produktsystems für die Untersuchungseinheit beträgt 0,046 MJ. Dieser steht einem kumulierten Energieaufwand einer einstündigen Nutzung des Produktsystems von 0,905 MJ gegenüber.

Ähnliches lässt sich auch für den CO₂-Fußabdruck (als Global Warming Potential GWP100) beobachten, bei dem sich nach der Allokation auf die Untersuchungseinheit ein GWP von **3 g CO₂-Äq.** für die Herstellung ergibt. Die Nutzungsphase weist einen signifikant höheren Fußabdruck mit **60 g CO₂-Äq.** auf.

Der kumulierte Energieaufwand wie auch der CO₂-Fußabdruck sind damit maßgeblich durch die Nutzungsphase geprägt. Beide Indikatoren sind in der zusammenfassenden

Abbildung B-81 dargestellt und weisen durch die Verwendung fossiler Energieträger und dadurch bedingte Treibhausgasemissionen im Allgemeinen eine hohe Korrelation auf (Valente *et al.*, 2018).

Allerdings ist anzumerken, dass die Ergebnisse sich von den Berechnungen von Apple stark unterscheiden. Das liegt daran, dass für diese Fallstudie nur die Werte der verbauten Materialien vorlagen. Andere Stoffe, die während der Produktion einer Smartwatch zum Einsatz kommen könnten oder Materialineffizienzen konnten aufgrund der Datenlage nicht berücksichtigt werden. Somit fallen in dieser Fallstudie die Umwelteinflüsse der Smartwatch geringer aus.

B.3.11.4.3 Wasserfußabdruck und Landnutzungspotenzial

Ähnlich den Ergebnissen zu Rohstoffintensität und Energieaufwand zeigt sich bei der Analyse des Wasserfußabdrucks (WDP) ein kumulierter Wert für die Endgeräte in der Herstellungsphase von 30 cm³ und in der Nutzungsphase von 270 cm³ pro Untersuchungseinheit. Der Wasserfußabdruck der Nutzungsphase wird hierbei maßgeblich durch die Datenspeicherung in den Rechenzentren beeinflusst, die für 67,2 % des Wasserbedarfs in dieser Phase verantwortlich ist. Bei der Herstellung der Endgeräte fallen 70,2 % auf die Herstellung der Smartwatch, wovon wiederum 42,7 % auf die Produktion der Leiterplatte fallen.

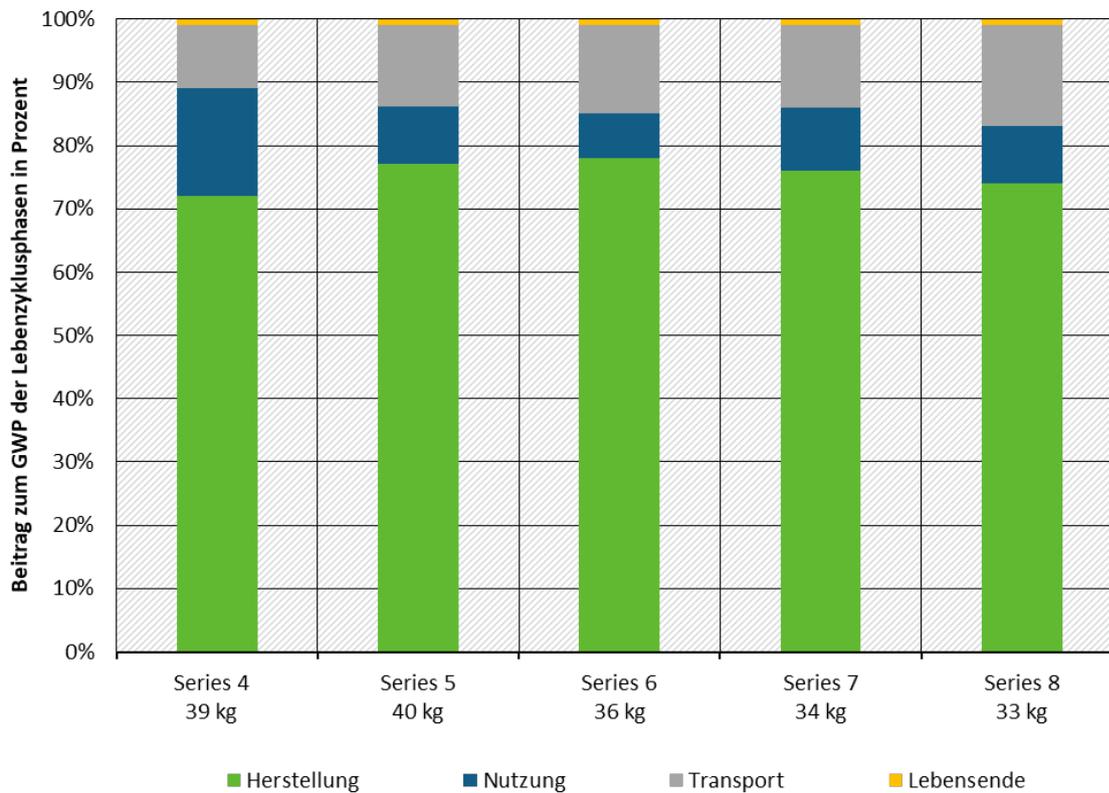
Auch beim Landnutzungspotenzial (LOP) ist eine Dominanz der Nutzungsphase festzustellen. Während der Herstellungsphase in dieser Wirkkategorie eine Landnutzung von 1,6 cm²a pro 16 h Gesundheit- und Fitnesstracking zugeschrieben werden kann und die Nutzungsphase potenziell pro Stunde 24 cm²a verursacht, entfallen zwei Drittel auf den Strombedarf zur Speicherung der Daten in den Rechenzentren. Beide Indikatoren sind in der abschließenden dargestellt.

B.3.11.4.4 Schlussfolgerungen für das Umweltentlastungspotenzial

Wie bereits erwähnt, wurden bisher kaum Untersuchungen zu den Umwelteinflüssen und der Ressourcenintensität von Smartwatches und digitaler Fitness durchgeführt. Allerdings ergaben die Untersuchungen des Green Electronic Councils, dass der größte Umwelteinfluss verschiedener Smartwatches über alle untersuchten Indikatoren hinweg durch die Leiterplatte entsteht, da die Herstellung der Leiterplatte besonders energieintensiv ist und umweltschädliche Chemikalien bei ihrer Produktion zum Einsatz kommen. Die gleichen Ergebnisse ergaben sich bei der Untersuchung zweier FitBit-Geräte (Green Electronics Council, 2020).

Die Berechnungen von Apple ergaben, dass der Großteil der Treibhausgasemissionen durch die Produktion entsteht (je nach Modell zwischen 73 und 78 %) (Abbildung 80). Den zweitgrößten Ausstoß verursacht laut Apple die Nutzungsphase mit ca. 10 % (Abbildung 80) (Apple, 2018; Apple, 2019; Apple, 2020; Apple, 2021; Apple, 2022).

Abbildung B-80: Anteil der Lebenszyklusphasen auf die Treibhausgasemissionen der Applewatch Series 4 bis 8 in Prozent



Quelle: Eigene Darstellung (Ramboll im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, nach Apple (2018; 2019; 2020; 2021; 2022)

Tabelle B-89: Anteil der Lebenszyklusphasen auf die Treibhausgasemissionen der Applewatch Series 4 bis 8 in Prozent - Tabelle zu Abbildung B-80

Series	Herstellung	Nutzung	Transport	Lebensende
Series 4: 39 kg	34,08 (72%)	6,63 (17%)	3,9 (10%)	0,39 (1%)
Series 5: 40 kg	30,08 (77%)	3,6 (9%)	5,2 (13%)	0,4 (1%)
Series 6: 36 kg	28,08 (78%)	2,52 (7%)	5,04 (14%)	0,36 (1%)
Series 7: 34 kg	25,84 (76%)	3,4 (10%)	4,42 (13%)	0,34 (1%)
Series 8: 33 kg	24,42 (74%)	2,97 (9%)	5,28 (16%)	0,33 (1%)

Quelle: Apple (2018; 2019; 2020; 2021; 2022)

Zum Umweltentlastungspotenzial können für diese Fallstudie wenig direkte Aussagen getroffen werden. Die digitale Anwendung ist eine neue Form der Selbstanalyse und -optimierung und verbindet verschiedene, teils neue, Funktionen. Es ist daher durch die Verwendung von Smartwatches und ähnlichen Geräten in Kombination mit Apps und dem Smartphone von einem insgesamt gesteigerten Ressourcenbedarf auszugehen, sofern Nutzer*innen zuvor keinerlei Datenerfassung zur Gesundheit bzw. Fitness vorgenommen haben. Weiterhin ist von gesundheitlichen und sozialen Effekten auszugehen, die sich aus gesteigertem Gesundheitsbewusstsein sowie Überwachung der eigenen Gesundheit und Fitness ergeben (Zukunftsinstitut, 2023).

Wie eingangs beschrieben, kann der Verwendung von E-Health-Anwendungen und insbesondere von Smart Watches zum Gesundheits- und Fitnesstracking kein direktes Umweltentlastungspotenzial zugeschrieben werden. Zweck der Anwendung ist in erster Linie die Erfassung der täglichen Aktivitäten und die komfortable Interaktion auf der Smartwatch mit verschiedenen Informationen, die über das Smartphone übertragen werden.

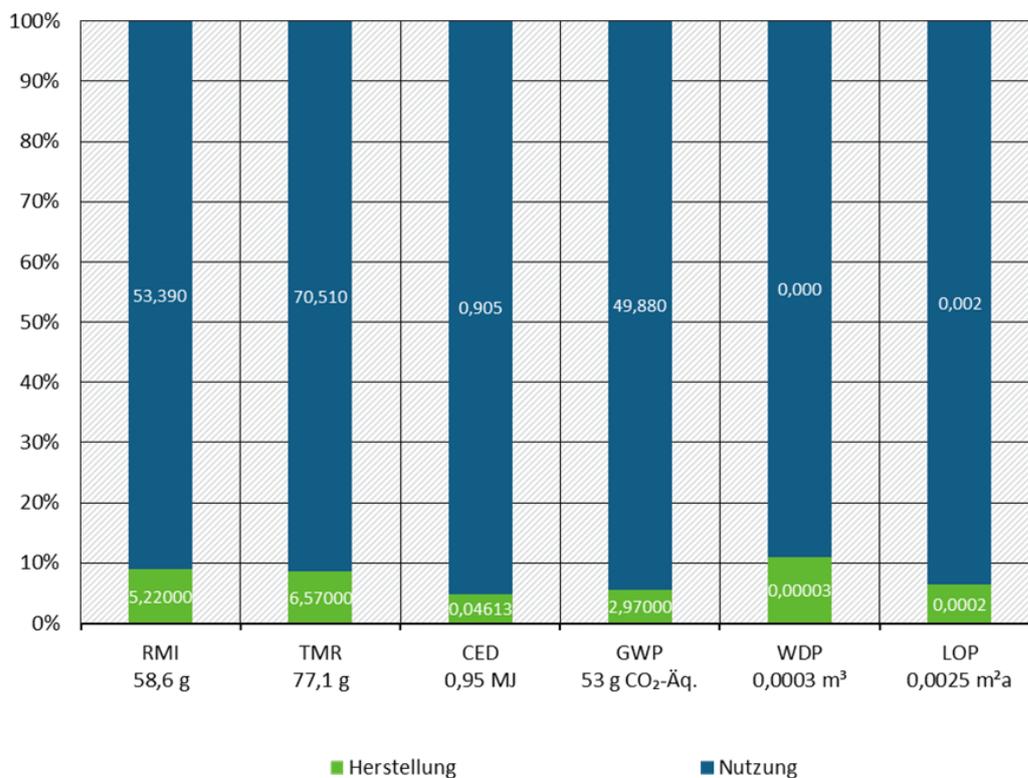
Es stehen jedoch sozial-gesellschaftliche und gesundheitliche positive Effekte mit digitalen Anwendungen von E-Health in Verbindung. Im Fokus vieler Menschen stehen mehr und mehr körperliche Fitness und psychisches Wohlbefinden. Dank der wachsenden Verbreitung von Health-Apps und digitalen E-Health-Plattformen scheinen immer mehr Menschen Eigenverantwortung für ihre Gesundheit zu übernehmen. Die Qualität solcher E-Health-Anwendungen sowie die Zusammenarbeit mit Ärzten*Ärztinnen können die Gesundheitsversorgung erheblich verbessern und letztendlich zu einem gesünderen Körper und Geist beitragen (Willi Kägi, 2022). Mittlerweile sind über 350.000 Health Apps auf den diversen App Stores für die Bereiche Fitness und Lifestyle, Selfservice und Selbstüberwachung und -behandlung verfügbar. Ebenso wächst insgesamt der Markt für Produkte im Bereich Fitness, körperliches Wohlbefinden, Freizeitaktivitäten und Hilfsmittel für ältere Menschen oder Personen mit Einschränkungen kontinuierlich (Weiler, 2021). Das zunehmende Gesundheitsbewusstsein könnte dazu führen, dass Smartwatch-Nutzende vermehrt das Fahrrad verwenden oder zu Fuß gehen, statt Wege mit einem Pkw zurückzulegen. Die Nutzung der Smartwatch an einem Tag (16 Stunden) ist mit einem CO₂-Fußabdruck (Herstellungs- und Nutzungsphase) von 52,9 g CO₂-Äq. verbunden. Dieser Wert könnte den eingesparten Emissionen gegenübergestellt werden. Die Literaturrecherche ergab jedoch keinerlei belastbare Informationen für eine Ermittlung eines Umweltentlastungspotenzials durch solche Effekte.

B.3.11.5 Schlussbetrachtung und Fazit zur Fallstudie

Da die betrachteten Indikatoren in unterschiedlichen Einheiten bemessen werden und teilweise verschiedene Schutzbereiche betreffen, ist ein direkter Vergleich zwischen den Kategorien nur über Umwege wie den einer Normalisierung möglich, was den Fokus weg von Ressourcenintensität auf Sachbilanzebene hin zu einem vergleichenden Index zwischen LCA-Wirkungskategorien verschieben würde. Abbildung B-81 konzentriert sich daher vergleichend für alle betrachteten Indikatoren auf die Aufteilung der berechneten Ressourcenintensitäten und Wirkkategorien nach Lebenszyklusphasen. Es ist deutlich zu erkennen, dass über alle Indikatoren hinweg die Nutzungsphase dominant ist. Die Indikatoren CO₂-Fußabdruck, TMR und kumulierter Energieaufwand weisen im Vergleich eine höhere Signifikanz der Nutzungsphase gegenüber der Herstellungsphase auf; letztere dominiert aber dennoch den Gesamteinfluss auf den Indikator. Dies liegt daran, dass in diesen beiden Kategorien der Energiebedarf und die Art der Energieversorgung eine verhältnismäßig höhere Relevanz hat.

Wie bereits zuvor erläutert, quantifiziert die Fallstudie keine Abfall- oder Recyclingprozesse. Auf Basis bisheriger Studien (siehe u. a. Kapitel B.2) kann jedoch angenommen werden, dass der Beitrag im Vergleich zu Herstellung und Nutzung wenig relevant ist.

Abbildung B-81: Zusammenfassung - Vergleich der berechneten Ressourcen und des CO₂-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 = CO₂-Fußabdruck, WDP = Wasserfußabdruck, LOP = Landnutzungspotenzial.

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

Tabelle B-90: Aufteilung der Anteile zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase für die betrachteten Ressourcen zur Bereitstellung der Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“ – Tabelle zu Abbildung B-81

Kategorie	Herstellung	Nutzung
RMI (in g)	5,2 (8,84%)	53,4 (91,89%)
TMR (in g)	6,6 (8,4%)	70,5 (91,8%)
CED (in MJ)	0,0461 (4,87%)	0,9055 (95,23%)
GWP (in kg CO ₂ -Äq.)	0,003 (5,6%)	0,0499 (93,5%)
WDP (in m³)	0 (0%)	0,0003 (100%)
LOP (in m²a)	0,0002 (8%)	0,0024 (96%)

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

Smartwatches werden deutschlandweit vielzählig genutzt. Darüber hinaus wird den Smartwatches ein starkes Wachstum vorhergesagt. Grund für das prognostizierte Wachstum

und die aktuelle starke Nutzung der Smartwatches durch die Deutschen sind die Funktionen des Fitness- und Gesundheitstrackings (Hollasch & Sahl, 2021).

Die Fallstudie beschäftigt sich mit der Frage, mit welcher Ressourcenintensität und ausgewählten anderen Umweltwirkungen diese Form des digitalen Wandels in unserer Gesellschaft einhergeht. Sie betrachtet vor diesem Hintergrund das 16-stündige Gesundheits- und Fitnessstracking inklusive der dafür benötigten IKT-Endgeräte, ihrer Herstellung und Energiebedarfe bei der Datenbereitstellung und -übertragung. Der Fokus der Auswertung liegt dabei auf den verwendeten Rohstoffen, wobei die Betrachtung zwischen mengenmäßig relevanten und im Verhältnis zur Verfügbarkeit digitalisierungsrelevanten Rohstoffen unterscheidet. Wie aus anderen Veröffentlichungen und Fallstudien bereits hervorgeht, zeigt sich hier erneut, dass der überwiegende Teil der Ressourcenintensität bei der Herstellung der Smartwatch auf die Produktion der Leiterplatte entfällt. (Green Electronics Council, 2020; Ma *et al.*, 2017). Im Vergleich der einzelnen Rohstoffe ergibt sich ein einheitliches Bild, da der Bedarf aller Rohstoffe in der Herstellungsphase primär durch die Produktion der Smartwatch dominiert wird. Insgesamt überwiegt jedoch der Einfluss der Nutzungsphase auf die Gesamtergebnisse aller Indikatoren. Dies ist hauptsächlich auf den Energiebedarf der Datenspeicherung zurückzuführen. Wie beschrieben, gibt es große Unsicherheiten bei dem Wert zum Energiebedarf der Datenspeicherung. Aus diesem Grund wird eine überschlägige Sensitivitätsberechnung vorgenommen. Unter der Annahme des Energiebedarfs aus dem Stanford Magazine (6,2 kWh/Tag) ergeben sich deutlich höhere Werte für die Nutzungsphase. Anstatt eines GWP von 0,0499 kg CO₂-Äq. ergibt sich ein GWP von 3,18 kg CO₂-Äq., wovon 99,5 % auf die Datenspeicherung in den Rechenzentren zurückzuführen sind. Geht man allerdings davon aus, dass der Wert nicht um das 100-fache größer, sondern um das 100-fache kleiner ist als 0,0656 kWh/16h, so ergibt sich ein GWP von 0,017 kg CO₂-Äq. In diesem Fall beruht das GWP der Nutzenphase hauptsächlich auf dem Energiebedarf des Smartphones (48,9 %) und die Herstellungsphase (0,00297 kg CO₂-Äq.) hätte größere Umwelteinflüsse als die Nutzungsphase (0,017 kg CO₂-Äq.).

Auf Basis der Fallstudie lässt sich weiterhin überschlägig die Ressourcenintensität im gesamtdeutschen Kontext berechnen. 2019 trugen bereits 36 % der Deutschen eine Smartwatch (Tenzer, 2022). Laut Destatis betrug die Einwohnerzahl Deutschlands 2022 84,4 Mio. Menschen (Statistisches Bundesamt, 2023a). Wird angenommen, dass 2022 ebenfalls 36 % der Deutschen eine Smartwatch trugen, so ergibt sich eine Menge von 30,348 Mio. Smartwatches. Bei einem GWP von 0,0024 kg CO₂-Äq. pro Smartwatch in einem 16-stündigen Betrachtungszeitraum ergibt sich ein Gesamtwert von 73.745 kg CO₂-Äq. allein für die anteilige Herstellung der Uhren für die 16-stündige Benutzung. Der Primärrohstoffeinsatz würde für die anteilige Herstellung der 16-stündigen Nutzung von 30,348 Mio. Smartwatches 139.600 kg betragen.

Zur Einordnung der Ergebnisse im Kontext der Fallstudie ist besonders die Datenlage in Bezug auf den Energiebedarf der Internetnutzung zu erwähnen. Hierbei unterscheiden sich die in der Literatur verfügbaren Informationen nicht nur aufgrund ihres Alters stark (Schödwell & Zarnekow, 2018; Umweltbundesamt, 2018; Gröger *et al.*, 2021; Ong *et al.*, 2012; Obringer *et al.*, 2021; Vandromme *et al.*, 2014; Kugler, o. D.). Es finden sich zudem verschiedene Ansätze zur Ermittlung des „Strombedarfs des Internets“. Insgesamt vermittelt der Stand der Literatur den Eindruck, dass hier weiterer Forschungsbedarf besteht und es wesentlich ist, aktuelle Daten als Berechnungsgrundlage zu verwenden (siehe auch Kapitel B.2 zur Ressourcen- und Energieintensität von Rechenzentren und Datenübertragung).

B.3.12 Diskussion und Zusammenfassung der Ergebnisse der Fallstudien

Für verschiedene digitale Anwendungsfälle wurde der **Ressourcenbedarf** und in Ergänzung der **CO₂-Fußabdruck** auf Mikroebene untersucht und berechnet. Die Analyse fand in Anlehnung an die LCA-Methodik statt, **fokussierte sich jedoch auf die Input-Seite**, d. h. auf die notwendigen Rohstoffe und natürlichen Ressourcen, die zur Bereitstellung einer jeden Untersuchungseinheit notwendig sind. Zudem wurde für jedes Fallbeispiel der **Wasserfußabdruck und das Landnutzungspotenzial** berechnet. Für die notwendigen Rohstoffe wurde explizit zwischen **Massenrohstoffen und besonders für die Digitalisierung relevanten Rohstoffen** unterschieden. Ergänzend dazu wurde insbesondere das **Treibhauspotenzial** sowie der **kumulierte Energiebedarf** der jeweiligen Anwendung analysiert.

Die **Ergebnisse** zeigten je nach Fallstudie ein **unterschiedliches Bild** bezüglich der Haupttreiber des Ressourcenbedarfs. Für verschiedene Anwendungsfälle entfielen die meisten Ressourcenaufwände auf die **Herstellungsphase** (Fallstudien Videokonferenz, 3D Druck, digitale Medien). Bei anderen Fallstudien fielen die meisten Ressourcenaufwände in der **Nutzungsphase** an (Fallstudien Smart-Home, Kryptowährungen, E-Sports, E-Health). Einige Fallstudien zeigten kein so eindeutiges Bild, da sich in den betrachteten Szenarien der Beitrag von Herstellungs- und Nutzungsphase an den Gesamtergebnissen ändert (Fallstudien C2C-Plattform, Carsharing). Für die Fallstudie *E-Grocery* fand aufgrund des Betrachtungsrahmens kein direkter Vergleich zwischen den beiden Phasen statt.

Die Rohstoff- bzw. Ressourcenintensität der Nutzungsphase wurde in den Fallstudien durch den **Strombedarf** dominiert, wobei dies teilweise auf den Strombedarf der **Endgeräte** bei den Anwendenden, teils auf den Strombedarf der Datenübertragung inklusive der Rechenzentren zurückzuführen war. Maßgeblich für den Ressourcenbedarf in der Herstellungsphase waren zumeist die Endgeräte bei den Anwendenden aufgrund der verwendeten Materialien und dazu benötigten Vorketten. Für jede Fallstudie wurden die Ergebnisse sofern verfügbar mit Literaturinformationen verglichen. Auch die allgemeine Literaturrecherche zur Ressourcenintensität der Digitalisierung aus den vorangegangenen Arbeiten im Projekt bestätigte den Gesamteindruck der hier dargestellten Fallstudienresultate. Je nach betrachtetem Produkt oder System schlugen sich die direkten Ressourcenbedarfe in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen nieder: beispielsweise wurden die Ressourcenbedarfe für diverse Endgeräte eindeutig von den Phasen der Rohstoffentnahme bis zur Herstellung determiniert (Liu *et al.*, 2019; Manhart *et al.*, 2016), während die Nutzungsphase oder der Betrieb bei Rechenzentren einen deutlich erhöhten Beitrag zum abiotischen Ressourcenbedarf leistete (Köhn *et al.*, 2020). Generell überwog der Einfluss der Herstellungsphase in jenen Fallstudien, die eine stromintensive Nutzungsphase durch Endgeräte oder Datenübertragung aufweisen – in Abhängigkeit der verwendeten Strommixe. Unabhängig von der Wahl der Endgeräte blieb das Verhältnis zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase in den Fallstudien nahezu gleich. Auch wenn in **Szenarien** mit kleineren Geräten Effizienzgewinne festzustellen waren, überwogen insgesamt die Einflüsse der Stromintensität in **energieintensiven Nutzungsphasen**. Die **Wahl der Endgeräte** spielte daher für die Ressourcenintensität insgesamt in **vielen Fallstudien eine untergeordnete Rolle**, auch wenn diese Schlussfolgerung stark von den getroffenen Annahmen einer Fallstudie abhängt und bei der Interpretation berücksichtigt werden muss. Auf Basis der hier gewonnenen Erkenntnisse kann vermutet werden, dass **zukünftig die relative Relevanz der Herstellungsphase** zunimmt, da einerseits mit fortschreitender Energiewende zunehmend erneuerbare Energien eingesetzt werden, um den Strombedarf zu decken. Andererseits scheinen in Anbetracht der gesammelten Daten die Effizienzgewinne in den letzten Jahren bei Rechenzentren größer zu sein als bei Endgeräten (Hintemann *et al.*, 2020).

Dabei dürfen die Wahl der System- und Betrachtungsgrenzen und die gewählte Untersuchungseinheit nicht außer Acht gelassen werden. Das Lebenszyklusende konnte in den meisten Fallstudien wegen der mangelhaften Datenlage nicht berücksichtigt, sofern die Literaturanalyse keine hohe Signifikanz dieser Phase für die Ressourcen- und Umweltauswirkungen ergab (siehe Beispiel Kryptowährungen). Ob der Haupttreiber für die analysierte Ressourcenintensität in der Herstellungs- oder Nutzungsphase lag, hing auch vom betrachteten System und den vorgenommenen **Allokationen** z. B. der multifunktionalen Endgeräte ab. Grundsätzlich versuchten alle Fallstudien den Bezug auf die digitale Anwendung selbst, in Form einer speziell dafür gewählten Untersuchungseinheit (z. B. eine Stunde Videokonferenz oder E-Sports oder Betrieb des Smart-Home-Systems oder einer Kryptowährung) zu legen. Durch diesen nutzenbasierten Bezugspunkt ließ sich der anteilige Herstellungsaufwand allokieren. Dafür notwendige Annahmen zu Nutzungsdauern pro Anwendung und Lebensdauer der Geräte sind in den Fallstudien dokumentiert und berücksichtigen den Kontext der Fallstudie und die dafür verfügbaren Informationen und Daten.

Bei der **Analyse der Ressourcenintensität** wurden **verschiedene Indikatoren** untersucht. Im **Fokus** der Analyse standen der **Rohstoffbedarf** insgesamt (als Primärrohstoffeinsatz und sowie ergänzt um die ungenutzte Materialentnahme als Gesamtprimärmaterialaufwand). Betrachtet man dabei die Aufteilung zwischen den Rohstoffgruppen, so zeigt sich, dass in allen Fallstudien **Metallerze** als Rohstoffinputs in der Herstellungsphase **dominieren**. Sofern die Nutzungsphase zusätzlich oder allein betrachtet wird, herrschen **fossile Energieträger** aufgrund der verwendeten, größtenteils durch fossile Energien dominierten **Strommixe** vor. Unter den Massenrohstoffen ist in den meisten Fallstudien **Ganggestein** das am meisten abgebaute Material. Ganggestein fällt als Nebenprodukt beim Erzabbau zwangsläufig mit an, sodass hier große Mengen im Vergleich zu z. B. Energieträgern nicht verwundern. Andere Rohstoffe, die rein bezogen auf die verwendeten Massen unter den wichtigsten Materialien für die Fallstudien sind, sind in unterschiedlicher Reihenfolge und Gewichtung: **Stein- und Braunkohle, Kies, Schiefer, Sand und Rohöl**. Diese werden zum Teil durch die Energiebereitstellung und den Energiebedarf der gesamten Produktionskette hervorgerufen. Beispielsweise ist die Energieproduktion aus Braun- und Steinkohle noch immer ein wichtiger Bestandteil des deutschen Strommix (Umweltbundesamt, 2022c). Sie sind aber auch im chinesischen Strommix stark vertreten, wo viele der IKT-Komponenten und Endgeräte hergestellt werden. Rohöl dient zum einen der Energieproduktion, fließt aber anteilig je nach Fallstudie auch in die Produktion von Kunststoffen ein. **Andere Rohstoffe** wie Schiefer, Kies und Sand können auf diverse Prozesse entlang der Produktionskette von Energie und IKT-Komponenten zurückgeführt werden, wobei die Verwendung nicht in besonderem Zusammenhang mit den digitalen Anwendungen steht, sondern allgemein auf die meisten industriellen Prozesse zutrifft (z. B. als Betonzuschlagsstoff in allen Fundamenten und Gebäuden). Es lässt sich daher zusammenfassen, dass sich die Massenrohstoffe am **wenigsten im finalen Produkt(system) selbst befinden**, sondern durch die aufwändige Produktionsvorkette der Komponenten und der Energiebereitstellung zu erklären sind.

Darüber hinaus wurden auch jene 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. Insgesamt wurden **27 digitalisierungsrelevante Rohstoffe** analysiert, von denen die wichtigsten je Fallstudie bezogen auf den verwendeten Anteil an der jährlichen Gesamtproduktion dargestellt sind. Dabei zeigte sich, dass einige Rohstoffe in fast allen Fallstudien bei dieser Analyse herausstechen: **Gallium, Tantal, Gold, Silber, Zinn, Nickel und teils Scandium sowie Lithium**. Kritisch im Sinne der EU-Klassifikation sind darunter **alle außer Gold, Silber, Nickel und Zinn**. Diese sind aber für verschiedenste IKT-Komponenten ebenso essenziell. In den Fallstudien zeigte sich generell, aber besonders bei Betrachtung dieser digitalisierungsrelevanten Rohstoffe, dass sich die **Haupttreiber** je nach

betrachtetem Produktsystem und Rohstoff unterschieden. Einzelne Geräte oder Komponenten des betrachteten Produktsystems einer Fallstudie verursachten oftmals einen erheblichen Teil der Ressourcenbedarfe digitalisierungsrelevanter Rohstoffe. Beispielsweise seien hier (Gaming)Computer bei der E-Sports-Fallstudie oder das Netzteil beim 3D-Drucker genannt. Jedoch zeigte sich auch, dass einzelne Rohstoffbedarfe fast ausschließlich von bestimmten Endgeräten oder Komponenten verursacht wurden. Ein Beispiel hierfür ist der **Lithiumbedarf** zur Herstellung des Laptops in der Fallstudie zur Videokonferenz. Entgegen der öffentlichen Debatte konnte für Kupfer und teils Lithium häufig keine besondere Relevanz für die betrachteten Anwendungsfälle ausgemacht werden. Auch **Kobalt**, das häufig wegen seinen negativen sozialen Implikationen in den Abbaugebieten genannt wird, konnte nur in der Fallstudie zum Carsharing aufgrund der Verwendung in der Elektroautobatterie als besonders relevant eingestuft werden. Dagegen war **Tantal** im Rahmen der Fallstudien besonders hervorzuheben. Es wurde in allen zehn Fallstudien als besonders relevant in Bezug auf seine jährlich verfügbare Menge identifiziert und war häufig auch der mit Abstand relevanteste Rohstoff unter den 27 analysierten Rohstoffen. Ein Erklärungsansatz sind die in den Fallstudien in der Regel verwendeten Endgeräte. Tantal ist ein wichtiger Bestandteil von Kondensatoren, wie sie beispielsweise für die Leiterplatten in Smartphones, Tablets und Laptops benötigt werden.

Neben den Rohstoffen wurden weitere Ressourcen sowie das Treibhausgaspotenzial als Beispiel für bekannte Umweltwirkungen betrachtet. **Insgesamt wurden für alle Fallstudien mindestens sechs gleiche Indikatoren analysiert.** Wie erwartet, zeigen die Indikatoren für den kumulierten Energieaufwand und das Treibhauspotenzial eine **Korrelation**. Bemerkenswert war insgesamt jedoch, dass die Indikatoren **in den meisten Fallstudien eine ähnliche Tendenz in der Aufteilung zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase aufwiesen.** In der Regel fanden sich bei den untersuchten Anwendungsfällen keine, bei denen die Treiber der Ressourcenintensität in unterschiedlichen Lebenszyklusphasen lagen, auch wenn sich die Anteile bei den einzelnen Wirkkategorien unterscheiden. Am Beispiel der Fallstudie C2C-Plattform zeigte sich aber, wie stark die zugrundeliegenden Daten und Annahmen Einfluss auf dieses Ergebnis nahmen. Für die Fallstudie wurden Szenarien für ein Rechenzentrum mit Daten von 2011 mit einer Annahme für ein heutiges effizientes Rechenzentrum verglichen. Unter der Voraussetzung sonst gleicher Rahmenbedingungen für die Anwendung war der Haupttreiber der Ressourcenintensität im effizienten Szenario die Herstellungsphase wohingegen die Indikatoren des Vergleichsszenarios von der Nutzungsphase dominiert wurden. Ein weiterer Effekt hinsichtlich der Umweltwirkungen insgesamt, der sich an den Ergebnissen der Fallstudien ablesen ließ, ist die **geografische Verteilung** der Umweltauswirkungen und Ressourcenintensitäten. Die gewonnenen und genutzten natürlichen Ressourcen, ob verarbeitet oder unverarbeitet, werden intensiv rund um den Globus gehandelt. Der größte Anteil der Produktionsphase bezogen auf Ressourcenaufwände und Umweltwirkungen entsteht **nicht am Einsatzort in Deutschland**, sondern in vielen Ländern, in denen die Rohstoffe abgebaut und die Komponenten gefertigt werden. Beispielhaft sei der Ressourcenabbau von seltenen Erden in der Demokratische Republik Kongo und die Fertigung vieler IKT-Endgeräte in China genannt³⁸. Der Nutzen der digitalen Anwendung kommt somit Deutschland zugute, während sich negative Aspekte in Bezug auf Ressourcenentnahme und Umweltauswirkungen in den Ländern der Produktionsvorketten auswirken.

Die gewählte Methodik sowie die verwendeten Daten zeigten verschiedene **Unsicherheiten**, die einerseits fallstudienpezifisch diskutiert wurden, andererseits aber auch allgemeine Schlüsse zuließen. An dieser Stelle sei auf die Wesentlichkeit von aktuellen Daten und Datensätzen

³⁸ Die Hauptproduzenten von beispielsweise Lithium sind zum Beispiel Chile (44 %), China (39 %) und Argentinien (13 %). Nickel, Mangan und Kupfer werden hauptsächlich in den APERegionen und Kobalt im Kongo abgebaut (Tsisilile, 2019).

verwiesen, was auch die vorhergehenden Recherchen ergaben (vgl. z. B. Liu *et al.*, 2019). Hierfür können beispielsweise robuste Annahmen für die **Energieintensität der Datenübertragung** oder die Herstellung der Rechenzentren- und Übertragungsinfrastruktur als Beispiele angeführt werden. Auch wenn erste Quantifizierungen vorliegen (Schödwell & Zarnekow, 2018; Gröger *et al.*, 2021), fehlte es für viele Anwendungen noch an spezifischen Informationen. Die Analysen der Fallstudien stellten heraus, dass Annahmen zum Ressourcenbedarf der **Datenübertragung** wesentlich für das Ergebnis waren, jedoch verfügbare Informationen enorm schwankten. Verfügbare Daten müssen aufgrund schnell voranschreitender Technikentwicklung aktuell sein, um ein möglichst realistisches Bild der Ressourcenintensität widerzuspiegeln. Es gibt jedoch Grund zur Annahme, dass sich die Datenlage künftig weiter verbessern wird, da die Revision der EU-Energieeffizienz-Richtlinie eine jährliche Berichterstattung von Rechenzentren über ihren Energiebedarf ab 2024 einführt. Weiterhin können Umweltsiegel wie der Blaue Engel, das z. B. für Rechenzentren verfügbar ist, bei der Verbesserung der Datengrundlage hilfreich sein. Neben der Übertragungsinfrastruktur und -speicherung waren **Datenlücken oder -unsicherheiten** auch bezüglich der Datensätze festzustellen, die in den Modellen der Fallstudien aus der LCA-Datenbank Ecoinvent entnommen wurden. Auch wenn in vielen Fallstudien auf Datensätze der Datenbank zurückgegriffen werden konnte, musste festgestellt werden, dass diese in ihrer Aktualität oftmals nicht mit der rasanten technischen Entwicklung von digitalen Endgeräten mithalten können, nicht ausreichend differenziert (z. B. Arten von Chips oder ganzen Endgeräten) waren oder spezielle Komponenten oder Geräte für eine vollständige Abbildung eines Anwendungsfalls fehlten.

Die Fallstudien sollten gemäß Projektauftrag (Leistungsbeschreibung) auch beleuchten, ob die digitale Anwendung ein **Umweltentlastungspotenzial** mit sich bringt. Dies konnte für einige Fallstudien abgeschätzt werden (Fallstudien Videokonferenz, *E-Grocery*, C2C-Plattform unter der Voraussetzung der Verlängerung von Produktlebenszyklen). Besonders für die Fallstudien Carsharing und digitale Medien war eine eindeutige Aussage nicht möglich, da hier u. a. Reboundeffekte die positiven Umweltwirkungen aufzehren können oder bestimmte Voraussetzungen erfüllt sein müssen, damit die Anwendung Nachhaltigkeitseffekte hervorbringt. Für andere Fallstudien musste festgestellt werden, dass der hier betrachtete Anwendungsfall meist lediglich der Komfortsteigerung, einem Hobby oder einer an sich neuen Anwendung bzw. Funktion dient (Fallstudien Smart-Home in den meisten Szenarien, 3D Druck, E-Sports, E-Health und Kryptowährungen). In Bezug auf den Ressourcenbedarf und die Umweltwirkungen ließen sich aus diesen Fallstudien keine Vorteile durch die digitalen Anwendungen erkennen; sie sind insgesamt mit einem Ressourcenmehraufwand bzw. erhöhtem Einfluss auf die Umwelt verbunden. Daher muss in diesem Kontext auch der **Suffizienzgedanke** der Nachhaltigkeit aufgeführt werden, da die Ergebnisse der Fallstudien zwar einen teils starken Anstieg der Anwendung voraussagen, ein Nutzen für den Ressourcenbedarf und die Umweltschonung aber nicht damit verbunden ist. Dieses Ergebnis unterstützen auch andere Untersuchungen, wie beispielsweise das Forschungsprojekt CO:DINA (Fritzsche *et al.*, 2022). Es darf jedoch angezweifelt werden, dass auf gesteigerten Komfort und neue Möglichkeiten durch die Digitalisierung aus Rücksicht auf Klima und Umwelt verzichtet wird. Der nachhaltigen, ressourcen- und umweltschonenden Ausgestaltung der Digitalisierung kommt in diesen Fällen somit eine noch größere Relevanz zu.

Die Ergebnisse der Betrachtung auf Mikroebene insgesamt dienen der **beispielhaften** Berechnung der Ressourcenintensität für diese spezifischen Anwendungsfälle. Es lassen sich im Rahmen dieser Anwendungsfälle daher Aussagen für eine mögliche zukünftige Skalierung der Anwendung treffen, wie es im Rahmen einiger Fallstudien überschlägig vorgenommen wurde. Die Ergebnisse können jedoch nur wenig Aussagen zur Ressourcenintensität des gesamten Systems Digitalisierung im Kontext gesamtgesellschaftlicher Entwicklungen bilden. Ergänzend zu den hier ermittelten Ergebnissen dienen daher die folgenden Arbeitsergebnisse des Projekts

auf Makroebene, um ein umfassendes Bild der Ressourcenintensität der Digitalisierung in Deutschland zu ermitteln (siehe Kapitel 4 in „Digitalisierung und natürliche Ressourcen - Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland“ (Abraham *et al.*, 2023).

B.4 Life Cycle Inventories für die Fallstudien

Die folgenden Tabellen zeigen die Life Cycle Inventories aller 10 in diesem Vorhaben behandelten Fallstudien. Mit der Hilfe dieser Tabellen können alle Ergebnisse repliziert werden.

B.4.1 Life Cycle Inventory der Fallstudie Videokonferenz (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“)

Tabelle B-91: Life Cycle Inventory der Fallstudie Videokonferenz (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“)

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Herstellung							
Laptop	Deutschland	Anzahl	0.0001	market for computer, laptop	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Smartphone	Deutschland	Anzahl	0.000025	market for consumer electronics, mobile device, smartphone	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Monitor	Deutschland	Anzahl	0.00005	market for display, liquid crystal, 17 inches	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Tastatur	Deutschland	Anzahl	0.00005	market for keyboard	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
PMaus	Deutschland	Anzahl	0.00005	market for pointing device, optical mouse, with cable	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Router	Deutschland	Anzahl	0.000125	market for router, internet	Sekundärdaten	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Nutzung							
Strombedarf Internetnutzung	Deutschland	kWh	0.0054	market group for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Strombedarf Display	Deutschland	kWh	0.0032	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	Deutschland
Strombedarf Router	Deutschland	kWh	0.013	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	Deutschland
Strombedarf Smartphone	Deutschland	kWh	0.0004	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	Deutschland
Strombedarf Laptop	Deutschland	kWh	0.00672	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	Deutschland

B.4.2 Life Cycle Inventory der Fallstudie Smart-Home (Werte für Untersuchungseinheit „Fünffährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“)

Tabelle B-92: Life Cycle Inventory der Fallstudie Smart-Home (Werte für Untersuchungseinheit „Fünffährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“)

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Herstellung							
Feldgeräte							
Bewegungsmelder, Feuchtigkeitssensor, Temperatursensor							
Aluminium	Deutschland	g	17,82	market for aluminium, primary, ingot aluminium, primary, ingot Cutoff, U - IAI Area, EU27 & EFTA	Sekundär	Eco-invent	EU-27
PVC	Deutschland	g	100	market for polyvinylchloride, bulk polymerised polyvinylchloride, bulk polymerised Cutoff, U - GLO	Sekundär	Eco-invent	Global
Leiterplatte	Deutschland	g	12,92	market for	Sekundär	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
				printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free printed wiring board, surface mounted,			

**Smart plugs
(15 Stück)**

Messing	Deutschland	g	38,25	market for brass brass Cutoff, U - RoW	Sekundär	Eco-invent	Rest der Welt
RFID chip	Deutschland	g	15	market for inductor, miniature radio frequency chip inductor, miniature radio frequency chip Cutoff, U - GLO	Sekundär	Eco-invent	Global
LED	Deutschland	g	15	market for light emitting diode light emitting diode Cutoff, U - GLO	Sekundär	Eco-invent	Global
PVC	Deutschland	g	1.500	market for	Sekundär	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
				polyvinyl chloride, bulk polymerised polyvinyl chloride, bulk polymerised Cutoff, U - GLO			
Leiterplatte	Deutschland	g	193,76	market for printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free Cutoff, U - GLO	Sekundär	Eco-invent	Global

Kommunikationsgerät

Internetzugang	Deutschland	Anzahl	1	market for internet access equipment internet access equipment Cutoff, U - GLO	Sekundär	Eco-invent	Global
Router	Deutschland	Anzahl	1	market for	Sekundär	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
				router, internet router, internet Cutoff, U - GLO			
Smart Meter							
Display	Deutschland	Anzahl	1/17	market for display, liquid crystal, 17 inches display, liquid crystal, 17 inches Cutoff, U - GLO	Sekundär	Eco-invent	Global
Aluminium	Deutschland	kg	0,0143	market for aluminium, primary, ingot aluminium, primary, ingot Cutoff, U - IAI Area, EU27 & EFTA	Sekundär	Eco-invent	EU-27
Kabel	Deutschland	kg	0,005	market for cable, unspecified cable, unspecified Cutoff, U - GLO	Sekundär	Eco-invent	Global
Kupfer	Deutschland	kg	0,0143	market for copper	Sekundär	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
				concentrate, sulfide ore copper concentrate, sulfide ore Cutoff, U - GLO			
Leiterplatte	Deutschland	kg	0,032	market for printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free Cutoff, U - GLO	Sekundär	Eco-invent	Global
Steuerungsg							
erät							
Smartphone	Deutschland	Anzahl	0,043	market for consumer electronics, mobile device, smartphone consumer electronics, mobile device, smartphone Cutoff, U - GLO	Sekundär	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Zusatzausstattung Feldgeräte							
Funkschnittstelle Bewegungssensor, Feuchtigkeitssensor, Temperatursensor							
Kabel	Deutschland	g	5	market for cable, unspecified cable, unspecified Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
RFID Chip	Deutschland	g	1	market for inductor, miniature radio frequency chip inductor, miniature radio frequency chip Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Schnittstelle	Deutschland	g	1	market for integrated circuit, logic type integrated circuit, logic type Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
--------------------------	-----	---------	------	-------------------	---------------------	--------	------------------------

Funkschnittstelle
Heizkörperthermostate (3 Stück)

Display	Deutschland	Anzahl	8/17	market for display, liquid crystal, 17 inches display, liquid crystal, 17 inches Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
RFID Chip	Deutschland	g	8	market for inductor, miniature radio frequency chip inductor, miniature radio frequency chip Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Schnittstelle	Deutschland	g	8	market for integrated circuit, logic type integrated circuit, logic type Cutoff, U - GLO	Sekundär	Eco-invent	Global
Leiterplatte	Deutschland	g	103,37	market for printed	Sekundärdaten	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
				wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb free Cutoff, U - GLO			
Nutzung							
Strombedarf Smart-Home-System	Deutschland	kWh	737,62	market for electricity , low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Deutschland

B.4.3 Life Cycle Inventory der Fallstudie digitale Medien (Werte für „30 Minuten Lesen digitaler Medien“)

Tabelle B-93: Life Cycle Inventory der Fallstudie digitale Medien (Werte für „30 Minuten Lesen digitaler Medien“)

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Endgeräte-Mix							
Herstellung Laptop	Global	Anzahl	3,92E-5	market for computer, laptop	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Herstellung Smartphone	Global	Anzahl	9,42E-5	market for consumer electronics, mobile device, smartphone	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Herstellung Tablet	Global	Anzahl	3,79E-5	market for consumer electronics, mobile device, tablet	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Herstellung Router	Global	Anzahl	6,26E-5	market for router, internet	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Strombedarf Endgeräte	Deutschland	kWh	2,25E-3	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	DE
Strombedarf Router	Deutschland	kWh	6,50E-3	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	DE
Strombedarf Rechenzentrum	Deutschland	kWh	5,00E-3	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	DE
Strombedarf Übertragungsnetz	Deutschland	kWh	8,00E-6	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	DE
Laptop							

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Herstellung Laptop	Global	Anzahl	1,10E-4	market for computer, laptop	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Herstellung Router	Global	Anzahl	6,26E-5	market for router, internet	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Strombedarf Endgerät	Deutschland	kWh	4,20E-3	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE
Strombedarf Router	Deutschland	kWh	6,50E-3	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE
Strombedarf Rechenzentrum	Deutschland	kWh	5,00E-3	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE
Strombedarf Übertragungsnetz	Deutschland	kWh	8,00E-6	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE

Smartphone

Herstellung Smartphone	Global	Anzahl	1,98E-4	market for consumer electronics, mobile device, smartphone	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Herstellung Router	Global	Anzahl	6,26E-5	market for router, internet	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Strombedarf Endgerät	Deutschland	kWh	1,00E-3	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE
Strombedarf Router	Deutschland	kWh	6,50E-3	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE
Strombedarf Rechenzentrum	Deutschland	kWh	5,00E-3	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Strombedarf Übertragungsnetz	Deutschland	kWh	8,00E-6	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE
Tablet							
Herstellung Tablet	Global	Anzahl	2,27E-4	market for consumer electronics, mobile device, tablet	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Herstellung Router	Global	Anzahl	6,26E-5	market for router, internet	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Strombedarf Endgerät	Deutschland	kWh	1,6E-3	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE
Strombedarf Router	Deutschland	kWh	6,50E-3	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE
Strombedarf Rechenzentrum	Deutschland	kWh	5,00E-3	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE
Strombedarf Übertragungsnetz	Deutschland	kWh	8,00E-6	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE

B.4.4 Life Cycle Inventory der Fallstudie *E-Grocery* (Werte für „Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“)

Tabelle B-94: Life Cycle Inventory der Fallstudie *E-Grocery* (Werte für „Online-Lebensmitteleinkauf“)

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
--------------------------	-----	---------	------	-------------------	---------------------	--------	------------------------

Ressourcenschonendes Szenario

Energiebedarf Lager	Deutschland	kWh	6,575	market for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutschland
Papiertüten	Deutschland	kg	0,24	market for kraft paper	Sekundär-daten	Eco-invent	Europa
Strombedarf Endgeräte Nutzer	Deutschland	kWh	0,00385	market for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutschland
Strombedarf Endgeräte Einzelhandel	Deutschland	kWh	0,02892	market for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutschland
Strombedarf Internetnutzung	Global	kWh	0,00015	market group for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Global
Transport Lieferwagen (elektrisch)	Deutschland	m	3000	market for transport, passenger car, electric	Sekundär-daten	Eco-invent	Global
Abfallbehandlung Papiertüten	Deutschland	kg	0,24	market for waste paperboard	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutschland

Ressourcenintensives Szenario

Energiebedarf Lager	Deutschland	kWh	26,301	market for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutschland
Papiertüten	Deutschland	kg	0,48	market for kraft paper	Sekundär-daten	Eco-invent	Europa

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Strombedarf Endgeräte Nutzer	Deutschland	kWh	0,01928	market for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutschland
Strombedarf Endgeräte Einzelhandel	Deutschland	kWh	0,05785	market for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutschland
Strombedarf Internetnutzung	Global	kWh	0,00300	market group for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Global
Stromversorgung Gabelstapler	Deutschland	kWh	0,37500	market for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutschland
Stromversorgung Kommissionierer	Deutschland	kWh	0,23333	market for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutschland
Transport Lieferwagen (elektrisch)	Deutschland	m	3000	market for transport, passenger car, electric	Sekundär-daten	Eco-invent	Global
Abfallbehandlung Papiertüten	Deutschland	kg	0,48	market for waste paperboard	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutschland

B.4.5 Life Cycle Inventory der Fallstudie Carsharing (Werte für Untersuchungseinheit „Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“)

Tabelle B-95: Life Cycle Inventory der Fallstudie Carsharing (Werte für Untersuchungseinheit „Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“)

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Herstellung							
Smartphone	Deutschland	Anzahl	0.000025	market for consumer electronics, mobile	Sekundär-daten	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
				device, smartphone			
NMC 111 Li-Ionen Batterie	Deutschland	Kg/ Auto	222,625	market for battery, Li-ion, NMC111, rechargeable, prismatic battery, Li-ion, NMC111, rechargeable, prismatic Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
NMC 811 Li-Ionen Batterie	Deutschland	Kg/ Auto	222,625	market for battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic battery, Li-ion, NMC811, rechargeable, prismatic Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Auto exkl. Batterie	Deutschland	Kg/ Auto	938,0	passenger car production, electric, without battery passenger car, electric, without battery Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Nutzung							
Strombedarf Elektroauto mit NMC Li-Ionen Batterie (Szenario 1)	Deutschland	kWh	0,315	market for electricity, low voltage, renewable energy products electricity,	Sekundärdaten	Eco-invent	CH

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
				low voltage, renewable energy products Cutoff, U			
Strombedarf Elektroauto mit NMC Lilonen Batterie (Szenario 2)	Deutschland	kWh	0,315	market group for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Strombedarf Smartphone	Deutschland	kWh	0,00018823	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Deutschland
Strombedarf Mobiles Internet (LTE) (Freischalten, Bezahlen und Abstellen)	Deutschland	kWh	0,00002522	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Deutschland
Strombedarf Rechenzentren (Datenspeicherung)	Deutschland	kWh	0,00039	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Deutschland
Strombedarf Mobiles Internet (LTE) (Fahrt)	Deutschland	kWh	0,0001791	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Deutschland

B.4.6 Life Cycle Inventory der Fallstudie Kryptowährung (Werte für Untersuchungseinheit „Ein Jahr Betrieb“)

Tabelle B-96: Life Cycle Inventory der Fallstudie Kryptowährung (Werte für Untersuchungseinheit „Ein Jahr Betrieb“)

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Standard Szenario							
Stromanteil Nuklear	Global	kWh	9.429.760.000	electricity production,	Sekundärdaten	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
				nuclear, pressure water reactor			
Stromanteil Gas	Global	kWh	22.690.360.000	electricity production, natural gas, combined cycle power plant	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Stromanteil Kohle	Global	kWh	22.322.010.000	electricity production, hard coal	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Stromanteil Wasserkraft	Global	kWh	12.155.550.000	electricity production, hydro, run-of-river	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Stromanteil Öl	Global	kWh	663.030.000	electricity production, oil	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Stromanteil Andere Erneuerbare	Global	kWh	6.409.290.000	electricity, high voltage, renewable energy products, production mix	Sekundärdaten	Eco-invent	Schweiz
Mining Hardware	Global	Anzahl	3.638.053	market for computer, desktop, without screen	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Entsorgung Mining Hardware	Global	kg	41.110.000	treatment of used desktop computer, mechanical treatment	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Szenario Hoher Strombedarf							

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Stromanteil Nuklear	Global	kWh	12.346.880.000	electricity production, nuclear, pressure water reactor	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Stromanteil Gas	Global	kWh	29.709.680.000	electricity production, natural gas, combined cycle power plant	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Stromanteil Kohle	Global	kWh	29.227.380.000	electricity production, hard coal	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Stromanteil Wasserkraft	Global	kWh	15.915.900.000	electricity production, hydro, run-of-river	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Stromanteil Öl	Global	kWh	868.140.000	electricity production, oil	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Stromanteil Andere Erneuerbare	Global	kWh	8.392.020.000	electricity, high voltage, renewable energy products, production mix	Sekundärdaten	Eco-invent	CH
Mining Hardware	Global	Anzahl	3.638.053	market for computer, desktop, without screen	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Entsorgung Mining Hardware	Global	kg	41.110.000	treatment of used desktop computer, mechanical treatment	Sekundärdaten	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
--------------------------	-----	---------	------	-------------------	---------------------	--------	------------------------

**Szenario
Länder-
Strommix**

Stromanteil Kasachstan	Global	kWh	13.334.270.000	market for electricity, high voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	KZ
Stromanteil Amerika	Global	kWh	26.079.180.000	market group for electricity, high voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	US
Stromanteil Russland	Global	kWh	8.273.141.000	market for electricity, high voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	RU
Stromanteil Malaysia	Global	kWh	3.381.453.000	market for electricity, high voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	MY
Stromanteil Deutschland	Global	kWh	3.300.416.000	market for electricity, high voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Deutschland
Stromanteil Kanada	Global	kWh	7.035.485.000	market group for electricity, high voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	CA
Stromanteil sonstige Länder	Global	kWh	7.683.781.000	market group for electricity, high voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Stromanteil Iran	Global	kWh	2.291.137.000	market for electricity, high voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	IR
Stromanteil Irland	Global	kWh	2.291.137.000	market for electricity, high voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	IE

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
				electricity, high voltage Cutoff, U - IR			
Mining Hardware	Global	Anzahl	3.638.053	market for computer, desktop, without screen	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Entsorgung Mining Hardware	Global	kg	41.110.000	treatment of used desktop computer, mechanical treatment	Sekundärdaten	Eco-invent	Global

B.4.7 Life Cycle Inventory der Fallstudie Consumer-to-Consumer Plattform (Werte für Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“)

Tabelle B-97: Life Cycle Inventory der Fallstudie Consumer-to-Consumer Plattform (Werte für Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“)

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Produktsystem Nutzer							
Laptop	Deutschland	Anzahl	5,4882E-5	market for computer , laptop	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Smart-phone	Deutschland	Anzahl	9,9128E-5	market for consumer electronics, mobile device, smartpho ne	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Tablet	Deutschland	Anzahl	1,13523E-4	market for	Sekundärdaten	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
				consumer electronics, mobile device, tablet			
Desktop Computer	Deutschland	Anzahl	9,9332E-5	market for computer, desktop, without screen	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Monitor	Deutschland	Anzahl	9,9332E-5	market for display, liquid crystal, 17 inches	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Tastatur	Deutschland	Anzahl	9,9332E-5	market for keyboard	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
PMaus	Deutschland	Anzahl	9,9332E-5	market for pointing device, optical mouse, with cable	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Router	Deutschland	Anzahl	1,64835E-4	market for router, internet	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Strombedarfe							
Strombedarf Übertragungsnetzwerk	Deutschland	kWh	0,0436	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE
Strombedarf Rechenzentrum	Deutschland	kWh	0,0654	market for electricity	Sekundärdaten	Ecoinvent	DE

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
				, low voltage			
Strombedarf Endgeräte	Deutschland	kWh	0,0314	market for electricity , low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	DE
Transport und Verpackung							
Versandkarton	Deutschland	kg	0,1	market for corrugated board box + market for waste paperboard	Sekundärdaten	Eco-invent	Europa + DE
Transport	Deutschland	t*km	0,075	market for transport, freight, lorry 3.5-7.5 metric ton, EURO6	Sekundärdaten	Eco-invent	Europa

Abweichungen Szenario RZ₂₀₁₁

Strombedarf Übertragungsnetzwerk	Deutschland	kWh	0,436	market for electricity , low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	DE
Strombedarf Rechenzentrum	Deutschland	kWh	0,654	market for electricity , low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	DE

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Abweichungen Szenario Abholung							
Versandkarton	Deutschland	kg	0	market for corrugated board box + market for waste paperboard	Sekundärdaten	Eco-invent	Europa + DE
Transport	Deutschland	km	10,00	market for transport, passenger car, EURO 5	Sekundärdaten	Eco-invent	Europa

B.4.8 Life Cycle Inventory der Fallstudie E-Sport (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“)

Tabelle B-98: Life Cycle Inventory der Fallstudie E-Sport (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“)

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Herstellung							
Laptop	Deutschland	Anzahl	0,000452	market for computer, laptop	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Smartphone	Deutschland	Anzahl	0,000084	market for consumer electronics, mobile device, smartphone	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Monitor	Deutschland	Anzahl	0,000188	market for display, liquid crystal, 17 inches	Sekundärdaten	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Tastatur	Deutschland	Anzahl	0,001541	market for keyboard	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
PMaus	Deutschland	Anzahl	0,002	market for pointing device, optical mouse, with cable	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Router	Deutschland	Anzahl	0,000159	market for router, internet	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Tablet	Deutschland	Anzahl	0,000091	market for consumer electronics, mobile device, tablet	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Smart-TV	Deutschland	Anzahl	0,000011	market for television	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Nutzung							
Strombedarf Internetnutzung (Gaming)	Niederlande	kWh	0,00088	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Niederlande
Strombedarf Internetnutzung (Streaming)	Deutschland	kWh	0,012468	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Deutschland
Strombedarf Endgeräte (Gaming)	Deutschland	kWh	4,1384	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Deutschland
Strombedarf Endgeräte (Streaming)	Deutschland	kWh	0,071911	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Deutschland
Strombedarf Rechenzenter (Gaming)	Deutschland	kWh	0,041	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Deutschland
Strombedarf Rechenzenter (Streaming)	Deutschland	kWh	0,015830	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Deutschland

B.4.9 Life Cycle Inventory der Fallstudie 3D Druck (Werte für Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“)

Tabelle B-99: Life Cycle Inventory der Fallstudie 3D Druck (Werte für Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“)

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geo-grafische Abdeckung
Herstellung							
Druckkopf							
Aluminium	Deutschland	kg	0,05	market for aluminium, primary, ingot aluminium, primary, ingot Cutoff, U - IAI Area, EU27 & EFTA	Sekundärdaten	Eco-invent	EU-27
Kabel	Deutschland	kg	0,02	market for cable, unspecified cable, unspecified Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Messing	Deutschland	kg	0,02	market for brass brass Cutoff, U - RoW	Sekundärdaten	Eco-invent	Rest der Welt
Stahl	Deutschland	kg	0,05	market for steel, low-alloyed, hot rolled steel, low-alloyed, hot rolled	Sekundärdaten	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geo-grafische Abdeckung
				Cutoff, U - GLO			

Drucktisch

Aluminium	Deutschland	kg	1,3068	market for aluminium, primary, ingot aluminium, primary, ingot Cutoff, U - IAI Area, EU27 & EFTA	Sekundär	Ecoinvent	EU-27
-----------	-------------	----	--------	--	----------	-----------	-------

Filamentspule

ABS	Deutschland	kg	1	market for acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer acrylonitrile-butadiene-styrene copolymer Cutoff, U - GLO	Sekundär	Ecoinvent	Global
PC	Deutschland	kg	1	market for polycarbonate polycarbonate Cutoff, U - GLO	Sekundär	Ecoinvent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geo-grafische Abdeckung
Netzteil							
Kabel	Deutschland	kg	0,1	market for cable, unspecified cable, unspecified Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Netzteil	Deutschland	Anzahl	1	market for power supply unit, for desktop computer power supply unit, for desktop computer Cutoff, U - GLO	Sekundär	Ecoinvent	Global

Rahmen

Aluminium	Deutschland	kg	1	market for aluminium, primary, ingot aluminium, primary, ingot Cutoff, U - IAI Area, EU27 & EFTA	Sekundär	Ecoinvent	EU-27
Glas	Deutschland	kg	0,5	market for flat glass, uncoated flat glass,	Sekundärdaten	Ecoinvent	Rest der Welt

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geo-grafische Abdeckung
				uncoated Cutoff, U - RoW			
Kabel	Deutschland	kg	0,1	market for cable, unspecified cable, unspecified Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
PC	Deutschland	kg	0,2	market for polycarbonate polycarbonate Cutoff, U - GLO	Sekundär	Ecoinvent	Global
Stahl	Deutschland	kg	1	market for steel, low-alloyed, hot rolled steel, low-alloyed, hot rolled Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global

Steuereinheit

Display	Deutschland	kg	0,6	market for display, liquid crystal, 17 inches display, liquid crystal, 17 inches Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
---------	-------------	----	-----	--	---------------	-----------	--------

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geo-grafische Abdeckung
Kabel	Deutschland	kg	0,1	market for cable, unspecified cable, unspecified Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Leiterplatte	Deutschland	kg	0,00494	market for printed wiring board, for surface mounting, Pb free surface printed wiring board, for surface mounting, Pb free surface Cutoff, U - GLO	Sekundär	Ecoinvent	Global
PC	Deutschland	kg	0,1	market for polycarbonate polycarbonate Cutoff, U - GLO	Sekundär	Ecoinvent	Global
Vorschubmotor							
PC	Deutschland	kg	0,05	market for polycarbonate polycarbonate Cutoff, U - GLO	Sekundär	Ecoinvent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geo-grafische Abdeckung
Stahl	Deutschland	kg	0,1	market for steel, low-alloyed, hot rolled steel, low-alloyed, hot rolled Cutoff, U - GLO	Sekundärdaten	Eco-invent	Global

Nutzung

Strombedarf 3D Drucker	Deutschland	kWh	11,55	market for electricity , low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Deutschland
------------------------	-------------	-----	-------	--------------------------------------	---------------	------------	-------------

B.4.9.1 Life Cycle Inventory der Fallstudie E-Heath (Werte für Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“)

Tabelle B-100: Life Cycle Inventory der Fallstudie E-Heath (Werte für Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“)

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Herstellung Smartwatch							
Batterie	Deutschland	g	5	market for battery, Li-ion, NCA, rechargeable , prismatic battery, Li-ion, NCA, rechargeable , prismatic Cutoff, U	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Glas	Deutschland	g	5	market for diode, glass-, for surface-mounting diode, glass-, for surface-mounting Cutoff, U	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Energiebedarf Produktion	Deutschland	kWh	0,44	market for electricity, low voltage	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Elektronik	Deutschland	An-zahl	0.000 025	market for electronic component, passive, unspecified electronic component, passive, unspecified Cutoff, U	Sekundärdaten	Eco-invent	Global
Magnet	Deutschland	g	1	market for permanent magnet, for electric motor permanent	Sekundärdaten	Eco-invent	Global

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
				magnet, for electric motor Cutoff, U			
Plastik	Deutschland	g	35	market for polycarbonate polycarbonate Cutoff, U	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Leiterplatte	Deutschland	g	6	market for printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb containing printed wiring board, surface mounted, unspecified, Pb containing Cutoff, U	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Keramik	Deutschland	g	5	market for sanitary ceramics sanitary ceramics Cutoff, U	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Aluminium	Deutschland	g	5	market for sheet rolling, aluminium sheet rolling, aluminium Cutoff, U	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Stahl	Deutschland	g	8	market for sheet rolling, steel sheet rolling, steel Cutoff, U	Sekundärdaten	Ecoinvent	Global
Herstellung							

Teil des Anwendungsfalls	Ort	Einheit	Wert	Datenbank Prozess	Datenklassifikation	Quelle	Geografische Abdeckung
Smartphone	Deutschland	An-zahl	0,000 6088	market for consumer electronics, mobile device, smartphone	Sekundär-daten	Eco-invent	Global
Nutzung							
Strombedarf Smartwatch, Energiebedarf App	Deutschland	kWh	0,000 448	market for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	CH
Strombedarf Smartwatch/-phone, Energiebedarf Datenübertragung	Deutschland	kWh	0,005 4	market group for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Global
Strombedarf Smartphone	Deutschland	kWh	0,032	market for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutsch-land
Strombedarf wireless charging	Deutschland	kWh	0,003 5	market for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutsch-land
Strombedarf Rechenzentren (Datenspeicherung)	Deutschland	kWh	0,065 6	market for electricity, low voltage	Sekundär-daten	Eco-invent	Deutsch-land

B.5 Contribution Analysis für die Fallstudien

B.5.1 Contribution Analysis für die Fallstudie Videokonferenz im Homeoffice

B.5.1.1 Herstellungsphase

Tabelle B-101: Contribution Analysis für die Herstellungsphase der Fallstudie Videokonferenz im Homeoffice (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Laptop	Smartphone	Display	Tastatur	PMaus	Router
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,10	29%	1%	34%	3%	1%	32%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,11	29%	1%	35%	3%	1%	31%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,05	33%	2%	35%	3%	1%	26%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	0,75	34%	2%	34%	3%	1%	27%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,001	58%	2%	17%	2%	0%	22%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,004	27%	1%	43%	4%	1%	24%

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

B.5.1.2 Nutzungsphase

Tabelle B-102: Contribution Analysis für die Nutzungsphase der Fallstudie Videokonferenz im Homeoffice (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde Videokonferenz“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Leistungsaufnahme Endgeräte	Leistungsaufnahme Internetnutzung
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,016	81%	19%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,021	82%	18%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,019	63%	37%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	0,277	22%	78%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,0001	69%	31%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,0008	70%	30%

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

B.5.2 Contribution Analysis für die Fallstudie Smart-Home-System

B.5.2.1 Herstellungsphase

Tabelle B-103: Contribution Analysis für die Herstellungsphase der Fallstudie Smart-Home-System (Werte für Untersuchungseinheit „Fünfstufige Nutzung eines Smart-Home-Systems“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Smart meter	Feldgeräte	Schnittstelle Feldgeräte	Kommunikationsgerät	Steuerungsgerät
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	922,03	7%	17%	45%	30%	1%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	1.036,34	7%	17%	46%	29%	1%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	438,37	7%	18%	49%	25%	1%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	6.556	6%	19%	48%	26%	1%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	4,51	6%	22%	40%	31%	1%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	33,27	7%	15%	54%	23%	1%

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

B.5.2.2 Nutzungsphase

Tabelle B-104: Contribution Analysis für die Nutzungsphase der Fallstudie Smart-Home-System (Werte für Untersuchungseinheit „Fünfjährige Nutzung eines Smart-Home-Systems“)

Indikator	Einheit	Gesamt
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	403,23
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	532,48
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	376,69
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	34419
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	2,02
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	17,96

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

B.5.3 Contribution Analysis für die Fallstudie digitale Medien

B.5.3.1 Mix Szenario

Tabelle B-105: Contribution Analysis für das Mix Szenario der Fallstudie digitale Medien (Werte für „30 Minuten Lesen digitaler Medien“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Herstellung Endgerätemix	Energiebedarf Router	Energiebedarf Rechenzentrum	Energiebedarf Endgerätemix	Energiebedarf Übertragungsnetzwerk
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,047	84%	7%	6%	3%	0%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,055	82%	8%	7%	3%	0%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,029	76%	11%	9%	4%	0%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	0,47	70%	14%	11%	5%	0%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,00045	92%	4%	3%	1%	0%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,0016	78%	10%	8%	4%	0%

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

B.5.3.2 Laptop Szenario

Tabelle B-106: Contribution Analysis für das Laptop Szenario der Fallstudie digitale Medien (Werte für „30 Minuten Lesen digitaler Medien“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Herstellung Laptop & Router	Energiebedarf Router	Energiebedarf Rechenzentrum	Energiebedarf Endgerätemix	Energiebedarf Übertragungsnetzwerk
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,020	68%	13%	10%	9%	0%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,024	66%	14%	11%	9%	0%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,035	77%	10%	7%	6%	0%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	0,56	71%	12%	9%	8%	0%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,00063	93%	3%	2%	2%	0%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,0021	81%	8%	6%	5%	0%

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

B.5.3.3 Smartphone Szenario

Tabelle B-107: Contribution Analysis für das Smartphone Szenario der Fallstudie digitale Medien (Werte für „30 Minuten Lesen digitaler Medien“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Herstellung Smartphone & Router	Energiebedarf Router	Energiebedarf Rechenzentrum	Energiebedarf Endgerätemix	Energiebedarf Übertragungsnetzwerk
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,013	61%	20%	16%	3%	0%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,016	60%	21%	16%	3%	0%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,023	72%	15%	11%	2%	0%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	0,37	66%	18%	13%	3%	0%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,00028	88%	6%	5%	1%	0%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,0012	75%	13%	10%	2%	0%

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

B.5.3.4 Tablet Szenario

Tabelle B-108: Contribution Analysis für das Tablet Szenario der Fallstudie digitale Medien (Werte für „30 Minuten Lesen digitaler Medien“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Herstellung Tablet & Router	Energiebedarf Router	Energiebedarf Rechenzentrum	Energiebedarf Endgerätemix	Energiebedarf Übertragungsnetzwerk
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,019	72%	14%	11%	3%	0%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,023	71%	14%	11%	4%	0%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,035	81%	10%	7%	2%	0%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	0,56	74%	13%	10%	3%	0%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,00054	93%	3%	3%	1%	0%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,0017	81%	10%	7%	2%	0%

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

B.5.4 Contribution Analysis für die Fallstudie *E-Grocery*: Online-Lebensmittelhandel

B.5.4.1 Optimistisches Szenario

Tabelle B-109: Contribution Analysis für das Optimistische Szenario der Fallstudie *E-Grocery*: Online-Lebensmittelhandel (Werte für „*E-Grocery*: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Kundenseite	Datentransfer	Lager	Logistik und Geräte	Verpackung	Lieferung
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	5,57	0%	0%	64%	0%	13%	23%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	7,39	0%	0%	64%	0%	15%	21%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	82,47	0%	0%	81%	0%	3%	16%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	4,17	0%	0%	74%	0%	13%	13%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,023	0%	0%	78%	0%	8%	14%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	1,58	0%	0%	10%	0%	87%	3%

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

B.5.4.2 Konservatives Szenario

Tabelle B-110: Contribution Analysis für das Optimistische Szenario der Fallstudie *E-Grocery* (Werte für „*E-Grocery: Online-Lebensmittelhandel-Einkauf*“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Kundenseite	Datentransfer	Lager	Logistik und Geräte	Verpackung	Lieferung
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	17,22	0%	0%	84%	2%	8%	6%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	22,92	0%	0%	83%	2%	9%	6%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	286,25	0%	0%	89%	3%	2%	6%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	15,11	0%	0%	85%	2%	8%	5%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,079	0%	0%	91%	2%	5%	2%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	3,45	0%	0%	19%	0%	80%	1%

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

B.5.5 Contribution Analysis für die Fallstudie Carsharing

B.5.5.1 Herstellungsphase

Tabelle B-111: Contribution Analysis für die Herstellungsphase der Fallstudie Carsharing (Werte für Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Li-NMC Batterien	Auto (exkl. Batterie)	Smartphone
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,26	68,66%	31,33%	0,01%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,33	51,91%	42,46%	0,03%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,07	51,58%	48,4%	0,03%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	1,38	62,63%	37,34%	0,03%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,0006	63,56%	36,37%	0,07%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,0049	58,34%	41,65%	0,01%

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

B.5.5.2 Nutzungsphase

B.5.5.2.1 Szenario 1 - Grünstrom

Tabelle B-112: Contribution Analysis für die Nutzungsphase in dem Grünstrom Szenario der Fallstudie Carsharing (Werte für Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Stromverbrauch Auto	Stromverbrauch Smartphone	Datenspeicherung und -übertragung
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,0276	98,45%	0,37%	1,17%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,0304	98,14%	0,45%	1,42%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,0055	92,72%	1,75%	5,53%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	1,2907	99,44%	0,13%	0,43%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,0	92,68%	1,76%	5,56%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,0013	97,67%	0,36%	1,97%

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

B.5.5.2.2 Szenario 2 - Konventioneller Strommix

Tabelle B-113: Contribution Analysis für die Nutzungsphase in dem konventionellem Strommix Szenario der Fallstudie Carsharing (Werte für Untersuchungseinheit „Carsharing: Ein Kilometer Fahrt im Elektroauto“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Stromverbrauch Auto	Stromverbrauch Smartphone	Datenspeicherung und -übertragung
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,17	99,75%	0,05%	0,18%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,23	98,14%	0,45%	1,52%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,16	99,75%	0,05%	0,18%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	2,52	99,71%	0,07%	0,22%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,0	99,75%	0,05%	0,18%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,01	99,75%	0,05%	0,18%

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

B.5.6 Contribution Analysis für die Fallstudie Kryptowährung

B.5.6.1 Szenario 1

Tabelle B-114: Contribution Analysis für das Szenario 1 der Fallstudie Kryptowährung (Werte für Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Elektrizität zum Betrieb des Bitcoin Netzwerks	Herstellung und Entsorgung der Hardware
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	38129600000	95%	5%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	44777900000	95%	5%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	33722700000	98%	2%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	641262941200	98%	2%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	159821000	88%	12%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	618264000	90%	10%

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

B.5.6.2 Szenario 2

Tabelle B-115: Contribution Analysis für das Szenario 2 der Fallstudie Kryptowährung (Werte für Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Energie zum Betrieb des Bitcoin Netzwerks	Herstellung und Entsorgung der Hardware
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	49333000000	96%	4%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	57954300000	96%	4%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	43904400000	98%	2%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	835917935140	99%	1%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	203562000	91%	9%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	790334000	92%	8%

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

B.5.6.3 Szenario 3

Tabelle B-116: Contribution Analysis für das Szenario 3 der Fallstudie Kryptowährung (Werte für Untersuchungseinheit „Kryptowährung: Ein Jahr Betrieb“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Energie zum Betrieb des Bitcoin Netzwerks	Herstellung und Entsorgung der Hardware
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	31952900000	94%	6%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	41398100000	95%	5%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	45733100000	98%	2%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	777614114880	98%	2%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	226883000	92%	8%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	1602327000	96%	4%

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

B.5.7 Contribution Analysis für die Fallstudie Consumer-to-Consumer-Plattform

B.5.7.1 Szenario RZ_{effizient}

Tabelle B-117: Contribution Analysis für das RZ_{effizient} der Fallstudie Consumer-to-Consumer-Plattform (Werte für Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Produkt-system Nutzer	Versand-karton	Transport Paket	Energiebedarf Rechenzentrum	Energiebedarf Übertragungsnetz	Leistungs-aufnahme Endgeräte
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,46	43%	31%	9%	8%	5%	4%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,58	40%	34%	9%	8%	5%	4%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,31	32%	33%	12%	11%	7%	5%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	5,77	23%	45%	5%	13%	8%	6%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,0049	31%	61%	1%	3%	2%	2%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,12	20%	64%	10%	3%	2%	1%

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

B.5.7.2 Szenario RZ₂₀₁₁

Tabelle B-118: Contribution Analysis für das RZ₂₀₁₁ Szenario der Fallstudie Consumer-to-Consumer-Plattform (Werte für Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Produkt-system Nutzer	Versand-karton	Transport Paket	Energiebedarf Rechenzentrum	Energiebedarf Übertragungsnetz	Leistungs-aufnahme Endgeräte
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,10	20%	14%	4%	36%	24%	2%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	1,28	18%	15%	4%	37%	24%	2%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,81	12%	12%	5%	41%	28%	2%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	1,49	10%	31%	2%	33%	22%	2%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,0076	20%	39%	1%	23%	16%	1%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,15	13%	51%	6%	17%	12%	1%

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

B.5.7.3 Szenario Abholung

Tabelle B-119: Contribution Analysis für das Abholung Szenario der Fallstudie Consumer-to-Consumer-Plattform (Werte für Untersuchungseinheit „C2C-Plattform: Onlinekauf eines T-Shirts“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Transport PKW	Produktsystem Nutzer	Energiebedarf Rechenzentrum	Energiebedarf Übertragungsnetz	Leistungsaufnahme Endgeräte
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	3,91	93%	5%	1%	1%	0%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	4,64	93%	5%	1%	1%	0%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	3,33	95%	3%	1%	1%	0%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	50,63	79%	8%	6%	4%	3%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,0064	71%	23%	3%	2%	1%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,14	89%	7%	2%	1%	1%

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

B.5.8 Contribution Analysis für die Fallstudie E-Sport

B.5.8.1 Herstellungsphase

Tabelle B-120: Contribution Analysis für die Herstellungsphase der Fallstudie E-Sport (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Monitor	Laptop	Computer	Tablet	Smart TV	Smartphone	Tastatur	Mouse	Router
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,73	17%	18%	37%	1%	3%	0%	14%	4%	6%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,83	18%	18%	37%	1%	2%	0%	14%	4%	5%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,34	19%	22%	35%	2%	1%	1%	13%	4%	5%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	5,17	18%	22%	33%	2%	1%	1%	14%	4%	5%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,006	8%	33%	43%	3%	1%	1%	7%	2%	3%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,0265	17%	17%	37%	1%	3%	0%	14%	4%	6%

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

B.5.8.2 Nutzungsphase

Tabelle B-121: Contribution Analysis für die Nutzungsphase der Fallstudie E-Sport (Werte für Untersuchungseinheit „Eine Stunde E-Sport“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Leistungsaufnahme Endgeräte	Leistungsaufnahme Internetnutzung + Rechenzentren
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	2,34	99%	1%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	3,09	99%	1%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	2,19	98%	2%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	39,8	99%	1%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,012	99%	1%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,0008	99%	1%

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

B.5.9 Contribution Analysis für die Fallstudie privater 3D-Druck

B.5.9.1 Herstellungsphase

Tabelle B-122: Contribution Analysis für die Herstellungsphase der Fallstudie privater 3D-Druck (Werte für Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Druckkopf	Drucktisch	Filamentspule	Netzteil	Rahmen	Steuereinheit	Vorschubmotor
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	347,43	2,11%	14,84%	1,03%	38,41%	16,78%	26,62%	0,21%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	429,64	2,02%	18,92%	0,99%	33,62%	19,60%	24,61%	0,24%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ - Äq.	142,19	1,03%	20,59%	4,42%	23,90%	19,26%	30,34%	0,46%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	2.117,52	1,02%	19,62%	5,58%	25,70%	18,30%	29,36%	0,43%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	1,03	0,97%	23,3%	0,97%	25,24%	19,42%	30,10%	0,97%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	8,80	1,02%	10,34%	0,57%	33,64%	11,02%	43,41%	0,11%

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

B.5.9.2 Nutzungsphase

Tabelle B-123: Contribution Analysis für die Nutzungsphase der Fallstudie privater 3D-Druck (Werte für Untersuchungseinheit „3D-Druck: 77 Stunden Nutzung“)

Indikator	Einheit	Gesamt
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	6,31
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	8,34
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	5,90
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	107,08
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,03
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,28

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

B.5.10 Contribution Analysis für die Fallstudie E-Health: Smartwatch für digitale Fitness und Gesundheit

B.5.10.1 Herstellungsphase

Tabelle B-124: Contribution Analysis für die Herstellungsphase der Fallstudie E-Health: Smartwatch für digitale Fitness und Gesundheit (Werte für Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“)

Indikator	Einheit	Gesamt	Smartwatch	Smartphone
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,005	89,2%	10,8%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,013	90,56%	9,44%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,00297	82%	18%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	0,046	82%	18%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,000033	70%	30%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,000162	87%	13%

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

B.5.10.2 Nutzungsphase

Tabelle B-125: Contribution Analysis für die Nutzungsphase der Fallstudie E-Health: Smartwatch für digitale Fitness und Gesundheit (Werte für Untersuchungseinheit „E-Health: 16 Stunden Nutzung Smartphone/-watch“)

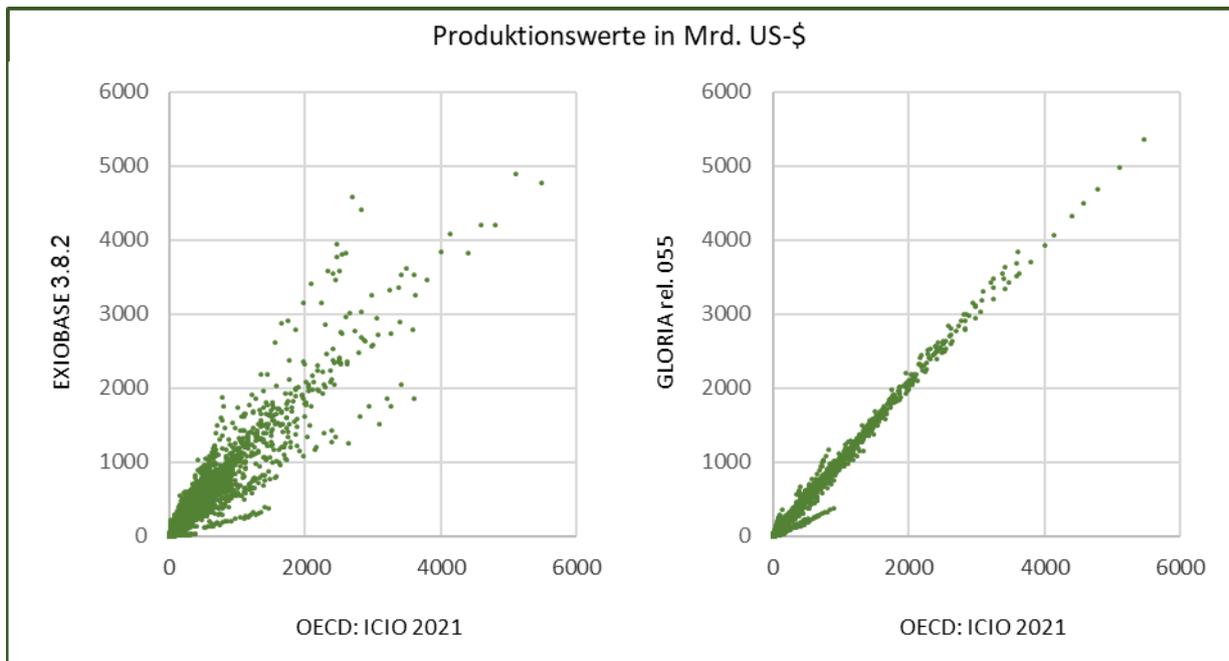
Indikator	Einheit	Gesamt	Leistungsaufnahme Endgeräte	Leistungsaufnahme Datenspeicherung und -übertragung
Primärrohstoffeinsatz (RMI)	kg	0,0534	19,96%	80,04%
Gesamtprimärmaterialaufwand (TMR)	kg	0,071	19,96%	80,04%
Treibhauspotenzial (GWP)	kg CO ₂ -Äq.	0,04988	19,96%	80,04%
Kumulierter Energieaufwand (KEA)	MJ	0,905	16,4%	83,6%
Wasserfußabdruck (WDP)	m ³	0,00027	19,96%	80,04%
Landnutzungspotenzial (LOP)	m ² a	0,00238	19,96%	80,04%

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

C Zur Konzeption von GRAMOD durchgeführte empirische MRIO-Evaluationen

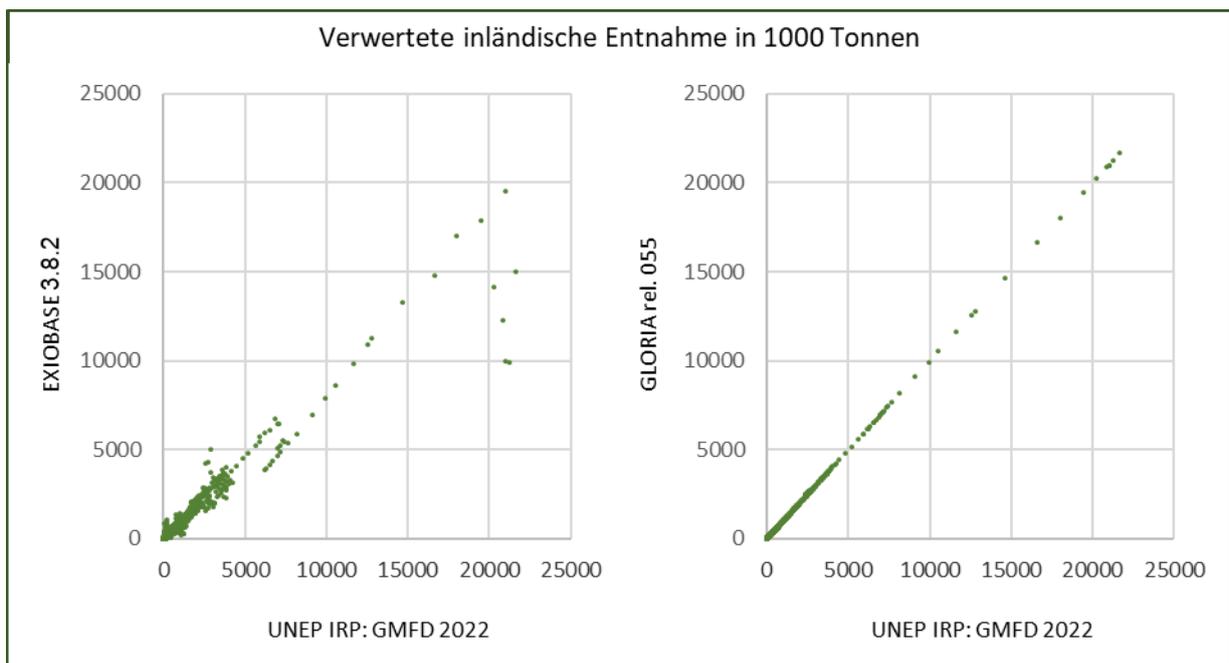
C.1 Evaluation der Anpassungsgüte: EXIOBASE und GLORIA im Vergleich mit OECD-ICIO

Abbildung C-82: Anpassungsgüte der Daten zur Produktion in EXIOBASE und GLORIA



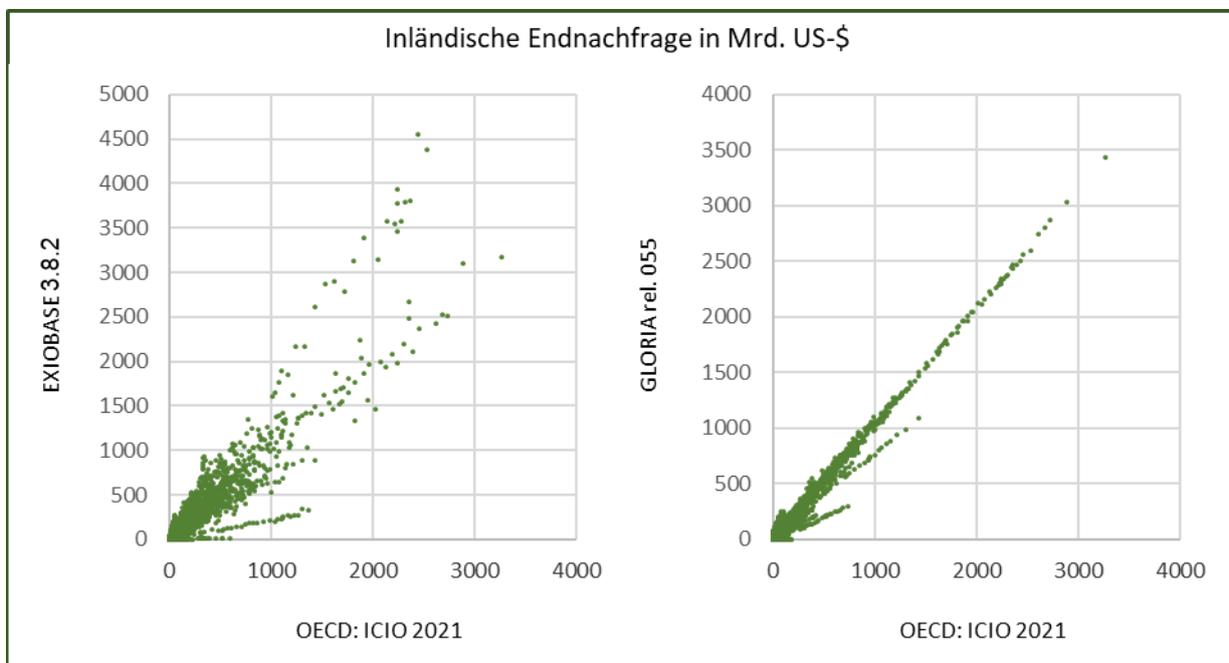
Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, unter Anwendung von EXIOBASE, GLORIA und OECD ICIO

Abbildung C-83: Anpassungsgüte der Daten zur verwerteten inländischen Entnahme von Rohstoffen in EXIOBASE und GLORIA



Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, unter Anwendung von EXIOBASE, GLORIA und OECD ICIO

Abbildung C-84: Anpassungsgüte der Daten zur inländischen Endnachfrage in EXIOBASE und GLORIA



Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, unter Anwendung von EXIOBASE, GLORIA und OECD ICIO

C.2 Aggregation Bias bei Verwendung der Domestic Technology Assumption

Tabelle C-126: Analysefehler bei Anwendung der Domestic Technology Assumption (Tabelle 1)

Analyisierte Wirtschaftszweige des produzierenden Gewerbes	Gesamte incl. Endnachfrage	Inl. IKT-Endnachfrage
Erz. der Land- und Forstwirtschaft, Jagd	76,3	20,2
Fische, Fischereierzeugnisse	55,3	3,2
Kohle, Öl, Gas	144,0	47,0
Erze, Steine und Erden, sonstige Bergbauerzeugnisse	32,5	14,8
Bergbaudienstleistungen	38,6	10,7
Nahrungs- und Futtermittel, Getränke, Tabakerzeugnisse	98,0	30,5
Textilien, Bekleidung, Leder und Lederwaren	68,2	15,6
Holz, Holz-, Flecht-, Korb- und Korkwaren (ohne Möbel)	63,0	68,9
Papier, Pappe und Waren daraus, Druckereileistungen, bespielte Ton-, Bild- und Datenträger	58,3	80,0
Kokerei- und Mineralölerzeugnisse	102,6	38,4
Chemische Erzeugnisse	71,6	42,9
Pharmazeutische Erzeugnisse	99,9	57,7
Gummi- und Kunststoffwaren	84,5	50,7
Glas und Glaswaren, Keramik, bearbeitete Steine und Erden	74,0	53,0
Roheisen, Stahl, NE-Metalle und Halbzeug daraus, Gießereierzeugnisse	84,4	54,0
Metallerzeugnisse	97,4	75,3
Datenverarbeitungsgeräte, elektronische und optische Erzeugnisse	76,4	82,0
Elektrische Ausrüstungen	78,2	39,6
Maschinen	106,8	67,0
Kraftwagen und Kraftwagenteile	114,6	71,3
Sonstige Fahrzeuge	112,9	48,5
Herstellung von Möbeln und sonstigen Waren; Reparatur, Instandhaltung und Installation von Maschinen und Ausrüstungen	110,3	99,9
Elektrischer Strom, Dienstleistungen der Elektrizitäts-, Wärme- und Kälteversorgung, industriell erzeugte Gase, Dienstleistungen der Gasversorgung	117,5	71,1
Wasser, Dienstleistungen der Wasserversorgung, Dienstleistungen der Abwasser-, Abfallentsorgung und Rückgewinnung	135,5	117,4

Hochbauarbeiten, Tiefbauarbeiten, Vorbereitung Baustellen-,
Bauinstallations- und sonstige Ausbauarbeiten

109,7

115,4

Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, unter Anwendung von OECD ICIO

Tabelle C-127: Analysefehler bei Anwendung der Domestic Technology Assumption (Tabelle 2)

Analyisierte Wirtschaftszweige in den Bereichen Handel, Transport und sonstige Dienstleistungen	Gesamte incl. Endnachfrage	Inl. IKT-Endnachfrage
Groß- und Einzelhandelsleistungen, Handelsleistungen mit Kraftfahrzeugen, Instandhaltung und Reparatur an Kraftfahrzeugen	109,0	78,6
Landverkehr und Transportleistungen in Rohrfernleitungen	108,4	67,5
Schifffahrtsleistungen	86,8	39,5
Luftfahrtleistungen	96,3	88,7
Lagereileistungen, sonstige Dienstleistungen für den Verkehr	183,7	143,9
Post-, Kurier- und Expressdienstleistungen	157,2	140,7
Beherbergungs- und Gastronomiedienstleistungen	102,3	63,6
Dienstleistungen des Verlagswesens, Dienstleistungen von audiovisuellen Medien, Musikverlagen und Rundfunkveranstaltern	108,7	80,8
Telekommunikationsdienstleistungen	118,0	101,5
IT- und Informationsdienstleistungen	276,1	109,4
Finanzdienstleistungen, Dienstleistungen von Versicherungen und Pensionskassen, mit Finanz- und Versicherungsdienstleistungen verbundene Dienstleistungen	89,7	68,8
Dienstleistungen des Grundstücks- und Wohnungswesens	102,0	112,8
Dienstleistungen der Rechts-, Steuer- und Unternehmensberatung, Dienstleistungen von Architektur- und Ingenieurbüros und der technischen, physikalischen Untersuchung, Forschungs- und Entwicklungsleistungen, Werbe- und Marktforschungsleistungen, sonstige freiberufliche, wissenschaftliche, technische und veterinärmedizinische Dienstleistungen	107,7	94,0
Dienstleistungen der Vermietung von beweglichen Sachen, Dienstleistungen der Vermittlung und Überlassung von Arbeitskräften, Dienstleistungen von Reisebüros, -veranstaltern und sonstigen Reservierungen, Wach-, Sicherheitsdienstleistungen, wirtschaftliche Dienstleistungen und anderweitig nicht Genannte	126,0	81,7
Dienstleistungen der öffentlichen Verwaltung und der Verteidigung; Dienstleistungen der Sozialversicherung	106,6	136,7
Erziehungs- und Unterrichtsdienstleistungen	112,0	101,8

Analysierte Wirtschaftszweige in den Bereichen Handel, Transport und sonstige Dienstleistungen	Gesamte incl. Endnachfrage	Inl. IKT-Endnachfrage
Dienstleistungen des Gesundheitswesens, Dienstleistungen von Heimen und des Sozialwesens	103,7	53,8
Dienstleistungen der Kunst, der Kultur und des Glücksspiels, Dienstleistungen des Sports, der Unterhaltung und der Erholung	111,7	86,0
Dienstleistungen der Interessenvertretung, kirchliche und sonstige Vereinigungen, Reparaturarbeiten an Datenverarbeitungsgeräten und Gebrauchsgütern, sonstige überwiegend persönliche Dienstleistungen	80,0	92,8

Quelle: Eigene Berechnungen (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, unter Anwendung von OECD ICIO

D Klassifikation der Produktionsbereiche in den MRIO-Datensätzen

Tabelle D-128: Klassifikation der Produktionsbereiche im MRIO-Datensatz GLORIA

Nr.	Bezeichnung des Wirtschaftszweiges
1	Growing wheat
2	Growing maize
3	Growing cereals, not elsewhere classified
4	Growing leguminous crops and oil seeds
5	Growing rice
6	Growing vegetables, roots, tubers
7	Growing sugar beet and cane
8	Growing tobacco
9	Growing fibre crops
10	Growing crops, not elsewhere classified
11	Growing grapes
12	Growing fruits and nuts
13	Growing beverage crops (coffee, tea etc.)
14	Growing spices, aromatic, drug and pharmaceutical crops
15	Seeds and plant propagation
16	Raising of cattle
17	Raising of sheep
18	Raising of swine/pigs
19	Raising of poultry
20	Raising of animals, not elsewhere classified; services to agriculture
21	Forestry and logging
22	Fishing
23	Crustaceans and molluscs
24	Hard coal
25	Lignite and peat
26	Petroleum extraction
27	Gas extraction
28	Iron ores
29	Uranium ores
30	Aluminium ore
31	Copper ores

Nr.	Bezeichnung des Wirtschaftszweiges
32	Gold ores
33	Lead/zinc/silver ores
34	Nickel ores
35	Tin ores
36	Other non-ferrous ores
37	Quarrying of stone, sand and clay
38	Chemical and fertilizer minerals
39	Extraction of salt
40	Mining and quarrying, not elsewhere classified; services to mining
41	Beef meat
42	Sheep meat
43	Pork
44	Poultry meat
45	Other meat products
46	Fish products
47	Cereal products
48	Vegetable products
49	Fruit products
50	Food products and feeds, not elsewhere classified
51	Sugar refining; cocoa, chocolate and confectionery
52	Animal oils and fats
53	Vegetable oils and fats
54	Dairy products
55	Alcoholic and other beverages
56	Tobacco products
57	Textiles and clothing
58	Leather and footwear
59	Sawmill products
60	Pulp and paper
61	Printing
62	Coke oven products
63	Refined petroleum products
64	Nitrogenous fertilizers

Nr.	Bezeichnung des Wirtschaftszweiges
65	Non-nitrogenous and mixed fertilizers
66	Basic petrochemical products
67	Basic inorganic chemicals
68	Basic organic chemicals
69	Pharmaceuticals and medicinal products
70	Dyes, paints, glues, detergents and other chemical products
71	Rubber products
72	Plastic products
73	Clay building materials
74	Other ceramics, not elsewhere classified
75	Cement, lime and plaster products
76	Other non-metallic mineral products, not elsewhere classified
77	Basic iron and steel
78	Basic aluminium
79	Basic Copper
80	Basic Gold
81	Basic lead/zinc/silver
82	Basic nickel
83	Basic tin
84	Basic non-ferrous metals, not elsewhere classified
85	Fabricated metal products
86	Machinery and equipment
87	Motor vehicles, trailers and semi-trailers
88	Other transport equipment
89	Repair and installation of machinery and equipment
90	Computers; electronic products; optical and precision instruments
91	Electrical equipment
92	Furniture and other manufacturing, not elsewhere classified
93	Electric power generation, transmission and distribution
94	Distribution of gaseous fuels through mains
95	Water collection, treatment and supply; sewerage
96	Waste collection, treatment, and disposal
97	Materials recovery

Nr.	Bezeichnung des Wirtschaftszweiges
98	Building construction
99	Civil engineering construction
100	Wholesale and retail trade; repair of motor vehicles and motorcycles
101	Road transport
102	Rail transport
103	Transport via pipeline
104	Water transport
105	Air transport
106	Services to transport
107	Postal and courier services
108	Hospitality
109	Publishing
110	Telecommunications
111	Information services
112	Finance and insurance
113	Property and real estate
114	Professional, scientific and technical services
115	Administrative services
116	Government; social security; defence; public order
117	Education
118	Human health and social work activities
119	Arts, entertainment and recreation
120	Other services

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, auf Basis von Metainformationen der GLORIA Datenbank

E Abgrenzung der in den Bewertungen mit GRAMOD berücksichtigten NACE-Gruppen

Tabelle E-129: 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
		26.5	Herstellung von Mess-, Kontroll-, Navigations- und ähnlichen Instrumenten und Vorrichtungen; Herstellung von Uhren
		26.6	Herstellung von Bestrahlungs- und Elektrotherapiegeräten und elektromedizinischen Geräten
		26.7	Herstellung von optischen und fotografischen Instrumenten und Geräten
		26.8	Herstellung von magnetischen und optischen Datenträgern
46	Großhandel (ohne Handel mit Kraftfahrzeugen)	46.1	Handelsvermittlung
		46.2	Großhandel mit landwirtschaftlichen Grundstoffen und lebenden Tieren
		46.3	Großhandel mit Nahrungs- und Genussmitteln, Getränken und Tabakwaren
		46.4	Großhandel mit Gebrauchs- und Verbrauchsgütern
		46.5	Großhandel mit Geräten der Informations- und Kommunikationstechnik
		46.6	Großhandel mit sonstigen Maschinen, Ausrüstungen und Zubehör
		46.7	Sonstiger Großhandel
		46.9	Großhandel ohne ausgeprägten Schwerpunkt
58	Verlagswesen	58.1	Verlegen von Büchern und Zeitschriften; sonstiges Verlagswesen (ohne Software)
		58.2	Verlegen von Software
61	Telekommunikation	61.1	Leitungsgebundene Telekommunikation
		61.2	Drahtlose Telekommunikation

Analysierte Abteilungen		Zugehörige Gruppen	
		61.3	Satellitentelekommunikation
		61.9	Sonstige Telekommunikation
62	Erbringung von Dienstleistungen der Informationstechnologie	62.0	Erbringung von Dienstleistungen der Informationstechnologie
63	Informationsdienstleistungen	63.1	Datenverarbeitung, Hosting und damit verbundene Tätigkeiten; Webportale
		63.9	Erbringung von sonstigen Informationsdienstleistungen
95	Reparatur von Datenverarbeitungsgeräten und Gebrauchsgütern	95.1	Reparatur von Datenverarbeitungs- und Telekommunikationsgeräten
		95.2	Reparatur von Gebrauchsgütern

Quelle: Eigene Darstellung (GWS im Vorhaben „DigitalRessourcen“), 2023, auf Basis von OECD (2008)

F Datengrundlage ausgewählter Abbildungen

Tabelle F-130: Datengrundlage zu Abbildung 81

Rohstoffe	Wert
Sand und Kies	29.135,27
Steinkohle	10.234,99
Gold Silber Platin u. a. Edelmetalle	9.568,65
Kupfererze	8.398,51
Biotische Materialien	6.270,41
Erdöl und flüssiges Erdgas	6.144,91
Eisenerze	5.376,90
Erdgas	4.831,20
Lehm und Kaolin	4.360,29
Sonstige Nichteisenmetalle	3.973,42
Kalkstein und Gips	3.382,50
Sonstige nichtmetallische Mineralien	2.118,86
Sonstige fossile Energieträger	1.617,12

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

Tabelle F-131: Datengrundlage zu Abbildung 82

Jahr	Hardware	Großhandel	Sonstige IKT-Dienstleistungen	Telekommunikation	Informationsdienste
2000	67.468,66	3.213,66	186,90	11.785,97	5.206,88
2001	63.913,72	3.011,10	164,96	14.305,86	5.255,70
2002	59.128,99	3.063,77	163,73	13.322,61	4.528,80
2003	74.315,91	3.213,16	175,12	18.143,33	5.162,31
2004	68.705,38	3.124,55	164,29	18.382,36	5.663,84
2005	74.573,87	2.887,07	156,18	21.557,97	4.814,06
2006	79.392,07	2.850,29	158,00	20.303,21	5.163,68
2007	78.722,41	2.706,12	160,58	21.385,71	5.124,21
2008	70.034,77	3.166,94	159,70	21.832,57	7.324,23
2009	69.625,92	3.972,90	157,32	25.879,42	8.169,26
2010	73.655,01	4.137,85	194,39	17.055,34	5.468,69
2011	74.018,02	4.111,85	565,58	18.482,95	5.873,16
2012	67.922,98	3.557,73	514,86	16.809,94	4.416,62
2013	66.953,66	3.435,70	813,39	17.063,39	4.653,46
2014	72.908,39	3.090,35	823,74	15.273,45	4.497,10
2015	80.976,73	3.034,51	1.022,23	11.583,58	3.791,84
2016	75.868,94	2.904,52	1.033,35	13.514,58	3.609,14
2017	73.246,78	2.960,24	1.014,02	11.617,55	3.792,58
2018	77.828,24	2.945,28	444,88	10.962,97	4.081,41
2019	75.000,05	2.656,35	503,00	10.852,45	4.028,75
2020	77.483,02	2.695,51	505,27	10.696,20	4.033,03

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

Tabelle F-132: Datengrundlage zu Abbildung 83

Materialien	Wert	Materialien-Gruppen	Summe der Gruppen
Braunkohle	1.323,96	Fossile Energieträger	22.828,22
Steinkohle	10.234,99	Fossile Energieträger	22.828,22
Torf	41,87	Fossile Energieträger	22.828,22
Erdöl und flüssiges Erdgas	6.144,91	Fossile Energieträger	22.828,22
Erdgas	4.831,20	Fossile Energieträger	22.828,22
Ölschiefer und Teersande	251,30	Fossile Energieträger	22.828,22
Eisenerze	5.376,90	Metallerze	27.317,47
Kupfererze	8.398,51	Metallerze	27.317,47
Nickelerze	614,57	Metallerze	27.317,47
Bleierze	131,84	Metallerze	27.317,47
Zinkerze	491,91	Metallerze	27.317,47
Zinnerze	81,04	Metallerze	27.317,47
Gold, Silber, Platin u. a. Edelmetalle	9.568,65	Metallerze	27.317,47
Bauxit u. a. Aluminiumerze	891,04	Metallerze	27.317,47
Uranerze	122,15	Metallerze	27.317,47
Sonstige Nichteisenmetalle	1.640,87	Metallerze	27.317,47
Zier- und Bausteine	563,84	Nichtmetallische Mineralien	38.996,92
Kreide und Dolomit	223,08	Nichtmetallische Mineralien	38.996,92
Chemische M. und Dünger	235,51	Nichtmetallische Mineralien	38.996,92
Salz	482,18	Nichtmetallische Mineralien	38.996,92
Kalkstein und Gips	3.382,50	Nichtmetallische Mineralien	38.996,92
Lehm und Kaolin	4.360,29	Nichtmetallische Mineralien	38.996,92
Sand und Kies	29.135,27	Nichtmetallische Mineralien	38.996,92
N.-m. M., a.n.g.	614,26	Nichtmetallische Mineralien	38.996,92
Getreide	490,79	Biomasse	6.270,41
Wurzeln, Knollen	158,88	Biomasse	6.270,41
Zuckerkulturen	339,01	Biomasse	6.270,41
Hülsenfrüchte	7,45	Biomasse	6.270,41
Nüsse	4,30	Biomasse	6.270,41
Ölhaltige Pflanzen	549,31	Biomasse	6.270,41
Gemüse	205,25	Biomasse	6.270,41

Materialien	Wert	Materialien-Gruppen	Summe der Gruppen
Früchte	172,78	Biomasse	6.270,41
Fasern	1,28	Biomasse	6.270,41
Sonstige Pfl.	16,19	Biomasse	6.270,41
Ernterückstände	1.549,67	Biomasse	6.270,41
Futterpflanzen	1.302,17	Biomasse	6.270,41
Holz	977,77	Biomasse	6.270,41
Holzbrennstoffe und sonstige Gewinnung	479,19	Biomasse	6.270,41
Aquakultur	16,35	Biomasse	6.270,41

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

Tabelle F-133: Datengrundlage zu Abbildung 84

Jahr	Deutschland	EU	Übriges Europa	Asien	China	Indien	Ozeanien	Nord- und Mittelamerika	USA	Südamerika	Afrika	Naher Osten
2000	10.119,85	13.895,64	10.389,70	7.736,01	11.204,97	3.090,44	4.225,31	3.167,40	7.827,05	7.330,08	5.960,00	2.915,62
2001	9.656,41	13.692,55	10.266,06	8.264,03	11.163,86	3.170,09	4.050,61	3.318,93	6.754,97	7.820,50	5.663,02	2.830,29
2002	8.403,38	11.789,69	8.960,53	8.271,60	13.259,20	3.316,48	3.415,96	2.485,02	4.838,85	7.501,27	5.383,07	2.582,84
2003	8.317,19	12.796,21	10.157,78	9.584,79	26.537,41	3.709,97	3.545,17	2.922,17	5.732,32	9.305,50	5.238,54	3.162,77
2004	7.805,28	12.534,13	9.886,65	9.252,50	24.934,17	3.927,57	3.130,10	2.735,83	4.586,67	9.155,99	4.886,30	3.205,23
2005	7.932,62	11.624,00	9.614,74	9.975,41	30.356,65	4.196,61	3.218,49	2.621,92	4.760,40	8.806,86	7.462,89	3.418,59
2006	7.492,98	12.458,72	10.046,58	10.615,72	31.202,44	4.358,98	3.244,42	2.894,96	4.829,37	9.418,34	7.810,92	3.493,83
2007	7.873,15	12.262,27	10.175,31	11.835,85	28.653,36	4.425,68	3.526,95	3.165,98	5.414,14	9.666,32	7.596,60	3.503,44
2008	7.942,32	12.057,46	10.292,68	10.649,12	27.947,57	4.779,27	3.464,70	2.662,95	5.660,86	8.296,98	5.298,56	3.465,74
2009	8.097,52	13.937,84	9.914,66	11.501,19	30.155,01	4.831,66	3.536,59	2.566,24	4.845,85	9.417,45	5.649,50	3.351,30
2010	7.070,82	11.223,57	9.913,45	10.639,64	30.497,65	4.988,70	3.186,94	2.473,61	4.518,58	8.088,58	4.767,22	3.142,53
2011	7.889,26	11.880,51	10.213,40	10.827,47	29.911,80	5.163,65	3.283,04	2.685,47	5.089,23	7.931,81	4.736,49	3.439,41
2012	6.674,22	10.027,96	8.795,15	9.796,99	28.883,21	4.417,67	3.043,25	2.468,88	4.701,86	6.882,05	4.343,62	3.187,28
2013	6.554,78	10.304,13	9.131,45	9.634,79	27.897,31	5.110,38	3.226,72	2.539,92	4.458,90	6.681,09	4.265,04	3.115,10
2014	5.933,99	10.003,10	9.228,25	11.018,63	31.014,32	3.879,68	3.801,61	2.759,78	4.556,82	6.908,15	4.408,16	3.080,55
2015	4.890,00	9.386,68	9.119,21	12.876,66	32.818,21	3.667,66	4.558,48	2.964,38	4.285,76	7.865,52	4.556,90	3.419,42
2016	5.943,20	9.473,89	9.185,39	11.045,97	29.822,26	3.774,81	4.467,83	2.999,83	4.274,78	7.757,27	4.851,07	3.334,24
2017	6.371,81	9.039,06	9.094,31	11.072,66	25.929,96	3.505,19	4.612,28	2.903,69	4.284,25	7.729,49	4.816,37	3.272,09

Jahr	Deutschland	EU	Übriges Europa	Asien	China	Indien	Ozeanien	Nord- und Mittelamerika	USA	Südamerika	Afrika	Naher Osten
2018	5.341,93	9.857,37	10.142,55	11.304,93	26.259,07	3.871,90	4.996,53	3.093,77	4.458,63	8.317,43	5.167,89	3.450,80
2019	5.053,30	9.434,51	9.925,87	10.873,31	25.428,50	3.894,01	4.969,91	3.008,65	4.155,02	8.044,93	5.031,46	3.221,13
2020	5.200,57	9.769,23	9.872,35	10.764,39	26.332,66	4.250,31	4.959,77	3.023,48	4.019,25	8.714,33	5.245,92	3.260,77

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

Tabelle F-134: Datengrundlage zu Abbildung 85

Länder/Regionen	Wert	Länder-Gruppen	Summe der Gruppen
Deutschland	5.200,57	Europa	24.842,15
Benelux	1.290,86	Europa	24.842,15
Frankreich	747,80	Europa	24.842,15
Iberien	446,41	Europa	24.842,15
Süd-Ost-EU	639,00	Europa	24.842,15
Mittel-Ost-EU	1.213,35	Europa	24.842,15
Österreich, Tschechien, Slowakei	1.565,19	Europa	24.842,15
Nord-Ost-EU	2.585,93	Europa	24.842,15
Nördliche EU	1.280,70	Europa	24.842,15
EFTA-Länder	1.097,33	Europa	24.842,15
Vereinigtes Königreich	772,73	Europa	24.842,15
Übriges Europa	1.185,07	Europa	24.842,15
Russland	5.532,42	Europa	24.842,15
Türkei	1.284,81	Europa	24.842,15
Zentralasien	2.000,12	Asien	44.608,13
Ostasien	1.856,78	Asien	44.608,13
China	26.332,66	Asien	44.608,13
Südasien	57,81	Asien	44.608,13
Indien	4.250,31	Asien	44.608,13
Südostasien	4.477,27	Asien	44.608,13
Indonesien	2.372,42	Asien	44.608,13
Ozeanien	4.959,77	Ozeanien	4.959,77
Kanada	1.449,01	Nord- und Mittelamerika	7.042,73
USA	4.019,25	Nord- und Mittelamerika	7.042,73
Mittelamerika, Karibik	1.574,47	Nord- und Mittelamerika	7.042,73
Mercosur-Länder	3.505,50	Südamerika	8.714,33
Übriges Südamerika und Karibik	5.208,83	Südamerika	8.714,33
Nordafrika	714,15	Afrika	5.245,92
Westafrika	1.453,97	Afrika	5.245,92
Zentralafrika	631,88	Afrika	5.245,92
Ostafrika	720,05	Afrika	5.245,92

Länder/Regionen	Wert	Länder-Gruppen	Summe der Gruppen
Südliches Afrika	1.725,86	Afrika	5.245,92
Naher Osten	3.157,64	Asien	44.608,13
Israel	103,12	Asien	44.608,13

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

Tabelle F-135: Datengrundlage zu Abbildung 86

Verwendungszwecke	Wert	Länder/Regionen	Wert
IKT	771,96	Deutschland	756,96
IKT	616,48	Deutschland	10,50
IKT	1.283,81	Deutschland	4.205,95
IKT	198,69	Deutschland	227,17
Öffentliche DL	698,90	EU	1.047,65
Öffentliche DL	740,28	EU	946,10
Öffentliche DL	1.159,87	EU	6.860,87
Öffentliche DL	197,14	EU	914,61
Fahrzeuge	549,32	Übriges Europa	4.613,53
Fahrzeuge	648,14	Übriges Europa	1.877,11
Fahrzeuge	913,05	Übriges Europa	3.039,56
Fahrzeuge	156,42	Übriges Europa	342,14
Datenverarbeitungsgeräte	4.742,22	Naher Osten	2.428,24
Datenverarbeitungsgeräte	6.103,66	Naher Osten	263,94
Datenverarbeitungsgeräte	8.013,99	Naher Osten	560,99
Datenverarbeitungsgeräte	1.365,04	Naher Osten	7,60
Unternehmensnahe DL	1.419,57	Asien	2.452,65
Unternehmensnahe DL	1.237,89	Asien	2.920,68
Unternehmensnahe DL	2.344,06	Asien	4.396,93
Unternehmensnahe DL	393,39	Asien	994,12
Investitionen	4.955,68	Indien	704,41
Investitionen	6.680,06	Indien	407,70
Investitionen	8.679,10	Indien	2.707,35
Investitionen	1.355,55	Indien	430,84
Staatskonsum	202,26	China	6.235,46
Staatskonsum	237,61	China	4.080,17
Staatskonsum	344,27	China	14.703,52

Verwendungszwecke	Wert	Länder/Regionen	Wert
Staatskonsum	56,15	China	1.313,51
Andere WZ	2.429,02	Afrika	1.001,11
Andere WZ	2.612,60	Afrika	3.440,36
Andere WZ	3.981,64	Afrika	603,48
Andere WZ	682,75	Afrika	200,96
Private Haushalte	7.059,29	Nord- und Mittelamerika	416,28
Private Haushalte	8.440,75	Nord- und Mittelamerika	2.128,95
Private Haushalte	12.277,12	Nord- und Mittelamerika	366,23
Private Haushalte	1.865,27	Nord- und Mittelamerika	112,01
Ausfuhren	0,00	USA	1.061,04
Ausfuhren	0,00	USA	1.473,02
Ausfuhren	0,00	USA	1.154,73
Ausfuhren	0,00	USA	330,46
		Südamerika	1.272,80
		Südamerika	5.883,33
		Südamerika	240,34
		Südamerika	1.317,86
		Ozeanien	838,07
		Ozeanien	3.885,60
		Ozeanien	156,98
		Ozeanien	79,12

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

Tabelle F-136: Datengrundlage zu Abbildung 87

Jahr	Hardware	Großhandel	Sonstige IKT-Dienstleistungen	Telekommunikation	Informationsdienste
2000	106.010,46	5.096,42	296,25	18.786,97	8.246,72
2001	100.948,12	4.783,72	261,91	22.843,16	8.340,83
2002	93.002,68	4.867,16	260,10	21.213,10	7.182,64
2003	114.779,23	5.020,02	273,27	28.267,98	8.030,85
2004	107.274,85	4.955,12	259,91	28.995,30	8.930,45
2005	117.407,86	4.618,69	249,81	34.485,02	7.650,60
2006	127.853,66	4.660,52	257,86	33.142,10	8.393,75
2007	128.592,37	4.458,30	264,46	35.252,50	8.417,37
2008	119.946,15	5.443,49	274,32	37.491,56	12.565,48
2009	108.150,85	6.192,62	244,58	40.221,20	12.691,67
2010	120.458,48	6.792,37	318,90	27.963,94	8.965,44
2011	123.907,06	6.886,33	947,52	30.962,07	9.832,95
2012	112.341,35	5.884,71	852,26	27.800,88	7.303,35
2013	110.869,48	5.684,97	1.346,42	28.232,55	7.697,62
2014	120.365,97	5.105,78	1.361,60	25.230,18	7.428,63
2015	133.606,11	5.042,44	1.697,96	19.211,55	6.291,14
2016	124.296,77	4.772,03	1.697,73	22.172,72	5.926,82
2017	122.876,00	4.964,84	1.701,00	19.489,43	6.362,02
2018	130.445,70	4.937,75	746,14	18.379,76	6.842,56
2019	125.770,24	4.452,10	843,39	18.190,36	6.752,87
2020	127.578,73	4.436,32	832,07	17.606,61	6.638,13

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

Tabelle F-137: Datengrundlage zu Abbildung 88

Rohstoffe	Wert
Sand und Kies	47.897,22

Rohstoffe	Wert
Steinkohle	16.452,76
Gold, Silber, Platin u. a. Edelmetalle	16.033,12
Kupfererze	14.023,59
Biotische Materialien	10.276,19
Erdöl und flüssiges Erdgas	10.065,47
Eisenerze	8.883,67
Erdgas	7.885,70
Lehm und Kaolin	6.944,87
Sonstige Nichteisenmetalle	6.800,25
Kalkstein und Gips	5.608,61
Sonstige nichtmetallische Mineralien	3.565,45
Sonstige fossile Energieträger	2.655,00

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

Tabelle F-138: Datengrundlage zu Abbildung 89

Materialien	Wert	Materialien-Gruppen	Summe der Gruppen
Braunkohle	2.168,76	Fossile Energieträger	37.058,89
Steinkohle	16.452,76	Fossile Energieträger	37.058,89
Torf	68,76	Fossile Energieträger	37.058,89
Erdöl und flüssiges Erdgas	10.065,47	Fossile Energieträger	37.058,89
Erdgas	7.885,70	Fossile Energieträger	37.058,89
Ölschiefer und Teersande	417,44	Fossile Energieträger	37.058,89
Eisenerze	8.883,67	Metallerze	45.740,64
Kupfererze	14.023,59	Metallerze	45.740,64
Nickelerze	1.022,76	Metallerze	45.740,64
Bleierze	226,62	Metallerze	45.740,64
Zinkerze	862,63	Metallerze	45.740,64
Zinnerze	130,74	Metallerze	45.740,64
Gold, Silber, Platin u. a. Edelmetalle	16.033,12	Metallerze	45.740,64
Bauxit u. a. Aluminiumerze	1.588,75	Metallerze	45.740,64
Uranerze	227,19	Metallerze	45.740,64
Sonstige Nichteisenmetalle	2.741,55	Metallerze	45.740,64
Zier- und Bausteine	956,86	Nichtmetallische Mineralien	64.016,14

Materialien	Wert	Materialien-Gruppen	Summe der Gruppen
Kreide und Dolomit	380,42	Nichtmetallische Mineralien	64.016,14
Chemische M. und Dünger	381,08	Nichtmetallische Mineralien	64.016,14
Salz	811,68	Nichtmetallische Mineralien	64.016,14
Kalkstein und Gips	5.608,61	Nichtmetallische Mineralien	64.016,14
Lehm und Kaolin	6.944,87	Nichtmetallische Mineralien	64.016,14
Sand und Kies	47.897,22	Nichtmetallische Mineralien	64.016,14
N.-m. M., a.n.g.	1.035,41	Nichtmetallische Mineralien	64.016,14
Getreide	778,73	Biomasse	10.276,19
Wurzeln, Knollen	262,63	Biomasse	10.276,19
Zuckerkulturen	562,34	Biomasse	10.276,19
Hülsenfrüchte	11,85	Biomasse	10.276,19
Nüsse	7,00	Biomasse	10.276,19
Ölhaltige Pflanzen	871,53	Biomasse	10.276,19
Gemüse	321,73	Biomasse	10.276,19
Früchte	280,17	Biomasse	10.276,19
Fasern	2,06	Biomasse	10.276,19
Sonstige Pfl.	26,46	Biomasse	10.276,19
Ernterückstände	2.527,38	Biomasse	10.276,19
Futterpflanzen	2.134,53	Biomasse	10.276,19
Holz	1.669,65	Biomasse	10.276,19
Holzbrennstoffe und sonstige Gewinnung	793,56	Biomasse	10.276,19
Aquakultur	26,57	Biomasse	10.276,19

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

Tabelle F-139: Datengrundlage zu Abbildung 90

Jahr	Deutschland	EU	Übriges Europa	Asien	China	Indien	Ozeanien	Nord- und Mittelamerika	USA	Südamerika	Afrika	Naher Osten
2000	19.993,06	22.431,48	16.759,04	11.144,88	15.443,62	4.546,24	6.083,37	4.724,14	11.323,38	11.610,84	10.241,35	4.135,43
2001	19.345,99	22.104,34	16.589,76	12.093,01	15.453,44	4.711,37	5.889,30	4.926,76	9.737,42	12.601,13	9.689,02	4.036,19
2002	16.809,07	19.083,26	14.674,14	11.995,76	18.404,94	4.884,52	4.983,20	3.784,27	7.038,79	12.141,00	9.015,76	3.710,97
2003	16.008,02	20.690,67	16.584,53	14.039,16	37.245,61	5.494,86	5.232,24	4.478,99	8.519,40	15.084,21	8.401,97	4.591,71
2004	15.360,49	20.652,81	16.329,21	13.907,60	34.804,97	5.903,24	4.629,47	4.270,30	6.974,45	14.897,34	7.983,38	4.702,36
2005	15.216,35	19.470,28	16.187,69	15.051,56	42.882,68	6.408,31	4.848,15	4.145,38	7.378,79	14.410,89	13.322,83	5.089,07
2006	15.208,84	21.251,22	17.297,26	16.242,99	45.015,94	6.813,07	4.975,95	4.686,36	7.624,65	15.812,84	14.075,52	5.303,27
2007	15.543,02	20.901,70	17.540,48	18.174,59	42.679,54	7.125,93	5.523,64	5.206,71	8.755,51	16.483,75	13.611,93	5.438,19
2008	15.587,22	21.763,85	18.274,89	17.406,24	44.189,01	7.974,00	5.727,02	4.672,25	9.539,45	14.894,10	10.051,62	5.641,35
2009	13.588,28	22.712,75	15.956,10	17.276,09	43.562,42	7.327,22	5.374,60	4.110,98	7.531,58	15.202,78	9.848,62	5.009,49
2010	12.801,98	19.776,46	16.996,06	16.765,05	46.288,83	7.968,54	5.125,51	4.241,91	7.513,45	13.756,98	8.335,91	4.928,46
2011	14.378,47	21.224,52	17.804,94	17.439,67	46.691,84	8.513,64	5.418,97	4.653,12	8.661,18	13.884,94	8.337,69	5.526,97
2012	11.874,72	17.899,96	15.152,74	15.743,80	44.659,67	7.233,55	4.999,83	4.240,81	7.908,55	11.881,92	7.507,03	5.079,95
2013	11.684,84	18.185,84	15.646,93	15.541,87	43.345,68	8.303,20	5.325,64	4.344,70	7.458,12	11.588,50	7.446,10	4.959,63
2014	10.880,50	17.607,14	15.942,68	17.615,79	48.175,35	6.483,14	6.145,13	4.653,96	7.591,06	11.791,26	7.709,22	4.896,92
2015	9.242,77	16.831,26	15.998,77	20.529,81	50.883,35	6.160,59	7.323,27	5.020,85	7.170,52	13.178,33	8.021,07	5.488,58
2016	10.770,68	16.641,80	15.830,64	17.609,91	45.886,03	6.253,55	7.080,12	5.071,21	7.031,10	12.952,14	8.411,42	5.327,48
2017	11.477,32	16.202,95	15.972,15	18.131,92	40.878,71	5.947,54	7.470,43	5.024,93	7.218,04	13.180,19	8.530,48	5.358,62
2018	9.574,92	17.681,11	17.814,63	18.451,10	41.298,20	6.626,72	8.090,34	5.341,64	7.526,42	14.154,13	9.143,57	5.649,14

Jahr	Deutschland	EU	Übriges Europa	Asien	China	Indien	Ozeanien	Nord- und Mittelamerika	USA	Südamerika	Afrika	Naher Osten
2019	9.018,42	16.865,31	17.405,88	17.762,32	40.136,25	6.621,13	8.080,83	5.210,30	7.019,91	13.729,12	8.874,91	5.284,57
2020	9.138,07	17.064,17	16.936,20	17.251,07	41.118,05	7.050,89	7.938,65	5.133,80	6.664,38	14.449,31	9.086,81	5.260,47

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

Tabelle F-140: Datengrundlage zu Abbildung 91

Länder/Regionen	Wert	Länder-Gruppen	Summe der Gruppen
Deutschland	9.138,07	Europa	43.138,44
BeNeLux	2.290,04	Europa	43.138,44
Frankreich	1.383,60	Europa	43.138,44
Iberien	798,66	Europa	43.138,44
Süd-Ost-EU	1.055,40	Europa	43.138,44
Mittel-Ost-EU	2.080,43	Europa	43.138,44
Österreich, Tschechien, Slowakei	2.654,82	Europa	43.138,44
Nord-Ost-EU	4.414,40	Europa	43.138,44
Nördliche EU	2.386,82	Europa	43.138,44
EFTA-Länder	1.876,33	Europa	43.138,44
Vereinigtes Königreich	1.285,33	Europa	43.138,44
Übriges Europa	2.123,08	Europa	43.138,44
Russland	9.398,00	Europa	43.138,44
Türkei	2.253,46	Europa	43.138,44
Zentralasien	3.375,14	Asien	70.680,48
Ostasien	2.976,78	Asien	70.680,48
China	41.118,05	Asien	70.680,48
Südasien	92,75	Asien	70.680,48
Indien	7.050,89	Asien	70.680,48
Südostasien	7.031,70	Asien	70.680,48
Indonesien	3.774,70	Asien	70.680,48
Ozeanien	7.938,65	Ozeanien	7.938,65
Kanada	2.524,25	Nord- und Mittelamerika	11.798,18
USA	6.664,38	Nord- und Mittelamerika	11.798,18
Mittelamerika, Karibik	2.609,55	Nord- und Mittelamerika	11.798,18
Mercosur-Länder	5.821,31	Südamerika	14.449,31
Übriges Südamerika und Karibik	8.628,01	Südamerika	14.449,31
Nordafrika	1.192,52	Afrika	9.086,81
Westafrika	2.536,24	Afrika	9.086,81
Zentralafrika	1.054,14	Afrika	9.086,81

Länder/Regionen	Wert	Länder-Gruppen	Summe der Gruppen
Ostafrika	1.238,02	Afrika	9.086,81
Südliches Afrika	3.065,88	Afrika	9.086,81
Naher Osten	5.088,47	Asien	70.680,48
Israel	172,00	Asien	70.680,48

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

Tabelle F-141: Datengrundlage zu Abbildung 92

Verwendungszwecke	Wert	Länder/Regionen	Wert
IKT	1.452,30	Deutschland	1.245,09
IKT	1.227,99	Deutschland	19,21
IKT	2.457,52	Deutschland	7.458,21
IKT	373,84	Deutschland	415,56
Öffentliche DL	1.327,03	EU	1.759,82
Öffentliche DL	1.474,75	EU	1.848,51
Öffentliche DL	2.222,31	EU	11.880,26
Öffentliche DL	371,80	EU	1.575,58
Fahrzeuge	1.047,10	Übriges Europa	7.742,39
Fahrzeuge	1.291,25	Übriges Europa	3.341,39
Fahrzeuge	1.750,16	Übriges Europa	5.267,21
Fahrzeuge	295,35	Übriges Europa	585,21
Datenverarbeitungsgeräte	9.068,92	Naher Osten	3.904,36
Datenverarbeitungsgeräte	12.160,36	Naher Osten	439,12
Datenverarbeitungsgeräte	15.366,23	Naher Osten	904,29
Datenverarbeitungsgeräte	2.579,74	Naher Osten	12,69
Unternehmensnahe DL	2.679,31	Asien	3.934,07
Unternehmensnahe DL	2.465,86	Asien	4.799,29
Unternehmensnahe DL	4.488,24	Asien	6.947,10
Unternehmensnahe DL	740,69	Asien	1.570,60
Investitionen	4.955,68	Indien	1.146,26
Investitionen	6.680,06	Indien	668,59
Investitionen	8.679,10	Indien	4.495,80
Investitionen	1.355,55	Indien	740,24
Staatskonsum	202,26	China	9.776,52
Staatskonsum	237,61	China	6.422,02

Verwendungszwecke	Wert	Länder/Regionen	Wert
Staatskonsum	344,27	China	22.861,49
Staatskonsum	56,15	China	2.058,01
Andere WZ	4.615,19	Afrika	1.677,60
Andere WZ	5.204,73	Afrika	6.048,84
Andere WZ	7.629,63	Afrika	1.023,93
Andere WZ	1.288,01	Afrika	336,44
Private Haushalte	7.059,29	Nord- und Mittelamerika	687,71
Private Haushalte	8.440,75	Nord- und Mittelamerika	3.641,15
Private Haushalte	12.277,12	Nord- und Mittelamerika	620,14
Private Haushalte	1.865,27	Nord- und Mittelamerika	184,80
Ausfuhren	4.651,80	USA	1.770,51
Ausfuhren	6.557,27	USA	2.454,86
Ausfuhren	8.801,55	USA	1.902,30
Ausfuhren	1.349,79	USA	536,71
		Südamerika	2.072,06
		Südamerika	9.840,53
		Südamerika	402,67
		Südamerika	2.134,05
		Ozeanien	1.342,51
		Ozeanien	6.217,12
		Ozeanien	252,72
		Ozeanien	126,30

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

Tabelle F-142: Datengrundlage zu Abbildung 93

Jahr	Hardware	Großhandel	Sonstige IKT-Dienstleistungen	Telekommunikation	Informationsdienste
2000	43,10	2,84	0,20	8,19	4,02
2001	40,38	2,75	0,19	9,97	4,14
2002	36,85	2,67	0,18	9,44	3,62
2003	44,33	2,81	0,18	11,93	4,03
2004	43,65	2,73	0,18	12,27	4,44
2005	47,89	2,55	0,16	13,60	3,95
2006	51,65	2,48	0,16	12,57	4,20
2007	51,39	2,38	0,16	13,47	4,09
2008	45,50	2,53	0,15	15,30	5,81
2009	42,65	2,80	0,13	16,42	5,65
2010	47,70	3,56	0,18	12,19	4,43
2011	47,04	3,32	0,50	12,38	4,37
2012	40,96	3,03	0,50	11,79	3,42
2013	39,23	2,89	0,77	11,58	3,54
2014	40,30	2,75	0,69	9,80	2,99
2015	41,88	2,79	0,83	7,23	2,63
2016	40,81	2,62	0,81	8,37	2,42
2017	41,27	2,59	0,80	7,22	2,54
2018	42,89	2,53	0,35	7,04	2,71
2019	40,65	2,22	0,39	6,75	2,62
2020	42,29	2,16	0,38	6,51	2,57

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

Tabelle F-143: Datengrundlage zu Abbildung 94

Jahr	Deutschland	EU	Übriges Europa	Asien	China	Indien	Ozeanien	Nord- und Mittelamerika	USA	Südamerika	Afrika	Naher Osten
2000	12,27	10,72	7,84	7,66	8,37	1,10	0,55	0,71	6,35	0,57	1,42	0,78
2001	12,46	10,35	6,81	7,42	8,69	1,22	0,53	0,68	6,33	0,63	1,48	0,85
2002	11,44	9,18	5,90	6,91	9,76	1,39	0,41	0,57	4,34	0,71	1,36	0,79
2003	12,11	9,99	6,63	8,17	15,95	1,43	0,44	0,66	4,78	0,83	1,41	0,89
2004	11,72	9,43	5,98	7,92	18,42	1,77	0,40	0,57	3,99	0,79	1,37	0,91
2005	12,22	9,00	5,26	8,02	23,87	1,89	0,40	0,57	3,87	0,77	1,35	0,94
2006	11,55	9,36	5,56	8,23	25,75	2,01	0,41	0,61	4,18	0,79	1,61	1,00
2007	12,11	9,36	5,03	8,66	25,33	2,10	0,43	0,64	4,48	0,75	1,53	1,06
2008	12,28	8,55	4,76	7,80	24,58	2,59	0,44	0,61	4,23	0,76	1,61	1,09
2009	11,09	8,46	4,20	7,38	25,73	3,03	0,37	0,56	3,81	0,75	1,23	1,04
2010	11,84	7,90	4,39	7,31	26,37	3,24	0,33	0,52	3,23	0,66	1,21	1,08
2011	11,82	7,75	4,29	7,49	26,11	3,20	0,33	0,52	3,12	0,63	1,29	1,08
2012	11,10	7,05	3,93	6,81	21,55	2,96	0,27	0,49	2,75	0,59	1,12	1,08
2013	10,90	6,93	3,83	6,86	20,45	2,87	0,27	0,54	2,65	0,54	1,05	1,11
2014	9,03	6,93	4,00	7,16	20,39	2,80	0,29	0,52	2,62	0,52	1,04	1,21
2015	8,51	6,65	3,59	7,64	20,71	2,30	0,31	0,50	2,37	0,53	0,97	1,27
2016	8,57	6,75	3,53	7,45	20,33	2,23	0,30	0,55	2,42	0,55	1,05	1,29
2017	8,52	7,01	3,31	7,40	20,18	1,94	0,29	0,54	2,35	0,51	1,03	1,32
2018	8,08	7,10	3,64	7,51	20,64	2,04	0,30	0,58	2,39	0,64	1,11	1,49

Jahr	Deutschland	EU	Übriges Europa	Asien	China	Indien	Ozeanien	Nord- und Mittelamerika	USA	Südamerika	Afrika	Naher Osten
2019	7,49	7,01	3,46	7,04	19,35	2,18	0,28	0,55	2,24	0,61	1,11	1,31
2020	7,21	7,33	3,38	6,98	20,22	2,49	0,27	0,56	2,15	0,88	1,22	1,22

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

Tabelle F-144: Datengrundlage zu Abbildung 95

Jahr	Andere WZ	Datenver- arbeitungs- geräte	Fahrzeuge	IKT	Unternehmens- nahe DL	Öffentliche DL	Private Haushalte	Staats- konsum	Investi- tionen
2000	5,61	9,76	1,01	1,54	3,47	3,14	14,64	1,64	17,55
2001	5,55	9,04	0,95	1,88	3,67	3,21	15,42	1,65	16,07
2002	5,20	8,08	0,95	1,86	3,28	3,18	14,62	1,48	14,10
2003	6,01	9,73	1,11	3,10	3,84	3,70	17,97	1,94	15,88
2004	5,85	9,56	1,14	2,79	3,72	3,37	18,86	1,69	16,28
2005	5,91	10,37	1,14	3,26	3,49	3,24	21,08	1,79	17,87
2006	6,17	11,34	1,19	2,82	3,55	3,45	20,47	1,78	20,28
2007	6,35	11,98	1,18	3,08	3,51	3,31	20,64	1,76	19,67
2008	6,45	11,17	1,27	4,50	4,71	1,66	22,14	0,42	16,96
2009	6,50	8,74	1,08	5,33	5,14	2,13	22,59	0,47	15,67
2010	6,97	11,24	1,25	3,73	4,95	2,06	23,15	0,40	14,32
2011	7,00	11,76	1,24	3,38	4,90	1,93	22,82	0,40	14,20
2012	5,94	9,81	1,12	3,01	4,20	1,73	21,31	0,39	12,19
2013	6,06	9,78	1,07	2,97	4,29	1,86	20,05	0,42	11,51
2014	5,85	9,85	1,09	2,58	3,98	1,75	18,77	0,53	12,14
2015	5,88	10,51	1,23	1,93	3,59	1,74	17,48	0,54	12,46
2016	5,83	10,51	1,17	2,10	3,44	1,71	18,01	0,53	11,73
2017	5,67	10,78	1,35	1,80	3,23	1,54	17,66	0,49	11,88

Jahr	Andere WZ	Datenverarbeitungsgeräte	Fahrzeuge	IKT	Unternehmensnahe DL	Öffentliche DL	Private Haushalte	Staatskonsum	Investitionen
2018	5,83	11,32	1,32	1,77	3,27	1,61	17,61	0,46	12,32
2019	5,53	10,86	1,25	1,70	3,15	1,52	16,70	0,42	11,50
2020	5,64	11,17	1,29	1,68	3,18	1,61	16,86	0,49	12,01

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

Tabelle F-145: Datengrundlage zu Abbildung 96

Jahr	Andere WZ	Datenverarbeitungsgeräte	Fahrzeuge	IKT	Unternehmensnahe DL	Öffentliche DL	Private Haushalte	Staatskonsum	Investitionen
2000	8,17865327	15,17196191	1,50195361	2,29718677	5,01081641	4,79683301	21,62772656	2,52534741	26,75159375
2001	8,10970931	14,24439258	1,42525659	2,81798022	5,30784814	4,9539707	22,73186133	2,5606814	24,49963672
2002	7,70347672	13,01816504	1,45566516	2,78463989	4,78096533	5,00052295	21,56320508	2,30824194	21,59301758
2003	9,39568282	16,4008125	1,78353076	4,90385059	5,8908457	6,10655664	28,0037207	3,16688574	25,35793945
2004	8,76731273	15,15869531	1,74163684	4,28272656	5,5058335	5,25821045	28,19186328	2,60548511	24,52865039
2005	8,89483549	16,21298438	1,73508643	5,12443359	5,16837061	5,01155811	32,27888672	2,73890039	26,82410547
2006	9,28462327	17,52221875	1,80149512	4,47090576	5,26520459	5,30469775	31,32007617	2,70781348	30,1902207
2007	9,46413861	18,3903418	1,76844702	4,80095166	5,16595166	5,05330273	31,47291797	2,65944409	29,32354297
2008	9,44379093	17,19454102	1,90125085	6,65494043	6,70133643	2,4349624	32,51870117	0,6107475	25,05794141
2009	10,31722304	14,28682324	1,724521	8,58517383	8,07357715	3,40289722	35,82430859	0,74468671	24,84562109
2010	10,14650889	17,29638477	1,84500647	5,45549121	7,05025439	3,02832129	33,82770312	0,57380054	21,28781055

Jahr	Andere WZ	Daten- verarbeitungs- geräte	Fahrzeuge	IKT	Unternehmens- nahe DL	Öffentliche DL	Private Haushalte	Staats- konsum	Investitionen
2011	10,54020563	18,46627148	1,89085657	5,14195557	7,26809863	2,90587427	34,55321875	0,58737616	21,69770898
2012	9,13338676	16,18402051	1,77356946	4,51597656	6,22975439	2,66964941	32,72283203	0,58261572	19,41033984
2013	9,5525997	16,61327734	1,73626074	4,57460742	6,49353564	2,93416992	31,60963281	0,6266853	18,7788418
2014	9,77822579	17,71419141	1,85844495	4,20270996	6,52937988	2,94024854	31,40660938	0,864422	21,29878711
2015	10,24759259	19,89613867	2,19930103	3,29259912	6,06882178	3,04369995	31,28047461	0,94188983	23,43836719
2016	9,96285409	19,22046094	2,03526428	3,53339331	5,7168335	2,93117041	31,30098438	0,88957184	21,34000977
2017	9,38919617	18,94648828	2,28504102	3,00368359	5,27086963	2,56225586	29,74913281	0,78528442	20,63920898
2018	9,78550053	20,28243945	2,2859126	2,902427	5,382125	2,73514771	30,21474805	0,77066345	21,90381836
2019	9,47767302	19,77563086	2,21110938	2,86307861	5,29037354	2,64096216	29,26835742	0,70949139	20,80392773
2020	9,70600313	20,22492188	2,26694043	2,87095654	5,39490674	2,79618066	29,64242578	0,84029883	21,67038867

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

Tabelle F-146: Datengrundlage zu Abbildung 97

Jahr	Andere WZ	Datenverarbeitungsg- eräte	Fahrzeuge	IKT	Unternehmensna- he DL	Öffentlich e DL	Private Haushalte	Staatskonsum	Investition en	Ausfahren
2000	11,658792 55	21,64408984	2,1418100 6	3,2741071 8	7,14130176	6,8414331 1	21,627726 56	2,52534741	26,7515937 5	34,830628 91
2001	11,687862 72	20,54088672	2,0546691 9	4,0606286 6	7,64869775	7,1425087 9	22,731861 33	2,5606814	24,4996367 2	34,250281 25
2002	11,266318 43	19,04885742	2,1294899 9	4,0717202 1	6,99121973	7,315896	21,563205 08	2,30824194	21,5930175 8	30,237720 7

Jahr	Andere WZ	Datenverarbeitungsgerä- äte	Fahrzeuge	IKT	Unternehmensna- he DL	Öffentlich e DL	Private Haushalte	Staatskonsu- m	Investition en	Ausfuhren
2003	13,981271 2	24,4231875	2,6548486 3	7,2949272 5	8,76401367	9,0915058 6	28,003720 7	3,16688574	25,3579394 5	33,633046 88
2004	13,599895 3	23,54210352	2,7030878 9	6,6414824 2	8,53795215	8,1629868 2	28,191863 28	2,60548511	24,5286503 9	31,902111 33
2005	14,234221 27	25,98518555	2,778573	8,196625	8,26668457	8,0279140 6	32,278886 72	2,73890039	26,8241054 7	35,080875
2006	15,290473 52	28,89353516	2,9686276 9	7,3600356 4	8,66661816	8,7436894 5	31,320076 17	2,70781348	30,1902207	38,166820 31
2007	15,985557 1	31,09816602	2,9885820 3	8,1061103 5	8,7209082	8,5417617 2	31,472917 97	2,65944409	29,3235429 7	38,088007 81
2008	16,683466 68	30,46623828	3,3629140 6	11,751592 77	11,82142871	4,3016899 4	32,518701 17	0,6107475	25,0579414 1	39,146281 25
2009	17,176930 36	23,86032617	2,8740354	14,295806 64	13,42714062	5,6684741 2	35,824308 59	0,74468671	24,8456210 9	28,783595 7
2010	17,873152 3	30,59405273	3,2544846 2	9,5871972 7	12,38833984	5,3355542	33,827703 12	0,57380054	21,2878105 5	29,777023 44
2011	19,286485 52	33,94707812	3,4662922 4	9,3729511 7	13,25205273	5,3154047 9	34,553218 75	0,58737616	21,6977089 8	31,057388 67
2012	17,084126 02	30,40583203	3,3238125	8,4131142 6	11,61723633	4,9935683 6	32,722832 03	0,58261572	19,4103398 4	25,629074 22
2013	17,552759 8	30,63933008	3,1950886 2	8,3747802 7	11,90079297	5,3910688 5	31,609632 81	0,6266853	18,7788418	25,762056 64
2014	18,157629 45	32,98647266	3,4549006 3	7,7726093 8	12,0976748	5,4586933 6	31,406609 38	0,864422	21,2987871 1	25,994332 03

Jahr	Andere WZ	Datenverarbeitungsgerä- äte	Fahrzeuge	IKT	Unternehmensna- he DL	Öffentlich- e DL	Private Haushalte	Staatskonsu- m	Investition- en	Ausfuhren
2015	19,359558 95	37,67942969	4,1589335 9	6,1986025 4	11,44054785	5,7487094 7	31,280474 61	0,94188983	23,4383671 9	25,602683 59
2016	18,771336 17	36,31950781	3,8388593 8	6,6296489 3	10,73655664	5,5193237 3	31,300984 38	0,88957184	21,3400097 7	23,520283 2
2017	18,341122 22	37,17217969	4,4731308 6	5,8257983 4	10,24387305	5,0005092 8	29,749132 81	0,78528442	20,6392089 8	23,163052 73
2018	19,191692 34	39,92772266	4,4917578 1	5,6583378 9	10,5117168	5,3624213 9	30,214748 05	0,77066345	21,9038183 6	23,319017 58
2019	18,633491 62	39,02432812	4,3553706 1	5,5946049 8	10,35590527	5,1897963 9	29,268357 42	0,70949139	20,8039277 3	22,073695 31
2020	18,737558 48	39,17525	4,3838730 5	5,5116523 4	10,37410059	5,3958916	29,642425 78	0,84029883	21,6703886 7	21,360419 92

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

Tabelle F-147: Datengrundlage zu Abbildung 102

Jahr	Deutschland	EU	Übriges Europa	Asien	China	Indien	Ozeanien	Nord- und Mittelamerika	USA	Südamerika	Afrika	Naher Osten
2000	0,73	1,94	2,34	3,03	3,25	1,09	0,35	0,88	4,93	0,90	0,86	0,82
2001	0,74	1,94	2,34	3,07	3,42	1,11	0,36	0,87	4,86	0,92	0,89	0,87
2002	0,74	1,96	2,35	3,16	3,70	1,14	0,37	0,88	4,76	0,93	0,89	0,90
2003	0,75	2,02	2,42	3,28	4,32	1,18	0,37	0,91	4,81	0,98	0,94	0,94
2004	0,76	2,03	2,43	3,39	4,98	1,26	0,39	0,92	4,91	1,03	0,98	0,99
2005	0,75	2,03	2,42	3,48	5,65	1,32	0,39	0,93	4,94	1,05	1,03	1,05
2006	0,77	2,04	2,50	3,58	6,32	1,40	0,40	0,95	4,89	1,09	1,05	1,11

Jahr	Deutschland	EU	Übriges Europa	Asien	China	Indien	Ozeanien	Nord- und Mittelamerika	USA	Südamerika	Afrika	Naher Osten
2007	0,79	2,07	2,53	3,72	6,97	1,52	0,40	0,98	4,94	1,15	1,06	1,17
2008	0,78	1,99	2,49	3,72	7,13	1,61	0,41	0,95	4,77	1,26	1,12	1,26
2009	0,72	1,80	2,29	3,60	7,68	1,76	0,41	0,91	4,39	1,22	1,09	1,33
2010	0,76	1,87	2,43	3,81	8,40	1,86	0,40	0,94	4,62	1,33	1,16	1,41
2011	0,75	1,84	2,53	3,94	9,24	1,96	0,40	0,95	4,52	1,35	1,15	1,46
2012	0,77	1,79	2,57	4,05	9,43	2,10	0,40	0,98	4,40	1,40	1,19	1,53
2013	0,78	1,71	2,49	4,13	9,85	2,14	0,40	0,99	4,42	1,47	1,22	1,57
2014	0,73	1,65	2,42	4,16	9,95	2,33	0,39	0,99	4,46	1,50	1,25	1,64
2015	0,75	1,68	2,36	4,19	9,88	2,39	0,39	0,99	4,32	1,49	1,26	1,66
2016	0,74	1,67	2,36	4,29	10,01	2,47	0,40	1,00	4,28	1,46	1,29	1,70
2017	0,73	1,71	2,34	4,39	10,08	2,54	0,40	1,02	4,24	1,46	1,31	1,76
2018	0,71	1,68	2,39	4,51	10,19	2,70	0,40	1,01	4,33	1,45	1,33	1,81
2019	0,66	1,68	2,39	4,51	10,19	2,70	0,40	1,01	4,33	1,45	1,33	1,81
2020	0,61	1,68	2,39	4,51	10,19	2,70	0,40	1,01	4,33	1,45	1,33	1,81
2021	0,59	1,71	2,44	4,58	10,70	2,85	0,40	1,04	4,45	1,53	1,43	1,78
2022	0,57	1,71	2,30	4,64	10,78	3,09	0,41	1,04	4,42	1,55	1,46	1,81
2023	0,54	1,68	2,16	4,70	10,91	3,32	0,40	1,03	4,37	1,54	1,51	1,85
2024	0,52	1,65	2,11	4,76	11,05	3,53	0,40	1,02	4,35	1,53	1,56	1,89
2025	0,50	1,61	2,10	4,82	11,20	3,71	0,40	1,02	4,34	1,53	1,63	1,91
2026	0,48	1,58	2,09	4,88	11,36	3,90	0,40	1,03	4,34	1,53	1,69	1,94

Jahr	Deutschland	EU	Übriges Europa	Asien	China	Indien	Ozeanien	Nord- und Mittelamerika	USA	Südamerika	Afrika	Naher Osten
2027	0,47	1,55	2,08	4,95	11,51	4,10	0,39	1,03	4,34	1,53	1,77	1,96
2028	0,45	1,52	2,07	5,02	11,67	4,31	0,39	1,03	4,33	1,52	1,84	1,99
2029	0,43	1,49	2,06	5,09	11,82	4,52	0,39	1,03	4,33	1,51	1,92	2,01
2030	0,42	1,46	2,05	5,16	11,97	4,75	0,38	1,02	4,32	1,51	2,00	2,04
2031	0,40	1,43	2,04	5,23	12,08	4,96	0,38	1,02	4,32	1,49	2,08	2,06
2032	0,39	1,40	2,03	5,28	12,16	5,16	0,38	1,02	4,31	1,50	2,17	2,09
2033	0,37	1,37	2,01	5,33	12,21	5,34	0,38	1,02	4,30	1,51	2,25	2,11
2034	0,36	1,33	1,99	5,37	12,22	5,51	0,37	1,01	4,29	1,51	2,32	2,13
2035	0,34	1,29	1,97	5,40	12,19	5,67	0,37	1,00	4,27	1,51	2,40	2,14
2036	0,33	1,25	1,95	5,41	12,13	5,80	0,37	1,00	4,26	1,51	2,47	2,16
2037	0,32	1,21	1,92	5,42	12,03	5,91	0,36	1,00	4,24	1,51	2,54	2,17
2038	0,31	1,17	1,90	5,41	11,89	6,00	0,36	1,00	4,22	1,52	2,60	2,18
2039	0,30	1,14	1,87	5,40	11,72	6,06	0,35	0,99	4,19	1,53	2,66	2,18
2040	0,28	1,10	1,84	5,37	11,53	6,10	0,35	0,99	4,17	1,54	2,72	2,18
2041	0,27	1,06	1,80	5,34	11,33	6,14	0,35	0,99	4,14	1,55	2,77	2,19
2042	0,26	1,03	1,77	5,31	11,13	6,19	0,34	0,98	4,11	1,56	2,83	2,19
2043	0,25	0,99	1,74	5,29	10,93	6,24	0,34	0,98	4,08	1,57	2,89	2,19
2044	0,24	0,96	1,71	5,26	10,72	6,30	0,33	0,98	4,05	1,58	2,95	2,20
2045	0,23	0,93	1,67	5,24	10,51	6,36	0,33	0,97	4,02	1,59	3,01	2,20
2046	0,22	0,90	1,64	5,21	10,30	6,42	0,32	0,97	3,99	1,60	3,07	2,20

Jahr	Deutschland	EU	Übriges Europa	Asien	China	Indien	Ozeanien	Nord- und Mittelamerika	USA	Südamerika	Afrika	Naher Osten
2047	0,21	0,87	1,60	5,19	10,08	6,49	0,31	0,96	3,96	1,61	3,14	2,21
2048	0,20	0,84	1,57	5,17	9,85	6,55	0,31	0,96	3,93	1,62	3,20	2,21
2049	0,20	0,81	1,53	5,15	9,62	6,63	0,30	0,95	3,89	1,63	3,27	2,21
2050	0,20	0,79	1,50	5,13	9,38	6,70	0,29	0,95	3,86	1,65	3,34	2,22

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

Tabelle F-148: Datengrundlage zu Abbildung 103

Jahr	Fossile Energieträger	Metallerze	Nichtmetallische Mineralien	Biomasse
2000	10.029,95	4.940,70	23.846,99	18.375,70
2001	10.317,91	4.983,10	24.410,07	18.502,75
2002	10.415,53	5.025,26	25.283,31	18.688,70
2003	10.990,10	5.208,40	26.618,13	19.031,46
2004	11.561,28	5.454,69	28.382,91	19.737,53
2005	11.988,80	5.788,21	29.961,87	19.870,65
2006	12.500,02	6.152,12	31.808,31	20.223,96
2007	12.988,48	6.513,17	33.134,44	20.871,59
2008	13.289,37	6.666,10	32.970,16	21.604,61
2009	13.045,82	6.779,14	33.402,84	21.346,83
2010	14.006,37	7.339,33	36.008,86	21.680,71
2011	14.640,62	7.896,59	38.970,22	22.557,97
2012	14.916,53	8.069,57	41.198,95	23.010,90
2013	15.038,28	8.681,40	42.768,36	23.848,97
2014	15.140,28	9.156,48	43.451,48	24.175,51
2015	15.109,76	9.305,00	43.111,05	24.207,33
2016	14.665,22	9.493,43	43.298,48	24.606,28
2017	15.182,28	9.520,62	43.377,92	25.065,60
2018	15.594,32	9.335,00	43.574,36	25.123,72
2019	15.824,85	9.614,05	44.779,52	25.537,96
2020	15.800,27	9.635,56	44.785,23	25.550,95
2021	16.671,34	9.697,06	47.984,52	27.198,82
2022	16.940,60	9.942,47	49.759,42	27.874,90
2023	17.128,64	10.162,85	51.490,06	28.425,49
2024	17.376,62	10.402,19	53.404,79	29.105,69
2025	17.644,00	10.652,46	55.432,82	29.842,19
2026	17.928,26	10.916,75	57.560,45	30.600,77
2027	18.222,50	11.190,46	59.779,22	31.375,68
2028	18.526,14	11.472,81	62.089,74	32.165,98
2029	18.838,38	11.764,01	64.495,62	32.971,92
2030	19.160,96	12.064,28	67.001,48	33.794,57

Jahr	Fossile Energieträger	Metallerze	Nichtmetallische Mineralien	Biomasse
2031	19.458,91	12.355,76	69.476,54	34.576,04
2032	19.734,33	12.635,75	71.902,57	35.310,04
2033	19.979,35	12.902,42	74.268,31	35.994,79
2034	20.191,84	13.154,11	76.561,42	36.627,19
2035	20.369,76	13.389,08	78.768,92	37.204,25
2036	20.511,66	13.605,98	80.879,19	37.723,19
2037	20.616,17	13.803,31	82.880,20	38.181,45
2038	20.689,38	13.979,59	84.761,48	38.577,64
2039	20.724,27	14.133,96	86.511,75	38.909,42
2040	20.718,55	14.265,06	88.119,57	39.174,81
2041	20.719,59	14.402,46	89.806,26	39.462,61
2042	20.729,13	14.548,24	91.580,76	39.771,51
2043	20.747,34	14.702,96	93.447,50	40.102,37
2044	20.774,13	14.866,71	95.408,90	40.454,76
2045	20.811,27	15.040,29	97.472,07	40.829,86
2046	20.856,97	15.223,78	99.638,95	41.227,24
2047	20.911,82	15.417,57	101.914,54	41.646,98
2048	20.978,54	15.621,80	104.302,86	42.089,16
2049	21.056,38	15.836,78	106.807,92	42.553,76
2050	21.147,38	16.062,87	109.435,21	43.040,86

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

Tabelle F-149: Datengrundlage zu Abbildung 109

Jahr	Rohstoffeinsatz (RMI)	Material- fußabdruck (RMC)	Brutto- inlandsprodukt	Bevölkerung	CO ₂ -Fußabdruck
2020	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00
2021	105,64	97,73	101,56	100,15	95,49
2022	106,39	96,41	102,51	100,19	92,09
2023	105,56	93,55	102,09	100,05	87,48
2024	105,55	92,11	102,57	100,01	84,33
2025	105,49	90,52	103,08	99,95	81,12
2026	105,50	88,94	103,64	99,88	77,99
2027	105,57	87,36	104,24	99,80	74,93
2028	105,66	85,76	104,85	99,70	71,91
2029	105,76	84,14	105,47	99,59	68,94
2030	105,87	82,50	106,10	99,46	66,02
2031	106,05	81,01	106,81	99,32	63,30
2032	106,27	79,66	107,59	99,18	60,72
2033	106,51	78,42	108,41	99,02	58,32
2034	106,76	77,28	109,27	98,85	56,03
2035	107,01	76,24	110,16	98,66	53,87
2036	107,26	75,28	111,07	98,47	51,83
2037	107,49	74,40	111,98	98,27	49,93
2038	107,70	73,60	112,90	98,07	48,13
2039	107,89	72,88	113,81	97,85	46,45
2040	108,04	72,22	114,71	97,63	44,84
2041	108,20	71,52	115,61	97,40	43,23
2042	108,40	70,81	116,54	97,17	41,64
2043	108,63	70,10	117,50	96,92	40,07
2044	108,89	69,38	118,51	96,66	38,53
2045	109,22	68,67	119,56	96,40	37,03
2046	109,60	67,97	120,66	96,13	35,54
2047	110,02	67,26	121,80	95,85	34,06
2048	110,50	66,56	122,99	95,56	32,61
2049	111,09	65,93	124,23	95,26	31,41
2050	111,83	65,42	125,51	94,95	30,61

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

Tabelle F-150: Datengrundlage zu Abbildung 110

Jahr	RMI	RMC
2020	3.178,52	1.701,41
2021	3.357,88	1.662,85
2022	3.381,50	1.640,30
2023	3.355,23	1.591,68
2024	3.354,90	1.567,23
2025	3.352,87	1.540,19
2026	3.353,42	1.513,26
2027	3.355,50	1.486,38
2028	3.358,28	1.459,20
2029	3.361,52	1.431,63
2030	3.365,12	1.403,60
2031	3.370,73	1.378,38
2032	3.377,66	1.355,36
2033	3.385,34	1.334,26
2034	3.393,35	1.314,88
2035	3.401,38	1.297,09
2036	3.409,15	1.280,75
2037	3.416,49	1.265,82
2038	3.423,27	1.252,26
2039	3.429,29	1.239,96
2040	3.434,22	1.228,79
2041	3.439,31	1.216,86
2042	3.445,43	1.204,82
2043	3.452,79	1.192,72
2044	3.461,19	1.180,49

Jahr	RMI	RMC
2045	3.471,67	1.168,43
2046	3.483,70	1.156,44
2047	3.497,13	1.144,41
2048	3.512,19	1.132,44
2049	3.530,88	1.121,71
2050	3.554,53	1.112,99

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

Tabelle F-151: Datengrundlage zu Abbildung 111

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2020	Deutschland	526,33
2020	EU	123,11
2020	Übriges Europa	60,17
2020	Asien	44,57
2020	China	82,84
2020	Indien	22,30
2020	Ozeanien	2,25
2020	Nord- und Mittelamerika	7,91
2020	USA	24,12
2020	Südamerika	21,07
2020	Afrika	25,02
2020	Naher Osten	14,28
2021	Deutschland	490,20
2021	EU	118,06
2021	Übriges Europa	58,66

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2021	Asien	44,13
2021	China	83,36
2021	Indien	22,63
2021	Ozeanien	2,27
2021	Nord- und Mittelamerika	7,91
2021	USA	23,05
2021	Südamerika	21,36
2021	Afrika	24,77
2021	Naher Osten	14,52
2022	Deutschland	469,94
2022	EU	113,90
2022	Übriges Europa	56,26
2022	Asien	43,00
2022	China	81,34
2022	Indien	22,24
2022	Ozeanien	2,20
2022	Nord- und Mittelamerika	7,73
2022	USA	22,37
2022	Südamerika	20,95
2022	Afrika	24,29
2022	Naher Osten	14,29
2023	Deutschland	443,72
2023	EU	108,11
2023	Übriges Europa	53,20

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2023	Asien	41,21
2023	China	78,11
2023	Indien	21,50
2023	Ozeanien	2,09
2023	Nord- und Mittelamerika	7,43
2023	USA	21,64
2023	Südamerika	20,19
2023	Afrika	23,46
2023	Naher Osten	13,84
2024	Deutschland	424,84
2024	EU	104,27
2024	Übriges Europa	51,15
2024	Asien	40,08
2024	China	76,10
2024	Indien	21,10
2024	Ozeanien	2,02
2024	Nord- und Mittelamerika	7,25
2024	USA	21,24
2024	Südamerika	19,75
2024	Afrika	23,05
2024	Naher Osten	13,60
2025	Deutschland	405,61
2025	EU	100,37
2025	Übriges Europa	49,23

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2025	Asien	38,92
2025	China	73,99
2025	Indien	20,68
2025	Ozeanien	1,95
2025	Nord- und Mittelamerika	7,08
2025	USA	20,80
2025	Südamerika	19,26
2025	Afrika	22,61
2025	Naher Osten	13,34
2026	Deutschland	386,89
2026	EU	96,55
2026	Übriges Europa	47,47
2026	Asien	37,77
2026	China	71,89
2026	Indien	20,26
2026	Ozeanien	1,88
2026	Nord- und Mittelamerika	6,90
2026	USA	20,37
2026	Südamerika	18,78
2026	Afrika	22,18
2026	Naher Osten	13,08
2027	Deutschland	368,57
2027	EU	92,80
2027	Übriges Europa	45,87

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2027	Asien	36,63
2027	China	69,81
2027	Indien	19,84
2027	Ozeanien	1,81
2027	Nord- und Mittelamerika	6,73
2027	USA	19,93
2027	Südamerika	18,29
2027	Afrika	21,74
2027	Naher Osten	12,82
2028	Deutschland	350,54
2028	EU	89,10
2028	Übriges Europa	44,32
2028	Asien	35,49
2028	China	67,72
2028	Indien	19,42
2028	Ozeanien	1,74
2028	Nord- und Mittelamerika	6,56
2028	USA	19,50
2028	Südamerika	17,80
2028	Afrika	21,30
2028	Naher Osten	12,56
2029	Deutschland	332,91
2029	EU	85,46
2029	Übriges Europa	42,78

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2029	Asien	34,34
2029	China	65,62
2029	Indien	18,99
2029	Ozeanien	1,67
2029	Nord- und Mittelamerika	6,38
2029	USA	19,05
2029	Südamerika	17,30
2029	Afrika	20,85
2029	Naher Osten	12,28
2030	Deutschland	315,81
2030	EU	81,85
2030	Übriges Europa	41,27
2030	Asien	33,20
2030	China	63,51
2030	Indien	18,56
2030	Ozeanien	1,61
2030	Nord- und Mittelamerika	6,21
2030	USA	18,61
2030	Südamerika	16,79
2030	Afrika	20,41
2030	Naher Osten	12,01
2031	Deutschland	299,80
2031	EU	78,48
2031	Übriges Europa	39,87

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2031	Asien	32,13
2031	China	61,52
2031	Indien	18,16
2031	Ozeanien	1,55
2031	Nord- und Mittelamerika	6,04
2031	USA	18,20
2031	Südamerika	16,31
2031	Afrika	20,01
2031	Naher Osten	11,75
2032	Deutschland	284,57
2032	EU	75,33
2032	Übriges Europa	38,56
2032	Asien	31,13
2032	China	59,63
2032	Indien	17,79
2032	Ozeanien	1,49
2032	Nord- und Mittelamerika	5,89
2032	USA	17,82
2032	Südamerika	15,93
2032	Afrika	19,63
2032	Naher Osten	11,52
2033	Deutschland	270,47
2033	EU	72,37
2033	Übriges Europa	37,31

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2033	Asien	30,17
2033	China	57,81
2033	Indien	17,44
2033	Ozeanien	1,44
2033	Nord- und Mittelamerika	5,74
2033	USA	17,46
2033	Südamerika	15,58
2033	Afrika	19,29
2033	Naher Osten	11,29
2034	Deutschland	257,00
2034	EU	69,57
2034	Übriges Europa	36,13
2034	Asien	29,25
2034	China	56,05
2034	Indien	17,13
2034	Ozeanien	1,39
2034	Nord- und Mittelamerika	5,60
2034	USA	17,13
2034	Südamerika	15,24
2034	Afrika	18,96
2034	Naher Osten	11,08
2035	Deutschland	244,28
2035	EU	66,91
2035	Übriges Europa	35,00

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2035	Asien	28,36
2035	China	54,36
2035	Indien	16,86
2035	Ozeanien	1,34
2035	Nord- und Mittelamerika	5,46
2035	USA	16,82
2035	Südamerika	14,93
2035	Afrika	18,65
2035	Naher Osten	10,88
2036	Deutschland	232,47
2036	EU	64,37
2036	Übriges Europa	33,91
2036	Asien	27,52
2036	China	52,71
2036	Indien	16,60
2036	Ozeanien	1,30
2036	Nord- und Mittelamerika	5,35
2036	USA	16,53
2036	Südamerika	14,63
2036	Afrika	18,37
2036	Naher Osten	10,69
2037	Deutschland	221,57
2037	EU	61,93
2037	Übriges Europa	32,95

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2037	Asien	26,70
2037	China	51,12
2037	Indien	16,36
2037	Ozeanien	1,25
2037	Nord- und Mittelamerika	5,25
2037	USA	16,26
2037	Südamerika	14,35
2037	Afrika	18,09
2037	Naher Osten	10,51
2038	Deutschland	211,17
2038	EU	59,67
2038	Übriges Europa	32,06
2038	Asien	25,92
2038	China	49,56
2038	Indien	16,13
2038	Ozeanien	1,21
2038	Nord- und Mittelamerika	5,15
2038	USA	16,00
2038	Südamerika	14,15
2038	Afrika	17,84
2038	Naher Osten	10,34
2039	Deutschland	201,25
2039	EU	57,62
2039	Übriges Europa	31,20

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2039	Asien	25,33
2039	China	48,06
2039	Indien	15,91
2039	Ozeanien	1,17
2039	Nord- und Mittelamerika	5,06
2039	USA	15,76
2039	Südamerika	13,95
2039	Afrika	17,59
2039	Naher Osten	10,18
2040	Deutschland	191,69
2040	EU	55,65
2040	Übriges Europa	30,37
2040	Asien	24,76
2040	China	46,81
2040	Indien	15,70
2040	Ozeanien	1,13
2040	Nord- und Mittelamerika	4,98
2040	USA	15,54
2040	Südamerika	13,78
2040	Afrika	17,36
2040	Naher Osten	10,03
2041	Deutschland	182,13
2041	EU	53,67
2041	Übriges Europa	29,52

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2041	Asien	24,18
2041	China	45,52
2041	Indien	15,47
2041	Ozeanien	1,09
2041	Nord- und Mittelamerika	4,89
2041	USA	15,30
2041	Südamerika	13,60
2041	Afrika	17,12
2041	Naher Osten	9,87
2042	Deutschland	172,82
2042	EU	51,73
2042	Übriges Europa	28,71
2042	Asien	23,59
2042	China	44,21
2042	Indien	15,24
2042	Ozeanien	1,06
2042	Nord- und Mittelamerika	4,80
2042	USA	15,07
2042	Südamerika	13,42
2042	Afrika	16,87
2042	Naher Osten	9,71
2043	Deutschland	163,65
2043	EU	49,87
2043	Übriges Europa	27,90

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2043	Asien	23,00
2043	China	42,89
2043	Indien	15,00
2043	Ozeanien	1,02
2043	Nord- und Mittelamerika	4,71
2043	USA	14,83
2043	Südamerika	13,23
2043	Afrika	16,62
2043	Naher Osten	9,54
2044	Deutschland	154,79
2044	EU	48,02
2044	Übriges Europa	27,11
2044	Asien	22,41
2044	China	41,55
2044	Indien	14,75
2044	Ozeanien	0,99
2044	Nord- und Mittelamerika	4,62
2044	USA	14,59
2044	Südamerika	13,05
2044	Afrika	16,36
2044	Naher Osten	9,38
2045	Deutschland	146,18
2045	EU	46,21
2045	Übriges Europa	26,32

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2045	Asien	21,82
2045	China	40,21
2045	Indien	14,51
2045	Ozeanien	0,95
2045	Nord- und Mittelamerika	4,53
2045	USA	14,35
2045	Südamerika	12,87
2045	Afrika	16,10
2045	Naher Osten	9,21
2046	Deutschland	137,68
2046	EU	44,42
2046	Übriges Europa	25,54
2046	Asien	21,23
2046	China	38,86
2046	Indien	14,26
2046	Ozeanien	0,92
2046	Nord- und Mittelamerika	4,44
2046	USA	14,12
2046	Südamerika	12,69
2046	Afrika	15,85
2046	Naher Osten	9,05
2047	Deutschland	129,27
2047	EU	42,64
2047	Übriges Europa	24,77

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2047	Asien	20,68
2047	China	37,51
2047	Indien	14,00
2047	Ozeanien	0,89
2047	Nord- und Mittelamerika	4,35
2047	USA	13,88
2047	Südamerika	12,51
2047	Afrika	15,59
2047	Naher Osten	8,88
2048	Deutschland	120,95
2048	EU	40,96
2048	Übriges Europa	24,00
2048	Asien	20,12
2048	China	36,15
2048	Indien	13,74
2048	Ozeanien	0,86
2048	Nord- und Mittelamerika	4,26
2048	USA	13,64
2048	Südamerika	12,33
2048	Afrika	15,34
2048	Naher Osten	8,72
2049	Deutschland	115,04
2049	EU	39,32
2049	Übriges Europa	23,25

Jahr	Länder/Regionen	Wert
2049	Asien	19,57
2049	China	34,79
2049	Indien	13,48
2049	Ozeanien	0,83
2049	Nord- und Mittelamerika	4,17
2049	USA	13,41
2049	Südamerika	12,16
2049	Afrika	15,08
2049	Naher Osten	8,55
2050	Deutschland	112,72
2050	EU	37,72
2050	Übriges Europa	22,59
2050	Asien	19,04
2050	China	33,43
2050	Indien	13,22
2050	Ozeanien	0,80
2050	Nord- und Mittelamerika	4,08
2050	USA	13,17
2050	Südamerika	11,99
2050	Afrika	14,83
2050	Naher Osten	8,39

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

Tabelle F-152: Datengrundlage zu Abbildung 113

Produktgruppe	Jahr	Wert	Szenario
Hardware	2025	33,53	Trend

Produktgruppe	Jahr	Wert	Szenario
Großhandel	2025	1,76	Trend
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2025	0,29	Trend
Telekommunikation	2025	5,02	Trend
Informationsdienste	2025	2,04	Trend
Hardware	2030	26,91	Trend
Großhandel	2030	1,44	Trend
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2030	0,23	Trend
Telekommunikation	2030	3,88	Trend
Informationsdienste	2030	1,62	Trend
Hardware	2040	17,67	Trend
Großhandel	2040	0,96	Trend
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2040	0,13	Trend
Telekommunikation	2040	2,45	Trend
Informationsdienste	2040	1,01	Trend
Hardware	2050	12,28	Trend
Großhandel	2050	0,57	Trend
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2050	0,08	Trend
Telekommunikation	2050	1,49	Trend
Informationsdienste	2050	0,59	Trend
Hardware	2025	33,65	More but Softer
Großhandel	2025	1,76	More but Softer
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2025	0,29	More but Softer
Telekommunikation	2025	5,09	More but Softer
Informationsdienste	2025	2,04	More but Softer
Hardware	2030	27,25	More but Softer
Großhandel	2030	1,43	More but Softer
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2030	0,22	More but Softer
Telekommunikation	2030	4,09	More but Softer
Informationsdienste	2030	1,63	More but Softer

Produktgruppe	Jahr	Wert	Szenario
Hardware	2040	18,23	More but Softer
Großhandel	2040	0,93	More but Softer
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2040	0,13	More but Softer
Telekommunikation	2040	2,75	More but Softer
Informationsdienste	2040	1,01	More but Softer
Hardware	2050	12,92	More but Softer
Großhandel	2050	0,55	More but Softer
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2050	0,08	More but Softer
Telekommunikation	2050	1,77	More but Softer
Informationsdienste	2050	0,59	More but Softer
Hardware	2025	33,88	More, Bigger and Faster
Großhandel	2025	1,75	More, Bigger and Faster
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2025	0,29	More, Bigger and Faster
Telekommunikation	2025	5,24	More, Bigger and Faster
Informationsdienste	2025	2,04	More, Bigger and Faster
Hardware	2030	27,94	More, Bigger and Faster
Großhandel	2030	1,40	More, Bigger and Faster
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2030	0,22	More, Bigger and Faster
Telekommunikation	2030	4,48	More, Bigger and Faster
Informationsdienste	2030	1,63	More, Bigger and Faster
Hardware	2040	19,37	More, Bigger and Faster
Großhandel	2040	0,89	More, Bigger and Faster
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2040	0,12	More, Bigger and Faster
Telekommunikation	2040	3,33	More, Bigger and Faster
Informationsdienste	2040	1,03	More, Bigger and Faster
Hardware	2050	14,23	More, Bigger and Faster
Großhandel	2050	0,51	More, Bigger and Faster
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2050	0,07	More, Bigger and Faster
Telekommunikation	2050	2,31	More, Bigger and Faster

Produktgruppe	Jahr	Wert	Szenario
Informationsdienste	2050	0,61	More, Bigger and Faster
Hardware	2025	33,53	Material-Lighter ICT Hardware
Großhandel	2025	1,76	Material-Lighter ICT Hardware
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2025	0,29	Material-Lighter ICT Hardware
Telekommunikation	2025	5,02	Material-Lighter ICT Hardware
Informationsdienste	2025	2,04	Material-Lighter ICT Hardware
Hardware	2030	26,90	Material-Lighter ICT Hardware
Großhandel	2030	1,44	Material-Lighter ICT Hardware
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2030	0,23	Material-Lighter ICT Hardware
Telekommunikation	2030	3,88	Material-Lighter ICT Hardware
Informationsdienste	2030	1,62	Material-Lighter ICT Hardware
Hardware	2040	17,65	Material-Lighter ICT Hardware
Großhandel	2040	0,95	Material-Lighter ICT Hardware
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2040	0,13	Material-Lighter ICT Hardware
Telekommunikation	2040	2,45	Material-Lighter ICT Hardware
Informationsdienste	2040	1,01	Material-Lighter ICT Hardware
Hardware	2050	12,25	Material-Lighter ICT Hardware
Großhandel	2050	0,57	Material-Lighter ICT Hardware
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2050	0,08	Material-Lighter ICT Hardware
Telekommunikation	2050	1,48	Material-Lighter ICT Hardware
Informationsdienste	2050	0,59	Material-Lighter ICT Hardware

Produktgruppe	Jahr	Wert	Szenario
Hardware	2020	42,29	Less, Softer and Greener
Großhandel	2020	2,16	Less, Softer and Greener
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2020	0,38	Less, Softer and Greener
Telekommunikation	2020	6,51	Less, Softer and Greener
Informationsdienste	2020	2,57	Less, Softer and Greener
Hardware	2025	33,38	Less, Softer and Greener
Großhandel	2025	1,77	Less, Softer and Greener
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2025	0,29	Less, Softer and Greener
Telekommunikation	2025	4,90	Less, Softer and Greener
Informationsdienste	2025	2,03	Less, Softer and Greener
Hardware	2030	26,48	Less, Softer and Greener
Großhandel	2030	1,46	Less, Softer and Greener
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2030	0,23	Less, Softer and Greener
Telekommunikation	2030	3,52	Less, Softer and Greener
Informationsdienste	2030	1,57	Less, Softer and Greener
Hardware	2040	16,94	Less, Softer and Greener
Großhandel	2040	0,98	Less, Softer and Greener
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2040	0,13	Less, Softer and Greener
Telekommunikation	2040	1,76	Less, Softer and Greener
Informationsdienste	2040	0,88	Less, Softer and Greener
Hardware	2050	11,48	Less, Softer and Greener
Großhandel	2050	0,60	Less, Softer and Greener
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2050	0,09	Less, Softer and Greener
Telekommunikation	2050	1,07	Less, Softer and Greener
Informationsdienste	2050	0,56	Less, Softer and Greener
Hardware	2025	33,39	Less and Softer
Großhandel	2025	1,77	Less and Softer
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2025	0,29	Less and Softer
Telekommunikation	2025	4,93	Less and Softer

Produktgruppe	Jahr	Wert	Szenario
Informationsdienste	2025	2,04	Less and Softer
Hardware	2030	26,50	Less and Softer
Großhandel	2030	1,46	Less and Softer
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2030	0,23	Less and Softer
Telekommunikation	2030	3,64	Less and Softer
Informationsdienste	2030	1,62	Less and Softer
Hardware	2040	17,01	Less and Softer
Großhandel	2040	0,99	Less and Softer
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2040	0,14	Less and Softer
Telekommunikation	2040	2,07	Less and Softer
Informationsdienste	2040	1,00	Less and Softer
Hardware	2050	11,53	Less and Softer
Großhandel	2050	0,61	Less and Softer
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2050	0,09	Less and Softer
Telekommunikation	2050	1,11	Less and Softer
Informationsdienste	2050	0,59	Less and Softer
Hardware	2025	33,52	Greener ICT
Großhandel	2025	1,76	Greener ICT
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2025	0,29	Greener ICT
Telekommunikation	2025	4,99	Greener ICT
Informationsdienste	2025	2,03	Greener ICT
Hardware	2030	26,89	Greener ICT
Großhandel	2030	1,44	Greener ICT
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2030	0,22	Greener ICT
Telekommunikation	2030	3,75	Greener ICT
Informationsdienste	2030	1,57	Greener ICT
Hardware	2040	17,62	Greener ICT
Großhandel	2040	0,95	Greener ICT
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2040	0,13	Greener ICT

Produktgruppe	Jahr	Wert	Szenario
Telekommunikation	2040	2,08	Greener ICT
Informationsdienste	2040	0,89	Greener ICT
Hardware	2050	12,22	Greener ICT
Großhandel	2050	0,57	Greener ICT
Sonstige IKT-Dienstleistungen	2050	0,08	Greener ICT
Telekommunikation	2050	1,42	Greener ICT
Informationsdienste	2050	0,56	Greener ICT

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

Tabelle F-153: Datengrundlage zu Abbildung 114

Jahr	Szenario	Produktgruppe	Differenzen
2030	More but Softer	Hardware	0,34
2030	More but Softer	Großhandel	-0,02
2030	More but Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2030	More but Softer	Telekommunikation	0,20
2030	More but Softer	Informationsdienste	0,00
2040	More but Softer	Hardware	0,56
2040	More but Softer	Großhandel	-0,03
2040	More but Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2040	More but Softer	Telekommunikation	0,30
2040	More but Softer	Informationsdienste	0,00
2050	More but Softer	Hardware	0,64
2050	More but Softer	Großhandel	-0,02
2050	More but Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2050	More but Softer	Telekommunikation	0,29
2050	More but Softer	Informationsdienste	0,01
2030	More, Bigger and Faster	Hardware	1,03
2030	More, Bigger and Faster	Großhandel	-0,04
2030	More, Bigger and Faster	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-0,01
2030	More, Bigger and Faster	Telekommunikation	0,60
2030	More, Bigger and Faster	Informationsdienste	0,01

Jahr	Szenario	Produktgruppe	Differenzen
2040	More, Bigger and Faster	Hardware	1,70
2040	More, Bigger and Faster	Großhandel	-0,07
2040	More, Bigger and Faster	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-0,01
2040	More, Bigger and Faster	Telekommunikation	0,88
2040	More, Bigger and Faster	Informationsdienste	0,02
2050	More, Bigger and Faster	Hardware	1,95
2050	More, Bigger and Faster	Großhandel	-0,06
2050	More, Bigger and Faster	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-0,01
2050	More, Bigger and Faster	Telekommunikation	0,83
2050	More, Bigger and Faster	Informationsdienste	0,02
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Hardware	-0,01
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Großhandel	0,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Telekommunikation	0,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Informationsdienste	0,00
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Hardware	-0,02
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Großhandel	0,00
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Telekommunikation	0,00
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Informationsdienste	0,00
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Hardware	-0,03
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Großhandel	0,00
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00

Jahr	Szenario	Produktgruppe	Differenzen
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Telekommunikation	-0,01
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Informationsdienste	0,00
2030	Less, Softer and Greener	Hardware	-0,43
2030	Less, Softer and Greener	Großhandel	0,02
2030	Less, Softer and Greener	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2030	Less, Softer and Greener	Telekommunikation	-0,37
2030	Less, Softer and Greener	Informationsdienste	-0,05
2040	Less, Softer and Greener	Hardware	-0,73
2040	Less, Softer and Greener	Großhandel	0,02
2040	Less, Softer and Greener	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2040	Less, Softer and Greener	Telekommunikation	-0,69
2040	Less, Softer and Greener	Informationsdienste	-0,12
2050	Less, Softer and Greener	Hardware	-0,81
2050	Less, Softer and Greener	Großhandel	0,03
2050	Less, Softer and Greener	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2050	Less, Softer and Greener	Telekommunikation	-0,42
2050	Less, Softer and Greener	Informationsdienste	-0,03
2030	Less and Softer	Hardware	-0,41
2030	Less and Softer	Großhandel	0,02
2030	Less and Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2030	Less and Softer	Telekommunikation	-0,25
2030	Less and Softer	Informationsdienste	0,00
2040	Less and Softer	Hardware	-0,66
2040	Less and Softer	Großhandel	0,04
2040	Less and Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2040	Less and Softer	Telekommunikation	-0,38
2040	Less and Softer	Informationsdienste	0,00
2050	Less and Softer	Hardware	-0,75
2050	Less and Softer	Großhandel	0,04

Jahr	Szenario	Produktgruppe	Differenzen
2050	Less and Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2050	Less and Softer	Telekommunikation	-0,37
2050	Less and Softer	Informationsdienste	0,00
2030	Greener ICT	Hardware	-0,02
2030	Greener ICT	Großhandel	0,00
2030	Greener ICT	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2030	Greener ICT	Telekommunikation	-0,13
2030	Greener ICT	Informationsdienste	-0,05
2040	Greener ICT	Hardware	-0,06
2040	Greener ICT	Großhandel	-0,01
2040	Greener ICT	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2040	Greener ICT	Telekommunikation	-0,36
2040	Greener ICT	Informationsdienste	-0,12
2050	Greener ICT	Hardware	-0,06
2050	Greener ICT	Großhandel	-0,01
2050	Greener ICT	Sonstige IKT-Dienstleistungen	0,00
2050	Greener ICT	Telekommunikation	-0,06
2050	Greener ICT	Informationsdienste	-0,03

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

Tabelle F-154: Datengrundlage zu Abbildung 115

Jahr	Szenario	Produktgruppe	Differenzen
2030	More but Softer	Hardware	647,30
2030	More but Softer	Großhandel	-84,38
2030	More but Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-14,90
2030	More but Softer	Telekommunikation	756,86
2030	More but Softer	Informationsdienste	-40,88
2040	More but Softer	Hardware	1.397,14
2040	More but Softer	Großhandel	-209,90
2040	More but Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-36,86
2040	More but Softer	Telekommunikation	1.733,06

Jahr	Szenario	Produktgruppe	Differenzen
2040	More but Softer	Informationsdienste	-104,53
2050	More but Softer	Hardware	2.028,35
2050	More but Softer	Großhandel	-340,96
2050	More but Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-60,38
2050	More but Softer	Telekommunikation	2.655,10
2050	More but Softer	Informationsdienste	-167,57
2030	More, Bigger and Faster	Hardware	1.986,27
2030	More, Bigger and Faster	Großhandel	-240,20
2030	More, Bigger and Faster	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-42,37
2030	More, Bigger and Faster	Telekommunikation	2.206,59
2030	More, Bigger and Faster	Informationsdienste	-112,40
2040	More, Bigger and Faster	Hardware	4.428,44
2040	More, Bigger and Faster	Großhandel	-558,17
2040	More, Bigger and Faster	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-97,86
2040	More, Bigger and Faster	Telekommunikation	4.855,88
2040	More, Bigger and Faster	Informationsdienste	-258,96
2050	More, Bigger and Faster	Hardware	6.636,63
2050	More, Bigger and Faster	Großhandel	-852,79
2050	More, Bigger and Faster	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-150,66
2050	More, Bigger and Faster	Telekommunikation	7.167,72
2050	More, Bigger and Faster	Informationsdienste	-378,52
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Hardware	-72,23
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Großhandel	-2,21
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-0,46
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Telekommunikation	-10,50
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Informationsdienste	-3,81
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Hardware	-265,18
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Großhandel	-8,76

Jahr	Szenario	Produktgruppe	Differenzen
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-1,85
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Telekommunikation	-43,58
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Informationsdienste	-15,36
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Hardware	-544,37
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Großhandel	-18,88
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-4,03
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Telekommunikation	-98,73
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Informationsdienste	-33,33
2030	Less, Softer and Greener	Hardware	-796,24
2030	Less, Softer and Greener	Großhandel	103,88
2030	Less, Softer and Greener	Sonstige IKT-Dienstleistungen	17,26
2030	Less, Softer and Greener	Telekommunikation	-1.131,58
2030	Less, Softer and Greener	Informationsdienste	-19,89
2040	Less, Softer and Greener	Hardware	-1.651,41
2040	Less, Softer and Greener	Großhandel	283,31
2040	Less, Softer and Greener	Sonstige IKT-Dienstleistungen	45,66
2040	Less, Softer and Greener	Telekommunikation	-2.880,82
2040	Less, Softer and Greener	Informationsdienste	-60,62
2050	Less, Softer and Greener	Hardware	-2.284,31
2050	Less, Softer and Greener	Großhandel	506,30
2050	Less, Softer and Greener	Sonstige IKT-Dienstleistungen	83,50
2050	Less, Softer and Greener	Telekommunikation	-4.197,75
2050	Less, Softer and Greener	Informationsdienste	-5,31
2030	Less and Softer	Hardware	-754,77
2030	Less and Softer	Großhandel	107,65
2030	Less and Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	19,02
2030	Less and Softer	Telekommunikation	-939,79
2030	Less and Softer	Informationsdienste	54,11

Jahr	Szenario	Produktgruppe	Differenzen
2040	Less and Softer	Hardware	-1.541,91
2040	Less and Softer	Großhandel	293,17
2040	Less and Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	51,58
2040	Less and Softer	Telekommunikation	-2.278,54
2040	Less and Softer	Informationsdienste	156,85
2050	Less and Softer	Hardware	-2.075,40
2050	Less and Softer	Großhandel	523,78
2050	Less and Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	92,99
2050	Less and Softer	Telekommunikation	-3.727,66
2050	Less and Softer	Informationsdienste	284,36
2030	Greener ICT	Hardware	-38,13
2030	Greener ICT	Großhandel	-3,41
2030	Greener ICT	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-1,68
2030	Greener ICT	Telekommunikation	-201,70
2030	Greener ICT	Informationsdienste	-72,95
2040	Greener ICT	Hardware	-73,60
2040	Greener ICT	Großhandel	-6,57
2040	Greener ICT	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-5,13
2040	Greener ICT	Telekommunikation	-687,66
2040	Greener ICT	Informationsdienste	-209,23
2050	Greener ICT	Hardware	-160,00
2050	Greener ICT	Großhandel	-13,30
2050	Greener ICT	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-8,19
2050	Greener ICT	Telekommunikation	-595,29
2050	Greener ICT	Informationsdienste	-275,22

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

Tabelle F-155: Datengrundlage zu Abbildung 116

Jahr	Szenario	Produktgruppe	Differenzen
2030	More but Softer	Hardware	818,24
2030	More but Softer	Großhandel	-25,58
2030	More but Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-4,38
2030	More but Softer	Telekommunikation	451,94
2030	More but Softer	Informationsdienste	4,72
2040	More but Softer	Hardware	1.832,92
2040	More but Softer	Großhandel	-54,27
2040	More but Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-9,23
2040	More but Softer	Telekommunikation	953,72
2040	More but Softer	Informationsdienste	11,94
2050	More but Softer	Hardware	2.748,64
2050	More but Softer	Großhandel	-77,47
2050	More but Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-13,28
2050	More but Softer	Telekommunikation	1.370,14
2050	More but Softer	Informationsdienste	20,88
2030	More, Bigger and Faster	Hardware	2.471,23
2030	More, Bigger and Faster	Großhandel	-72,71
2030	More, Bigger and Faster	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-12,41
2030	More, Bigger and Faster	Telekommunikation	1.337,18
2030	More, Bigger and Faster	Informationsdienste	17,43
2040	More, Bigger and Faster	Hardware	5.578,18
2040	More, Bigger and Faster	Großhandel	-143,86
2040	More, Bigger and Faster	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-24,31
2040	More, Bigger and Faster	Telekommunikation	2.776,69
2040	More, Bigger and Faster	Informationsdienste	50,74
2050	More, Bigger and Faster	Hardware	8.416,79
2050	More, Bigger and Faster	Großhandel	-192,75
2050	More, Bigger and Faster	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-32,70
2050	More, Bigger and Faster	Telekommunikation	3.939,84
2050	More, Bigger and Faster	Informationsdienste	92,71
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Hardware	-17,59

Jahr	Szenario	Produktgruppe	Differenzen
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Großhandel	-0,46
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-0,11
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Telekommunikation	-2,71
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Informationsdienste	-0,94
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Hardware	-67,03
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Großhandel	-2,10
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-0,49
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Telekommunikation	-12,35
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Informationsdienste	-4,24
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Hardware	-135,36
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Großhandel	-4,62
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-1,07
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Telekommunikation	-28,08
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Informationsdienste	-9,28
2030	Less, Softer and Greener	Hardware	-1.005,13
2030	Less, Softer and Greener	Großhandel	29,68
2030	Less, Softer and Greener	Sonstige IKT-Dienstleistungen	4,54
2030	Less, Softer and Greener	Telekommunikation	-651,34
2030	Less, Softer and Greener	Informationsdienste	-42,55
2040	Less, Softer and Greener	Hardware	-2.282,69
2040	Less, Softer and Greener	Großhandel	66,62
2040	Less, Softer and Greener	Sonstige IKT-Dienstleistungen	9,60
2040	Less, Softer and Greener	Telekommunikation	-1.468,69
2040	Less, Softer and Greener	Informationsdienste	-106,13
2050	Less, Softer and Greener	Hardware	-3.447,97

Jahr	Szenario	Produktgruppe	Differenzen
2050	Less, Softer and Greener	Großhandel	106,07
2050	Less, Softer and Greener	Sonstige IKT-Dienstleistungen	15,86
2050	Less, Softer and Greener	Telekommunikation	-1.962,11
2050	Less, Softer and Greener	Informationsdienste	-125,20
2030	Less and Softer	Hardware	-973,64
2030	Less and Softer	Großhandel	32,68
2030	Less and Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	5,61
2030	Less and Softer	Telekommunikation	-551,57
2030	Less and Softer	Informationsdienste	-4,06
2040	Less and Softer	Hardware	-2.155,67
2040	Less and Softer	Großhandel	76,09
2040	Less and Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	13,03
2040	Less and Softer	Telekommunikation	-1.194,15
2040	Less and Softer	Informationsdienste	-5,77
2050	Less and Softer	Hardware	-3.195,21
2050	Less and Softer	Großhandel	119,72
2050	Less and Softer	Sonstige IKT-Dienstleistungen	20,74
2050	Less and Softer	Telekommunikation	-1.763,42
2050	Less and Softer	Informationsdienste	-5,09
2030	Greener ICT	Hardware	-30,61
2030	Greener ICT	Großhandel	-2,85
2030	Greener ICT	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-1,04
2030	Greener ICT	Telekommunikation	-106,06
2030	Greener ICT	Informationsdienste	-38,36
2040	Greener ICT	Hardware	-118,57
2040	Greener ICT	Großhandel	-8,22
2040	Greener ICT	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-3,16
2040	Greener ICT	Telekommunikation	-322,38
2040	Greener ICT	Informationsdienste	-99,44
2050	Greener ICT	Hardware	-247,27
2050	Greener ICT	Großhandel	-11,89
2050	Greener ICT	Sonstige IKT-Dienstleistungen	-4,45
2050	Greener ICT	Telekommunikation	-262,91

Jahr	Szenario	Produktgruppe	Differenzen
2050	Greener ICT	Informationsdienste	-119,44

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

Tabelle F-156: Datengrundlage zu Abbildung 117

Szenario	Materialien	Relative Abweichung
More but Softer	Fossile Energieträger	6,05
More but Softer	Metallerze	6,33
More but Softer	Nichtmetallische Mineralien	6,39
More but Softer	Biomasse	5,90
More, Bigger and Faster	Fossile Energieträger	18,26
More, Bigger and Faster	Metallerze	19,11
More, Bigger and Faster	Nichtmetallische Mineralien	19,29
More, Bigger and Faster	Biomasse	17,82
Material-Lighter ICT Hardware	Fossile Energieträger	-0,27
Material-Lighter ICT Hardware	Metallerze	-0,32
Material-Lighter ICT Hardware	Nichtmetallische Mineralien	-0,26
Material-Lighter ICT Hardware	Biomasse	-0,25
Less, Softer and Greener	Fossile Energieträger	-9,75
Less, Softer and Greener	Metallerze	-8,15
Less, Softer and Greener	Nichtmetallische Mineralien	-8,29
Less, Softer and Greener	Biomasse	-7,62
Less and Softer	Fossile Energieträger	-7,20
Less and Softer	Metallerze	-7,54
Less and Softer	Nichtmetallische Mineralien	-7,61
Less and Softer	Biomasse	-7,03
Greener ICT	Fossile Energieträger	-2,86
Greener ICT	Metallerze	-0,66
Greener ICT	Nichtmetallische Mineralien	-0,74
Greener ICT	Biomasse	-0,63

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

Tabelle F-157: Datengrundlage zu Abbildung 118

Szenario	Materialien	Relative Abweichung
More but Softer	Fossile Energieträger	2,53
More but Softer	Metallerze	2,53
More but Softer	Nichtmetallische Mineralien	2,65
More but Softer	Biomasse	2,45
More, Bigger and Faster	Fossile Energieträger	7,63
More, Bigger and Faster	Metallerze	7,65
More, Bigger and Faster	Nichtmetallische Mineralien	7,99
More, Bigger and Faster	Biomasse	7,40
Material-Lighter ICT Hardware	Fossile Energieträger	-0,38
Material-Lighter ICT Hardware	Metallerze	-0,50
Material-Lighter ICT Hardware	Nichtmetallische Mineralien	-0,43
Material-Lighter ICT Hardware	Biomasse	-0,40
Less, Softer and Greener	Fossile Energieträger	-5,10
Less, Softer and Greener	Metallerze	-3,33
Less, Softer and Greener	Nichtmetallische Mineralien	-3,60
Less, Softer and Greener	Biomasse	-3,27
Less and Softer	Fossile Energieträger	-3,01
Less and Softer	Metallerze	-3,02
Less and Softer	Nichtmetallische Mineralien	-3,15
Less and Softer	Biomasse	-2,92
Greener ICT	Fossile Energieträger	-2,22
Greener ICT	Metallerze	-0,33
Greener ICT	Nichtmetallische Mineralien	-0,47
Greener ICT	Biomasse	-0,36

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

Tabelle F-158: Datengrundlage zu Abbildung 119

Jahr	More, Bigger and Faster	More but Softer	Trend	Material-Lighter ICT Hardware	Greener ICT	Less and Softer	Less, Softer and Greener
2020	95.413,02	95.413,02	95.413,02	95.413,02	95.413,02	95.413,02	95.413,02
2021	91.556,52	91.556,52	91.556,52	91.556,52	91.556,52	91.556,52	91.556,52
2022	90.468,48	90.468,48	90.468,48	90.468,48	90.468,48	90.468,48	90.468,48
2023	88.000,86	88.000,86	88.000,86	88.000,86	88.000,86	88.000,86	88.000,86
2024	87.393,79	87.006,66	86.813,06	86.812,10	86.798,72	86.580,85	86.566,59
2025	86.628,91	85.862,77	85.479,92	85.476,62	85.446,09	85.020,73	84.987,18
2026	85.846,23	84.711,36	84.144,45	84.138,48	84.087,04	83.464,81	83.408,17
2027	85.041,06	83.548,24	82.802,83	82.793,62	82.718,41	81.909,45	81.826,45
2028	84.197,54	82.358,20	81.440,09	81.427,20	81.326,32	80.340,09	80.228,51
2029	83.307,12	81.133,33	80.048,74	80.031,63	79.903,82	78.749,47	78.608,05
2030	82.370,13	79.874,37	78.629,43	78.607,63	78.450,52	77.138,47	76.964,63
2031	81.571,31	78.759,37	77.357,27	77.330,59	77.141,98	75.678,57	75.470,18
2032	80.879,43	77.756,97	76.200,59	76.168,65	75.947,51	74.337,71	74.093,66
2033	80.280,41	76.852,32	75.144,06	75.106,69	74.852,16	73.100,17	72.819,83
2034	79.766,63	76.036,94	74.178,84	74.135,58	73.847,69	71.956,42	71.639,66
2035	79.333,02	75.304,63	73.298,66	73.249,01	72.928,05	70.899,68	70.546,77
2036	78.974,21	74.649,52	72.496,70	72.440,49	72.087,42	69.923,13	69.534,80
2037	78.689,59	74.070,23	71.771,47	71.708,24	71.324,13	69.024,13	68.601,59
2038	78.479,31	73.565,71	71.121,45	71.050,99	70.637,36	68.200,95	67.745,66
2039	78.338,84	73.130,91	70.541,34	70.463,19	70.022,30	67.447,81	66.961,63
2040	78.261,14	72.758,78	70.023,69	69.937,46	69.471,93	66.757,20	66.242,41
2041	78.128,80	72.339,95	69.463,38	69.368,85	68.904,51	66.028,77	65.508,44
2042	77.981,94	71.911,27	68.895,91	68.792,69	68.320,14	65.296,15	64.761,81
2043	77.822,88	71.475,13	68.323,27	68.211,39	67.736,77	64.561,51	64.018,82
2044	77.577,00	70.958,34	67.672,95	67.552,20	67.078,79	63.752,99	63.204,83
2045	77.404,22	70.517,19	67.099,81	66.969,87	66.501,37	63.023,40	62.472,78
2046	77.228,34	70.076,73	66.529,52	66.390,14	65.922,95	62.299,18	61.741,92
2047	77.042,94	69.631,35	65.956,55	65.807,66	65.348,51	61.575,25	61.017,29
2048	76.851,92	69.184,68	65.384,48	65.225,73	64.782,15	60.855,03	60.301,79
2049	76.675,13	68.754,12	64.829,58	64.661,10	64.215,00	60.153,22	59.589,79
2050	76.526,05	68.351,08	64.302,16	64.123,75	63.656,19	59.478,90	58.888,82

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

Tabelle F-159: Datengrundlage zu Abbildung 120

Jahr	More, Bigger and Faster	More but Softer	Trend	Material-Lighter ICT Hardware	Greener ICT	Less and Softer	Less, Softer and Greener
2020	157.091,86	157.091,86	157.091,86	157.091,86	157.091,86	157.091,86	157.091,86
2021	158.805,08	158.805,08	158.805,08	158.805,08	158.805,08	158.805,08	158.805,08
2022	159.398,19	159.398,19	159.398,19	159.398,19	159.398,19	159.398,19	159.398,19
2023	157.760,27	157.760,27	157.760,27	157.760,27	157.760,27	157.760,27	157.760,27
2024	158.065,31	157.673,23	157.477,17	157.471,61	157.452,59	157.241,95	157.217,56
2025	158.273,03	157.496,42	157.108,34	157.092,66	157.048,95	156.642,86	156.583,81
2026	158.554,38	157.403,41	156.828,48	156.801,25	156.727,25	156.139,11	156.038,67
2027	158.873,72	157.359,06	156.602,78	156.562,31	156.453,98	155.696,28	155.548,94
2028	159.198,59	157.331,86	156.400,06	156.344,92	156.199,08	155.283,67	155.084,89
2029	159.513,30	157.306,59	156.205,67	156.134,28	155.948,75	154.886,69	154.633,30
2030	159.818,98	157.285,08	156.021,11	155.931,89	155.703,20	154.507,33	154.194,50
2031	160.243,34	157.388,08	155.964,38	155.856,09	155.581,28	154.259,83	153.883,61
2032	160.730,91	157.559,97	155.979,41	155.850,72	155.528,28	154.087,64	153.645,45
2033	161.256,86	157.775,34	156.040,36	155.890,13	155.519,19	153.964,55	153.454,91
2034	161.803,59	158.015,39	156.128,09	155.954,89	155.536,08	153.870,80	153.293,17
2035	162.358,02	158.266,17	156.228,53	156.031,13	155.565,56	153.791,70	153.146,45
2036	162.908,86	158.515,78	156.328,80	156.106,08	155.596,05	153.714,44	153.002,72
2037	163.449,09	158.756,41	156.421,09	156.171,92	155.620,53	153.630,17	152.854,52
2038	163.978,98	158.987,16	156.503,86	156.227,17	155.638,28	153.536,75	152.700,13
2039	164.488,92	159.197,81	156.566,86	156.261,63	155.640,33	153.423,84	152.530,31
2040	164.963,34	159.372,89	156.594,00	156.259,23	155.611,84	153.275,17	152.330,16
2041	165.418,77	159.537,16	156.614,39	156.248,95	155.612,27	153.124,52	152.161,23
2042	165.904,72	159.736,56	156.672,70	156.275,38	155.636,50	153.014,95	152.020,48
2043	166.424,94	159.975,06	156.772,34	156.342,05	155.715,56	152.949,81	151.937,33
2044	166.818,66	160.093,39	156.754,94	156.290,44	155.686,95	152.771,64	151.750,05
2045	167.435,88	160.437,59	156.965,11	156.464,94	155.896,09	152.822,64	151.801,88
2046	168.105,84	160.838,59	157.234,00	156.696,77	156.162,30	152.935,05	151.913,05
2047	168.827,70	161.296,13	157.561,84	156.986,19	156.504,09	153.109,30	152.102,02
2048	169.601,14	161.809,56	157.947,64	157.332,09	156.922,33	153.344,58	152.368,53
2049	170.474,84	162.425,25	158.437,05	157.780,31	157.416,00	153.684,59	152.715,25
2050	171.472,45	163.164,64	159.050,08	158.350,73	157.998,09	154.148,19	153.152,53

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

Tabelle F-160: Datengrundlage zu Abbildung 121

Jahr	More, Bigger and Faster	More but Softer	Trend	Material-Lighter ICT Hardware	Greener ICT	Less and Softer	Less, Softer and Greener
2020	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92	53,92
2021	50,83	50,83	50,83	50,83	50,83	50,83	50,83
2022	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88	48,88
2023	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29	46,29
2024	44,76	44,57	44,47	44,47	44,45	44,35	44,34
2025	43,21	42,83	42,64	42,64	42,60	42,41	42,38
2026	41,67	41,13	40,85	40,85	40,79	40,53	40,46
2027	40,15	39,46	39,11	39,11	39,01	38,70	38,60
2028	38,65	37,82	37,41	37,40	37,27	36,91	36,78
2029	37,15	36,20	35,72	35,72	35,55	35,15	34,99
2030	35,67	34,61	34,08	34,08	33,88	33,45	33,25
2031	34,28	33,13	32,55	32,54	32,30	31,86	31,62
2032	32,96	31,71	31,09	31,08	30,80	30,35	30,07
2033	31,71	30,39	29,73	29,72	29,40	28,94	28,63
2034	30,56	29,17	28,47	28,46	28,10	27,64	27,29
2035	29,46	28,00	27,27	27,26	26,86	26,41	26,01
2036	28,39	26,88	26,13	26,11	25,68	25,23	24,80
2037	27,37	25,80	25,02	25,01	24,54	24,10	23,64
2038	26,37	24,77	23,97	23,95	23,46	23,01	22,54
2039	25,43	23,79	22,97	22,95	22,44	22,00	21,50
2040	24,74	23,05	22,21	22,19	21,66	21,21	20,70
2041	24,03	22,30	21,45	21,42	20,90	20,42	19,92
2042	23,32	21,56	20,69	20,66	20,16	19,65	19,15
2043	22,61	20,82	19,94	19,91	19,43	18,88	18,41
2044	21,87	20,07	19,17	19,14	18,69	18,10	17,66
2045	21,16	19,34	18,43	18,40	18,00	17,36	16,96
2046	20,44	18,61	17,70	17,67	17,33	16,62	16,28
2047	19,72	17,89	16,98	16,95	16,69	15,90	15,63
2048	19,01	17,18	16,27	16,24	16,07	15,19	15,01
2049	18,34	16,52	15,61	15,57	15,46	14,53	14,39
2050	17,74	15,92	15,01	14,97	14,86	13,94	13,79

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

Tabelle F-161: Datengrundlage zu Abbildung 122

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2030	More but Softer	Deutschland	-0,08
2030	More but Softer	EU	0,07
2030	More but Softer	Übriges Europa	0,05
2030	More but Softer	Asien	0,19
2030	More but Softer	China	0,37
2030	More but Softer	Indien	0,05
2030	More but Softer	Ozeanien	0,01
2030	More but Softer	Nord- und Mittelamerika	0,01
2030	More but Softer	USA	0,01
2030	More but Softer	Südamerika	0,01
2030	More but Softer	Afrika	0,01
2030	More but Softer	Naher Osten	0,03
2040	More but Softer	Deutschland	-0,07
2040	More but Softer	EU	0,12
2040	More but Softer	Übriges Europa	0,10
2040	More but Softer	Asien	0,40
2040	More but Softer	China	0,70
2040	More but Softer	Indien	0,10
2040	More but Softer	Ozeanien	0,01
2040	More but Softer	Nord- und Mittelamerika	0,01
2040	More but Softer	USA	0,01
2040	More but Softer	Südamerika	0,01
2040	More but Softer	Afrika	0,03
2040	More but Softer	Naher Osten	0,08
2050	More but Softer	Deutschland	0,03
2050	More but Softer	EU	0,10
2050	More but Softer	Übriges Europa	0,12
2050	More but Softer	Asien	0,47
2050	More but Softer	China	0,78
2050	More but Softer	Indien	0,13
2050	More but Softer	Ozeanien	0,01
2050	More but Softer	Nord- und Mittelamerika	0,01

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2050	More but Softer	USA	0,01
2050	More but Softer	Südamerika	0,02
2050	More but Softer	Afrika	0,04
2050	More but Softer	Naher Osten	0,10
2030	More, Bigger and Faster	Deutschland	-0,25
2030	More, Bigger and Faster	EU	0,22
2030	More, Bigger and Faster	Übriges Europa	0,15
2030	More, Bigger and Faster	Asien	0,60
2030	More, Bigger and Faster	China	1,14
2030	More, Bigger and Faster	Indien	0,12
2030	More, Bigger and Faster	Ozeanien	0,02
2030	More, Bigger and Faster	Nord- und Mittelamerika	0,02
2030	More, Bigger and Faster	USA	0,01
2030	More, Bigger and Faster	Südamerika	0,02
2030	More, Bigger and Faster	Afrika	0,04
2030	More, Bigger and Faster	Naher Osten	0,11
2040	More, Bigger and Faster	Deutschland	-0,22
2040	More, Bigger and Faster	EU	0,34
2040	More, Bigger and Faster	Übriges Europa	0,31
2040	More, Bigger and Faster	Asien	1,22
2040	More, Bigger and Faster	China	2,10
2040	More, Bigger and Faster	Indien	0,26
2040	More, Bigger and Faster	Ozeanien	0,03
2040	More, Bigger and Faster	Nord- und Mittelamerika	0,04
2040	More, Bigger and Faster	USA	0,06
2040	More, Bigger and Faster	Südamerika	0,05
2040	More, Bigger and Faster	Afrika	0,09
2040	More, Bigger and Faster	Naher Osten	0,23
2050	More, Bigger and Faster	Deutschland	0,08
2050	More, Bigger and Faster	EU	0,30
2050	More, Bigger and Faster	Übriges Europa	0,36
2050	More, Bigger and Faster	Asien	1,47
2050	More, Bigger and Faster	China	2,41

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2050	More, Bigger and Faster	Indien	0,31
2050	More, Bigger and Faster	Ozeanien	0,04
2050	More, Bigger and Faster	Nord- und Mittelamerika	0,05
2050	More, Bigger and Faster	USA	0,10
2050	More, Bigger and Faster	Südamerika	0,09
2050	More, Bigger and Faster	Afrika	0,11
2050	More, Bigger and Faster	Naher Osten	0,30
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Deutschland	0,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	EU	-0,02
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Übriges Europa	-0,01
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Asien	-0,01
2030	Material-Lighter ICT Hardware	China	-0,02
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Indien	-0,01
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Ozeanien	0,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Nord- und Mittelamerika	0,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	USA	0,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Südamerika	0,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Afrika	0,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Naher Osten	0,00
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Deutschland	0,03
2040	Material-Lighter ICT Hardware	EU	-0,04
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Übriges Europa	-0,03
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Asien	-0,04

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2040	Material-Lighter ICT Hardware	China	-0,10
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Indien	-0,03
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Ozeanien	0,00
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Nord- und Mittelamerika	-0,01
2040	Material-Lighter ICT Hardware	USA	-0,02
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Südamerika	-0,01
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Afrika	-0,02
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Naher Osten	-0,01
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Deutschland	0,01
2050	Material-Lighter ICT Hardware	EU	-0,06
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Übriges Europa	-0,05
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Asien	-0,09
2050	Material-Lighter ICT Hardware	China	-0,19
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Indien	-0,07
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Ozeanien	0,00
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Nord- und Mittelamerika	-0,01
2050	Material-Lighter ICT Hardware	USA	-0,04
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Südamerika	-0,03
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Afrika	-0,03
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Naher Osten	-0,02
2030	Less, Softer and Greener	Deutschland	-0,29

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2030	Less, Softer and Greener	EU	-0,14
2030	Less, Softer and Greener	Übriges Europa	-0,09
2030	Less, Softer and Greener	Asien	-0,26
2030	Less, Softer and Greener	China	-0,52
2030	Less, Softer and Greener	Indien	-0,06
2030	Less, Softer and Greener	Ozeanien	-0,01
2030	Less, Softer and Greener	Nord- und Mittelamerika	-0,01
2030	Less, Softer and Greener	USA	-0,01
2030	Less, Softer and Greener	Südamerika	-0,02
2030	Less, Softer and Greener	Afrika	-0,03
2030	Less, Softer and Greener	Naher Osten	-0,05
2040	Less, Softer and Greener	Deutschland	-0,87
2040	Less, Softer and Greener	EU	-0,31
2040	Less, Softer and Greener	Übriges Europa	-0,21
2040	Less, Softer and Greener	Asien	-0,56
2040	Less, Softer and Greener	China	-1,00
2040	Less, Softer and Greener	Indien	-0,17
2040	Less, Softer and Greener	Ozeanien	-0,02
2040	Less, Softer and Greener	Nord- und Mittelamerika	-0,03
2040	Less, Softer and Greener	USA	-0,07
2040	Less, Softer and Greener	Südamerika	-0,05
2040	Less, Softer and Greener	Afrika	-0,08
2040	Less, Softer and Greener	Naher Osten	-0,12
2050	Less, Softer and Greener	Deutschland	-0,16
2050	Less, Softer and Greener	EU	-0,34
2050	Less, Softer and Greener	Übriges Europa	-0,26
2050	Less, Softer and Greener	Asien	-0,71
2050	Less, Softer and Greener	China	-1,19
2050	Less, Softer and Greener	Indien	-0,23
2050	Less, Softer and Greener	Ozeanien	-0,02
2050	Less, Softer and Greener	Nord- und Mittelamerika	-0,05
2050	Less, Softer and Greener	USA	-0,13
2050	Less, Softer and Greener	Südamerika	-0,09

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2050	Less, Softer and Greener	Afrika	-0,13
2050	Less, Softer and Greener	Naher Osten	-0,18
2030	Less and Softer	Deutschland	0,10
2030	Less and Softer	EU	-0,09
2030	Less and Softer	Übriges Europa	-0,06
2030	Less and Softer	Asien	-0,24
2030	Less and Softer	China	-0,48
2030	Less and Softer	Indien	-0,05
2030	Less and Softer	Ozeanien	-0,01
2030	Less and Softer	Nord- und Mittelamerika	-0,01
2030	Less and Softer	USA	-0,01
2030	Less and Softer	Südamerika	-0,01
2030	Less and Softer	Afrika	-0,02
2030	Less and Softer	Naher Osten	-0,04
2040	Less and Softer	Deutschland	0,09
2040	Less and Softer	EU	-0,14
2040	Less and Softer	Übriges Europa	-0,13
2040	Less and Softer	Asien	-0,49
2040	Less and Softer	China	-0,91
2040	Less and Softer	Indien	-0,12
2040	Less and Softer	Ozeanien	-0,01
2040	Less and Softer	Nord- und Mittelamerika	-0,02
2040	Less and Softer	USA	-0,03
2040	Less and Softer	Südamerika	-0,03
2040	Less and Softer	Afrika	-0,05
2040	Less and Softer	Naher Osten	-0,09
2050	Less and Softer	Deutschland	-0,03
2050	Less and Softer	EU	-0,12
2050	Less and Softer	Übriges Europa	-0,15
2050	Less and Softer	Asien	-0,58
2050	Less and Softer	China	-1,03
2050	Less and Softer	Indien	-0,15
2050	Less and Softer	Ozeanien	-0,02

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2050	Less and Softer	Nord- und Mittelamerika	-0,03
2050	Less and Softer	USA	-0,05
2050	Less and Softer	Südamerika	-0,04
2050	Less and Softer	Afrika	-0,06
2050	Less and Softer	Naher Osten	-0,12
2030	Greener ICT	Deutschland	-0,39
2030	Greener ICT	EU	-0,06
2030	Greener ICT	Übriges Europa	-0,03
2030	Greener ICT	Asien	-0,02
2030	Greener ICT	China	-0,04
2030	Greener ICT	Indien	-0,02
2030	Greener ICT	Ozeanien	0,00
2030	Greener ICT	Nord- und Mittelamerika	0,00
2030	Greener ICT	USA	-0,01
2030	Greener ICT	Südamerika	-0,01
2030	Greener ICT	Afrika	-0,01
2030	Greener ICT	Naher Osten	-0,01
2040	Greener ICT	Deutschland	-0,99
2040	Greener ICT	EU	-0,17
2040	Greener ICT	Übriges Europa	-0,08
2040	Greener ICT	Asien	-0,08
2040	Greener ICT	China	-0,16
2040	Greener ICT	Indien	-0,05
2040	Greener ICT	Ozeanien	0,00
2040	Greener ICT	Nord- und Mittelamerika	-0,01
2040	Greener ICT	USA	-0,04
2040	Greener ICT	Südamerika	-0,03
2040	Greener ICT	Afrika	-0,05
2040	Greener ICT	Naher Osten	-0,03
2050	Greener ICT	Deutschland	-0,13
2050	Greener ICT	EU	-0,23
2050	Greener ICT	Übriges Europa	-0,12
2050	Greener ICT	Asien	-0,12

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2050	Greener ICT	China	-0,24
2050	Greener ICT	Indien	-0,10
2050	Greener ICT	Ozeanien	-0,01
2050	Greener ICT	Nord- und Mittelamerika	-0,02
2050	Greener ICT	USA	-0,08
2050	Greener ICT	Südamerika	-0,05
2050	Greener ICT	Afrika	-0,09
2050	Greener ICT	Naher Osten	-0,06

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

Tabelle F-162: Datengrundlage zu Abbildung 123

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2030	More but Softer	Deutschland	-69,38
2030	More but Softer	EU	128,84
2030	More but Softer	Übriges Europa	131,75
2030	More but Softer	Asien	538,88
2030	More but Softer	China	852,00
2030	More but Softer	Indien	145,00
2030	More but Softer	Ozeanien	109,25
2030	More but Softer	Nord- und Mittelamerika	45,50
2030	More but Softer	USA	31,00
2030	More but Softer	Südamerika	139,00
2030	More but Softer	Afrika	152,13
2030	More but Softer	Naher Osten	106,22
2040	More but Softer	Deutschland	-62,94
2040	More but Softer	EU	397,97
2040	More but Softer	Übriges Europa	392,72
2040	More but Softer	Asien	1.339,38
2040	More but Softer	China	2.352,00
2040	More but Softer	Indien	346,00
2040	More but Softer	Ozeanien	271,50
2040	More but Softer	Nord- und Mittelamerika	122,00
2040	More but Softer	USA	82,00
2040	More but Softer	Südamerika	350,50

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2040	More but Softer	Afrika	355,38
2040	More but Softer	Naher Osten	259,25
2050	More but Softer	Deutschland	-4,63
2050	More but Softer	EU	662,72
2050	More but Softer	Übriges Europa	622,75
2050	More but Softer	Asien	2.054,38
2050	More but Softer	China	3.696,00
2050	More but Softer	Indien	568,00
2050	More but Softer	Ozeanien	408,00
2050	More but Softer	Nord- und Mittelamerika	177,75
2050	More but Softer	USA	96,00
2050	More but Softer	Südamerika	548,50
2050	More but Softer	Afrika	542,00
2050	More but Softer	Naher Osten	384,00
2030	More, Bigger and Faster	Deutschland	-212,38
2030	More, Bigger and Faster	EU	377,25
2030	More, Bigger and Faster	Übriges Europa	389,75
2030	More, Bigger and Faster	Asien	1.632,13
2030	More, Bigger and Faster	China	2.640,00
2030	More, Bigger and Faster	Indien	341,00
2030	More, Bigger and Faster	Ozeanien	331,50
2030	More, Bigger and Faster	Nord- und Mittelamerika	140,50
2030	More, Bigger and Faster	USA	80,00
2030	More, Bigger and Faster	Südamerika	432,75
2030	More, Bigger and Faster	Afrika	406,75
2030	More, Bigger and Faster	Naher Osten	318,09
2040	More, Bigger and Faster	Deutschland	-200,19
2040	More, Bigger and Faster	EU	1.178,31
2040	More, Bigger and Faster	Übriges Europa	1.182,81
2040	More, Bigger and Faster	Asien	4.063,63
2040	More, Bigger and Faster	China	7.000,00
2040	More, Bigger and Faster	Indien	938,00
2040	More, Bigger and Faster	Ozeanien	817,00

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2040	More, Bigger and Faster	Nord- und Mittelamerika	398,75
2040	More, Bigger and Faster	USA	291,00
2040	More, Bigger and Faster	Südamerika	1.165,50
2040	More, Bigger and Faster	Afrika	1.036,00
2040	More, Bigger and Faster	Naher Osten	772,00
2050	More, Bigger and Faster	Deutschland	-30,75
2050	More, Bigger and Faster	EU	1.973,28
2050	More, Bigger and Faster	Übriges Europa	1.933,19
2050	More, Bigger and Faster	Asien	6.309,88
2050	More, Bigger and Faster	China	11.436,00
2050	More, Bigger and Faster	Indien	1.486,00
2050	More, Bigger and Faster	Ozeanien	1.240,00
2050	More, Bigger and Faster	Nord- und Mittelamerika	633,75
2050	More, Bigger and Faster	USA	446,00
2050	More, Bigger and Faster	Südamerika	1.875,00
2050	More, Bigger and Faster	Afrika	1.609,25
2050	More, Bigger and Faster	Naher Osten	1.129,50
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Deutschland	-31,13
2030	Material-Lighter ICT Hardware	EU	-59,53
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Übriges Europa	-46,19
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Asien	-25,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	China	-40,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Indien	-27,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Ozeanien	-6,75
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Nord- und Mittelamerika	-12,75
2030	Material-Lighter ICT Hardware	USA	-12,00
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Südamerika	-30,25

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Afrika	-30,63
2030	Material-Lighter ICT Hardware	Naher Osten	-10,81
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Deutschland	-84,75
2040	Material-Lighter ICT Hardware	EU	-198,91
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Übriges Europa	-158,91
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Asien	-123,13
2040	Material-Lighter ICT Hardware	China	-336,00
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Indien	-114,00
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Ozeanien	-37,00
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Nord- und Mittelamerika	-48,00
2040	Material-Lighter ICT Hardware	USA	-70,00
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Südamerika	-144,50
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Afrika	-144,88
2040	Material-Lighter ICT Hardware	Naher Osten	-37,19
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Deutschland	-157,50
2050	Material-Lighter ICT Hardware	EU	-367,28
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Übriges Europa	-328,97
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Asien	-322,38
2050	Material-Lighter ICT Hardware	China	-852,00
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Indien	-274,00
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Ozeanien	-88,50

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Nord- und Mittelamerika	-103,50
2050	Material-Lighter ICT Hardware	USA	-142,00
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Südamerika	-306,50
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Afrika	-268,00
2050	Material-Lighter ICT Hardware	Naher Osten	-91,22
2030	Less, Softer and Greener	Deutschland	-68,63
2030	Less, Softer and Greener	EU	-303,22
2030	Less, Softer and Greener	Übriges Europa	-373,81
2030	Less, Softer and Greener	Asien	-712,38
2030	Less, Softer and Greener	China	-1.228,00
2030	Less, Softer and Greener	Indien	-186,00
2030	Less, Softer and Greener	Ozeanien	-151,00
2030	Less, Softer and Greener	Nord- und Mittelamerika	-76,25
2030	Less, Softer and Greener	USA	-64,00
2030	Less, Softer and Greener	Südamerika	-253,00
2030	Less, Softer and Greener	Afrika	-216,75
2030	Less, Softer and Greener	Naher Osten	-148,44
2040	Less, Softer and Greener	Deutschland	-380,75
2040	Less, Softer and Greener	EU	-1.068,53
2040	Less, Softer and Greener	Übriges Europa	-1.168,56
2040	Less, Softer and Greener	Asien	-1.844,38
2040	Less, Softer and Greener	China	-3.276,00
2040	Less, Softer and Greener	Indien	-588,00
2040	Less, Softer and Greener	Ozeanien	-390,50
2040	Less, Softer and Greener	Nord- und Mittelamerika	-250,50
2040	Less, Softer and Greener	USA	-260,00
2040	Less, Softer and Greener	Südamerika	-733,00
2040	Less, Softer and Greener	Afrika	-681,75
2040	Less, Softer and Greener	Naher Osten	-406,13
2050	Less, Softer and Greener	Deutschland	-565,75

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2050	Less, Softer and Greener	EU	-1.893,59
2050	Less, Softer and Greener	Übriges Europa	-1.810,50
2050	Less, Softer and Greener	Asien	-2.958,38
2050	Less, Softer and Greener	China	-5.544,00
2050	Less, Softer and Greener	Indien	-1.024,00
2050	Less, Softer and Greener	Ozeanien	-620,00
2050	Less, Softer and Greener	Nord- und Mittelamerika	-449,50
2050	Less, Softer and Greener	USA	-495,00
2050	Less, Softer and Greener	Südamerika	-1.232,00
2050	Less, Softer and Greener	Afrika	-1.162,75
2050	Less, Softer and Greener	Naher Osten	-659,22
2030	Less and Softer	Deutschland	85,25
2030	Less and Softer	EU	-148,59
2030	Less and Softer	Übriges Europa	-165,22
2030	Less and Softer	Asien	-642,50
2030	Less and Softer	China	-1.124,00
2030	Less and Softer	Indien	-143,00
2030	Less and Softer	Ozeanien	-136,25
2030	Less and Softer	Nord- und Mittelamerika	-63,00
2030	Less and Softer	USA	-37,00
2030	Less and Softer	Südamerika	-176,75
2030	Less and Softer	Afrika	-181,38
2030	Less and Softer	Naher Osten	-127,47
2040	Less and Softer	Deutschland	79,00
2040	Less and Softer	EU	-470,13
2040	Less and Softer	Übriges Europa	-504,25
2040	Less and Softer	Asien	-1.592,13
2040	Less and Softer	China	-3.112,00
2040	Less and Softer	Indien	-422,00
2040	Less and Softer	Ozeanien	-340,50
2040	Less and Softer	Nord- und Mittelamerika	-184,50
2040	Less and Softer	USA	-132,00
2040	Less and Softer	Südamerika	-511,00

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2040	Less and Softer	Afrika	-485,63
2040	Less and Softer	Naher Osten	-315,22
2050	Less and Softer	Deutschland	5,25
2050	Less and Softer	EU	-793,56
2050	Less and Softer	Übriges Europa	-847,72
2050	Less and Softer	Asien	-2.480,13
2050	Less and Softer	China	-4.980,00
2050	Less and Softer	Indien	-656,00
2050	Less and Softer	Ozeanien	-511,50
2050	Less and Softer	Nord- und Mittelamerika	-296,25
2050	Less and Softer	USA	-217,00
2050	Less and Softer	Südamerika	-822,50
2050	Less and Softer	Afrika	-777,50
2050	Less and Softer	Naher Osten	-450,94
2030	Greener ICT	Deutschland	-154,88
2030	Greener ICT	EU	-148,03
2030	Greener ICT	Übriges Europa	-213,13
2030	Greener ICT	Asien	-48,63
2030	Greener ICT	China	-100,00
2030	Greener ICT	Indien	-51,00
2030	Greener ICT	Ozeanien	-16,00
2030	Greener ICT	Nord- und Mittelamerika	-20,75
2030	Greener ICT	USA	-25,00
2030	Greener ICT	Südamerika	-69,00
2030	Greener ICT	Afrika	-53,88
2030	Greener ICT	Naher Osten	-27,58
2040	Greener ICT	Deutschland	-471,00
2040	Greener ICT	EU	-600,25
2040	Greener ICT	Übriges Europa	-701,47
2040	Greener ICT	Asien	-205,88
2040	Greener ICT	China	-496,00
2040	Greener ICT	Indien	-168,00
2040	Greener ICT	Ozeanien	-64,50

Jahr	Szenario	Länder/Regionen	Differenzen
2040	Greener ICT	Nord- und Mittelamerika	-92,50
2040	Greener ICT	USA	-123,00
2040	Greener ICT	Südamerika	-258,00
2040	Greener ICT	Afrika	-260,88
2040	Greener ICT	Naher Osten	-104,38
2050	Greener ICT	Deutschland	-587,88
2050	Greener ICT	EU	-1.134,47
2050	Greener ICT	Übriges Europa	-1.037,75
2050	Greener ICT	Asien	-438,13
2050	Greener ICT	China	-1.020,00
2050	Greener ICT	Indien	-402,00
2050	Greener ICT	Ozeanien	-125,00
2050	Greener ICT	Nord- und Mittelamerika	-190,00
2050	Greener ICT	USA	-279,00
2050	Greener ICT	Südamerika	-520,50
2050	Greener ICT	Afrika	-547,25
2050	Greener ICT	Naher Osten	-218,19

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

Quellenverzeichnis

- 3D Printing Industry. (2023). *What is the future of 3D printing? 80 additive manufacturing experts forecast 3D printing trends for 2023*. 3D Printing Industry. <https://3dprintingindustry.com/news/what-is-the-future-of-3d-printing-80-additive-manufacturing-experts-forecast-3d-printing-trends-for-2023-220261/>
- 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 (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 Abschlussbericht: Digitalisierung und natürliche Ressourcen. Analyse der Ressourcenintensität des digitalen Wandels in Deutschland*. Im Auftrag des Umweltbundesamtes. www.umweltbundesamt.de/digitalressourcen (in Erscheinung).
- Achachlouei, M. A., Moberg, Å. & Hochschorner, E. (2015). Life Cycle Assessment of a Magazine, Part I: Tablet Edition in Emerging and Mature States. *Journal Of Industrial Ecology*, 19(4), 575–589. <https://doi.org/10.1111/jiec.12227>
- Adam, M. (2022, 27. Juni). *E-Grocery soll bis 2030 auf einen Marktanteil von bis zu 15 Prozent wachsen*. HORIZONT. <https://www.horizont.net/marketing/nachrichten/studie-von-accenture-und-gfk-e-grocery-soll-bis-2030-auf-einen-marktanteil-von-bis-zu-15-prozent-wachsen-200871>
- Adamson, J. (2017, 15. Mai). *Carbon and the Cloud - Hard facts about data storage*. Medium. <https://medium.com/stanford-magazine/carbon-and-the-cloud-d6f481b79dfe>
- 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.
- Antony, F., Fischer, C., Kenkmann, T., Moch, K., Prakash, S., Quack, D. & Weber, M. (2020). *Big Points des ressourcenschonenden Konsums als Thema für die Verbraucherberatung – mehr als Energieeffizienz und Klimaschutz. Studie im Rahmen des Projekts „Verbraucherberatung als Baustein einer erfolgreichen Ressourcenpolitik*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/big-points-des-ressourcenschonenden-konsums-als>
- Apple. (2018). *Apple Watch Series 4 (GPS + Cellular) Environmental Report*. Apple Inc. https://www.apple.com/environment/pdf/products/watch/Apple_Watch_Series4_GPSCellular_PER_sept2018.pdf
- Apple. (2019). *Product Environmental Report Apple Watch Series 5*. Apple Inc. https://www.apple.com/environment/pdf/products/watch/Apple_Watch_Series5_PER_sept2019.pdf
- Apple. (2020). *Product Environmental Report Apple Watch Series 6*. Apple Inc. https://www.apple.com/environment/pdf/products/watch/Apple_Watch_Series6_PER_sept2020.pdf
- Apple. (2021). *Product Environmental Report Apple Watch Series 7*. Apple Inc. https://www.apple.com/environment/pdf/products/watch/Apple_Watch_Series7_PER_Sept2021.pdf
- Apple. (2022). *Product Environmental Report Apple Watch Series 8*. Apple Inc. https://www.apple.com/environment/pdf/products/watch/Apple_Watch_Series8_PER_Sept2022.pdf

- 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-ssoa-47129-5>
- Aroganam, G., Manivannan, N. & Harrison, D. (2019). Review on Wearable Technology Sensors Used in Consumer Sport Applications. *Sensors*, 19(9), 1983. <https://doi.org/10.3390/s19091983>
- Aziz, S., Maltese, I., Marcucci, E., Gatta, V., Benmoussa, R. & Irhirane, E. H. (2022). Energy Consumption and Environmental Impact of E-Grocery: A Systematic Literature Review. *Energies*, 15(19), 7289. <https://doi.org/10.3390/en15197289>
- Bayindir, N. & Paisley, E. (2019). *Digital vs Traditional Media Consumption Summary*. Global Web Index. https://www.amic.media/media/files/file_352_2142.pdf
- Belkhir, L. & Elmelig, 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>
- Berners-Lee, M. (2020). *How bad are bananas?: The carbon footprint of everything – 2020 new edition*. Profile Books.
- BiB. (2022). *BiB – Bevölkerungsentwicklung*. https://www.bib.bund.de/DE/Fakten/Bevoelkerungsentwicklung/Faktensuche_formular.html?nn=1279832
- Bitkom. (2020). *Klimaeffekte der Digitalisierung*. Bitkom. 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#_
- Blockchain.com. (2022). *Blockchain Charts*. Blockchain. <https://www.blockchain.com/explorer/charts/my-wallet-n-users?timespan=all> (Stand: 15. Dezember 2022).
- BMBF. (2022). *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
- BMDV. (2017). *Verkehr in Zahlen 2017/2018*. Bundesministerium für Digitales und Verkehr. <https://bmdv.bund.de/SharedDocs/DE/Publikationen/G/verkehr-in-zahlen-pdf-2017-2018.pdf>
- BMEL. (2022, 21. Juni). *Lebensmittelverschwendung - Lebensmittelabfälle in Deutschland: Aktuelle Zahlen zur Höhe der Lebensmittelabfälle nach Sektoren*. Bundesministerium für Ernährung und Landwirtschaft <https://www.bmel.de/DE/themen/ernaehrung/lebensmittelverschwendung/studie-lebensmittelabfaelle-deutschland.html>
- BMUV. (2020). *Deutsches Ressourceneffizienzprogramm III – 2020 bis 2023*. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz, nukleare Sicherheit und Verbraucherschutz. <https://www.bmu.de/publikation/deutsches-ressourceneffizienzprogramm-iii-2020-bis-2023>
- 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

- 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
- Breuer, M. & Görlich, D. (2022). *E-Sport. Status quo und Entwicklungspotenziale* (2. Aufl.). SpringerGabler.
- 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>
- 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
- 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/presseserver/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
- Cairns, S. (2005). Delivering supermarket shopping: more or less traffic? *Transport Reviews*, 25(1), 51–84. <https://doi.org/10.1080/0144164042000218391>
- CBECI. (2023). *Cambridge Bitcoin Electricity Consumption Index*. Cambridge Centre for Alternative Finance. <https://ccaf.io/cbeci/index> (Stand: 20. Februar 2023).
- Choi, G. B., Lee, H. H., Oh, A. S., Kwak, M., Kim, S. & Lee, S. (2017). Effect of mobile apps on environmental impact of smartphones. *ICIC Express Letters*, 9(2), 137–144.
- Criddle, C. (2021, 10. Februar). *Bitcoin consumes „more electricity than Argentina“*. BBC News. <https://www.bbc.com/news/technology-56012952>
- Crow, D. & Millot, A. (2020). *Working from home can save energy and reduce emissions. But how much?*. IEA. <https://www.iea.org/commentaries/working-from-home-can-save-energy-and-reduce-emissions-but-how-much>
- Cuhls, K., Ganz, W. & Warnke, P. (2009). *Foresight-Prozess im Auftrag des BMBF. Zukunftsfelder neuen Zuschnitts*. Fraunhofer ISI. https://www.researchgate.net/publication/44209864_Foresight-Prozess_im_Auftrag_des_BMBF_Zukunftsfelder_neuen_Zuschnitts
- 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>
- 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>

Digiconomist. (2022). *Bitcoin Energy Consumption Index*. Digiconomist. <https://digiconomist.net/bitcoin-energy-consumption>

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>

eBay Kleinanzeigen. (2021). *Factsheet eBay Kleinanzeigen Q1-2021*. eBay Kleinanzeigen. https://themen.kleinanzeigen.de/media/files/3b/27/3b274d7c-5434-441d-bb61-dc80d2c9730e/q1-2021_ebay-kleinanzeigen_fact_sheet.pdf

eBay Kleinanzeigen. (2022). *Factsheet eBay Kleinanzeigen Q1-2022*. eBay Kleinanzeigen. https://themen.kleinanzeigen.de/media/files/db/a7/dba760f9-2552-4315-8163-10e2e1158719/2022-q1_ebay-kleinanzeigen_fact_sheet.pdf

EFI. (2022). *Gutachten zu Forschung, Innovation und technologischer Leistungsfähigkeit Deutschlands 2022*. Expertenkommission Forschung und Innovation. https://www.efi.de/fileadmin/Assets/Gutachten/2022/EFI_Gutachten_2022.pdf

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>

Ellsworth, B. (2021, 22. Juni). *As Venezuela's economy regresses, crypto fills the gaps*. Reuters. <https://www.reuters.com/technology/venezuelas-economy-regresses-crypto-fills-gaps-2021-06-22/>

Emilsson, E. & Dahllöf, L. (2019). Lithium-Ion Vehicle Battery Production Status 2019 on Energy Use, CO₂ Emissions, Use of Metals, Products Environmental Footprint, and Recycling. *IVL Swedish Environmental Research Institute*. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29735.70562>

Erdmann, L. (2011). Quantifizierung der Umwelteffekte des privaten Gebrauchtwarenhandels am Beispiel von eBay. *Springer eBooks (S. 127–158)*. https://doi.org/10.1007/978-3-642-19371-2_5

ESport-Bund Deutschland e. V. (2018, 26. Oktober). *Was ist eSport?* ESport-Bund Deutschland e. V. <https://esportbund.de/themen/>

Estribeau, R., Krueger, F., Vitrani, J., Willersdorf, S., Marteau, P., Moizant, F. & Gasc, M. (2022, 4. November). *What an Accelerating Secondhand Market Means for Fashion Brands and Retailers*. BCG Global. <https://www.bcg.com/publications/2022/the-impact-of-secondhand-market-on-fashion-retailers>

Europäische Kommission. (2019). *European Platform on LCA | EPLCA*. European Commission. <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/>

Europäische Kommission. (2020). *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. (2023). *Vorschlag für eine Verordnung des Europäischen Parlaments und des Rates zur Schaffung eines Rahmens zur Gewährleistung einer sicheren und nachhaltigen Versorgung mit kritischen Rohstoffen und zur Änderung der Verordnungen (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, (EU) 2018/1724 und (EU) 2019/1020*. Europäische Kommission. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/DE/TXT/HTML/?uri=CELEX:52023PC0160>

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>

- Fikar, C. (2018). A decision support system to investigate food losses in e-grocery deliveries. *Computers & Industrial Engineering*, 117, 282–290. <https://doi.org/10.1016/J.CIE.2018.02.014>
- Filamentworld (2023). *Filament – Leerrolle Schwarz – für 1,0*. Filamentworld. [kghttps://www.filamentworld.de/shop/zubehoer/3d-drucker-leerrollen/filament-leerrolle-gross/](https://www.filamentworld.de/shop/zubehoer/3d-drucker-leerrollen/filament-leerrolle-gross/) (Stand: 10. Januar 2023).
- Flugwiese (2022). *Filamentspulen – Tabelle der Gewichte und Maße (UPDATE 2022)*. Flugwiese. <http://flugwiese.de/2019/06/filamentspulen-tabelle-der-gewichte-und-masse/> (Stand: 10. Januar 2022).
- Fritzsche, K., Pohle, K., Bauer, S., Haenel, F. & Eichbaum, F. (2022). *CO:DINA, Digitalisierung nachhaltig und souverän gestalten*. Wuppertal Institut. https://codina-transformation.de/wp-content/uploads/CODINA_Positionspapier_Digitale-Souvera%CC%88nita%CC%88t.pdf
- Gaete-Morales, C., Kramer, H., Schill, W.-P. & Zerrahn, A. (2021). An open tool for creating battery-electric vehicle time series from empirical data, emobpy. *Scientific Data*, 8(1), 152. <https://doi.org/10.1038/s41597-021-00932-9>
- Gähns, S., Weiß, J., Bluhm, H., Dunkelberg, E. & Katner, J. (2021). *Erkenntnisse zu Umweltwirkungen von Smart Metern: Erfahrungen aus dem Einsatz von Smart Metern in Europa*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/publikationen/erkenntnisse-zu-umweltwirkungen-von-smart-metern>
- 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
- Game. (2021). *Jahres Report der deutschen Games Branche 2021*. Verband der deutschen Games-Branche e.V. https://www.game.de/wp-content/uploads/2021/08/game_Jahresreport-der-deutschen-Games-Branche-2021_Deutsch.pdf
- Global Gaming. (2022, 1. September). *All about bandwidth usage per hour in League of Legends*. Global Gaming. <https://theglobalgaming.com/lol/bandwidth-usage>
- Gonda, L. & Degrez, M. (2018). End-of-life Management of Computers in Brussels: Environmental Comparison of Two Treatment Chains. *Procedia CIRP*, 69, 968–973. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.089>
- 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 CO₂-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>
- Groß, J., Herz, B. & Schiller, J. (2020). Bitcoin, Libra and Central Bank Digital Currencies — Elements of a New Monetary System? *Wirtschaftsdienst*, 100(9), 712–717. <https://doi.org/10.1007/s10273-020-2743-y>

- Günther, E. (2018, 14. Februar). *Kumulierter Energieaufwand (KEA)*. Gabler Wirtschaftslexikon. <https://wirtschaftslexikon.gabler.de/definition/kumulierter-energieaufwand-kea-52378/version-275516>
- Hammermann, A. & Voigtländer, M. (2020). Bürobeschäftigte in Deutschland. *IW-Trends - Vierteljahresschrift Zur Empirischen Wirtschaftsforschung*, 47(3), 61–78. <https://doi.org/10.2373/1864-810x.20-03-04>
- 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>
- Hays, T. S., Keskinocak, P. & De López, V. M. (2005). Strategies and Challenges of Internet Grocery Retailing Logistics. In *Applied optimization* (S. 217–252). https://doi.org/10.1007/0-387-23392-x_8
- Heinrich, A. B. (2009). Ökobilanz (LCA) – Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf von Walter Klöpffer und Birgit Grahl. *Environmental Sciences Europe*, 21(6), 580–583. <https://doi.org/10.1007/s12302-009-0084-y>
- Henseling, C. & Hobelsberger, C. (2018). Entwicklungsperspektiven für die Geschäftsmodelle des Peer-to-Peer Sharing. In *Springer eBooks* (S. 95–118). https://doi.org/10.1007/978-3-658-21435-7_7
- 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>
- Hoffmann, B. (2022). *Five Overlooked Challenges that Can Make or Break E-grocery Automation*. Swisslog. <https://www.swisslog.com/en-us/case-studies-and-resources/blog/five-overlooked-challenges-that-can-make-or-break-e-grocery-automation>
- 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>
- Hristov, V. (2022, 11. Oktober). *iPhone 13 series battery life revealed*. PhoneArena. https://www.phonearena.com/news/apple-iphone-13-series-battery-capacities-leaked_id132514
- 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>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Mc, Z., Hollander, A. & Van Zelm, R. (2016). ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Huisman, J., Habib, H., Brechu, M. G., Downes, S., Herreras, L., Lovik, A. N., Wager, P., Cassard, D., Tertre, F., Mahlitz, P., Rotter, S., Chancerel, P. & Soderman, M. L. (2017). ProSUM: Prospecting secondary Raw Materials in the Urban Mine and Mining Wastes. *2016 Electronics Goes Green 2016+ (EGG)*. <https://doi.org/10.1109/EGG.2016.7829826>
- Huppés, G., van Oers, L., de Koning, A. & Guinee, J. B. (2002). *Abiotic Resource Depletion in LCA*. Road and Hydraulic Engineering Institute. https://web.universiteitleiden.nl/cml/ssp/projects/lca2/report_abiotic_depletion_web.pdf
- Itten, R., Hischer, 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>
- Jaeger, M. (2022, 19. Mai). *Wie lange hält ein Router oder Modem für gewöhnlich?* Atera Networks Ltd. <https://www.atera.com/de/blog/wie-lange-haelt-ein-router/>

- Joshi, A., Gupta, A., Verma, S., Ranjan Paul, A., Jain, A. & Haque, N. (2021). Life Cycle Based Greenhouse Gas Footprint Assessment of a Smartphone. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 795(1), 012028. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/795/1/012028>
- Kägler, R. (2018, 28. September). Apple Watch Series 4: Akkukapazität und -Laufzeit – Alle Infos. GIGA. <https://www.giga.de/wearables/apple-watch-series-4/specials/apple-watch-series-4-akkukapazitaet-und-laufzeit-alle-infos/>
- Kalverkamp, M., Helmers, E. & Pehlken, A. (2020). Impacts of life cycle inventory databases on life cycle assessments: A review by means of a drivetrain case study. *Journal Of Cleaner Production*, 269, 121329. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121329>
- Kalverkamp, M. & Karbe, N. (2018). Comparability of Life Cycle Assessments: Modelling and Analyzing LCA Using Different Databases. In *Springer eBooks* (S. 51–63). https://doi.org/10.1007/978-3-662-57886-5_8
- Kamiya, G. (2020, 11. Dezember). *The carbon footprint of streaming video: fact-checking the headlines*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/commentaries/the-carbon-footprint-of-streaming-video-fact-checking-the-headlines>
- 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
- Klauser, G. (2019, 31. Oktober). *Hotend: Lebensdauer, Wartung und Tipps*. 3dee.at. <https://3dee.at/hotend-lebensdauer-bedienung-und-tipps/>
- 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>
- Kroker, M. (2021, 21. September). *4 von 10 Beschäftigte bis 5 Stunden pro Woche in Videocalls – sogar ein Viertel bis 10 Stunden*. Kroker's Look @ IT. <https://blog.wiwo.de/look-at-it/2021/09/21/4-von-10-beschaefigte-bis-5-stunden-pro-woche-in-videocalls-sogar-ein-viertel-bis-10-stunden/>
- Kugler, U. (o. D.). *Videokonferenzen, IP-Telefonie und Videostreaming*. https://um.baden-wuerttemberg.de/fileadmin/redaktion/m-um/intern/Dateien/Dokumente/1_Ministerium/Aufgaben_und_Organisation/Green-IT/Green-IT-Videokonferenzen-IP-Telefonie-und-Videostreaming.pdf (Stand: 5. Juli 2022).
- 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/>
- 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

- Live Coin Watch. (2022). *Crypto Market Cap Graphs & Volume Charts*. Live Coin Watch. <https://www.livecoinwatch.com/crypto-market-cap>. (Stand: 8. Dezember 2022)
- 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
- Louis, J., Calò, A., Leiviskä, K. & Pongrácz, É. (2015). Environmental Impacts and Benefits of Smart Home Automation: Life Cycle Assessment of Home Energy Management System. *IFAC-PapersOnLine*, 48(1), 880–885. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2015.05.158>
- Ludmann, S. (2018). Ökologie des Teilens - Bilanzierung der Umwelteinwirkungen des Peer-to-Peer Sharing. PeerSharing. https://www.peer-sharing.de/data/peersharing/user_upload/Dateien/Oekologie_des_Teilens_Arbeitspapier_8_.pdf
- Lund, S., Madgavkar, A., Manyika, J., Smit, S., Ellingrud, K., Meaney, M. & Robinson, O. (2021). *The future of work after COVID-19*. McKinsey Global Institute. https://www.mckinsey.de/~ /media/mckinsey/locations/europe%20and%20middle%20east/deutschland/news/presse/2021/2021-02-18%20-%20mgi%20future%20of%20work%20after%20covid-19/mgi_the%20future%20of%20work%20after%20covid-19_report_feb%202021.pdf
- Lutter, T., Meinecke, C. & Tropf, T. (2017). *Zukunft der Consumer Technology – 2017*. Bitkom. <https://www.bitkom.org/sites/main/files/file/import/170901-CT-Studie-online.pdf>
- Ma, M. M. M., Zhu, Z. & Chan, Y. C. (2017). Environmental impact analysis of smartwatch using SimaPro8 tools and energy dispersive X-ray spectroscopy (EDX) technique. *2017 IEEE 19th Electronics Packaging Technology Conference (EPTC)*, 1–6. <https://doi.org/10.1109/EPTC.2017.8277438>
- 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
- Marsden, M., Hazas, M. & Broadbent, M. (2020). From One Edge to the Other. *Proceedings of the 7th International Conference on ICT for Sustainability*, 247–254. <https://doi.org/10.1145/3401335.3401366>
- Mayers, K., Koomey, J., Hall, R., Bauer, M., France, C. & Webb, A. (2015). The Carbon Footprint of Games Distribution. *Journal of Industrial Ecology*, 19(3), 402–415. <https://doi.org/10.1111/jiec.12181>
- Mayr, J. (2023, 14. Februar). *EU-Parlament besiegelt Verbrenner-Aus*. Tagesschau. <https://www.tagesschau.de/wirtschaft/technologie/verbrenner-aus-eu-101.html>
- Mensley, M. & O’Connell, J. (2021). *3D Printer Extruder – All You Need to Know*. All3DP. <https://all3dp.com/2/3d-printer-extruder-guide/> (Stand: 10. Januar 2023).
- Miah, A. (2019, 22. Oktober). *Esports is the future of all sports – here’s why*. The Conversation. <https://theconversation.com/esports-is-the-future-of-all-sports-heres-why-121335>
- Milde, K., Klose, A., Böbel, M., Lückerrath, 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 (in Erscheinung).
- Mills, E., Bourassa, N., Rainer, L., Mai, J., Vaino, I., Curtin, C., Shehabi, A., Desroches, L. & Mills, N. (2019). *A Plug-Loads Game Changer: Computer Gaming Energy Efficiency without Performance Compromise*. <https://doi.org/10.2172/2274683>

- Mir, U. (2020). Bitcoin and its energy usage: Existing approaches, important opinions, current trends, and future challenges. *KSII Transactions on Internet and Information Systems*, 14(8), 3243–3256.
<https://doi.org/10.3837/tiis.2020.08.005>
- 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>
- Mostert, C. & Bringezu, S. (2022). Biotic Part of the Product Material Footprint: Comparison of Indicators Regarding Their Interpretation and Applicability. *Resources*, 11(6), 56.
<https://doi.org/10.3390/resources11060056>
- Nabilou, H. (2019). How to Regulate Bitcoin? Decentralized Regulation for a Decentralized Cryptocurrency. *Social Science Research Network*. <https://doi.org/10.2139/ssrn.3360319>
- Neto, J. A. R. (2020, Mai 17). *Data Generated by Wearables*. Medium. <https://medium.com/xnewdata/data-generated-by-wearables-48da42a88263#:~:text=The%20most%20common%20is%20the%20smartwatches%2C%20used%20in,a%20day%20of%20data%20about%20a%20person%E2%80%99s%20activities>
- 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>
- O'Brien, W. & Yazdani Aliabadi, F. (2020). Does telecommuting save energy? A critical review of quantitative studies and their research methods. *Energy and Buildings*, 225, 110298.
<https://doi.org/10.1016/J.ENBUILD.2020.110298>
- Obringer, R., Rachunok, B., Maia-Silva, D., Arbabzadeh, M., Nateghi, R. & Madani, K. (2021). The overlooked environmental footprint of increasing Internet use. *Resources, Conservation and Recycling*, 167, 105389.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2020.105389>
- OECD. (2008). *Measuring Material Flows and Resource Productivity. Volume 1. The OECD Guide*.
<https://www2.oecd.org/environment/indicators-modelling-outlooks/MFA-Guide.pdf>
- Ong, D., Moors, T. & Sivaraman, V. (2012, 25-28. September). *Complete life-cycle assessment of the energy/CO2 costs of videoconferencing vs face-to-face meetings [Konferenzbeitrag]*. 2012 IEEE Online Conference on Green Communications, GreenCom 2012, Piscataway, NJ, USA. <https://doi.org/10.1109/GreenCom.2012.6519615>
- Pache, M. (2022, 10. Februar). *Galaxy Watch 4: So lange wird es Updates für die Smartwatch geben*. Netzwelt.
<https://www.netzwelt.de/news/199360-galaxy-watch-4-so-lange-updates-smartwatch-geben.html>
- Pagano, D. & Krause, G. (2019). *Umweltmanagement und Digitalisierung-Praktische Ansätze zur Verbesserung der Umweltsleistung*. Umweltbundesamt.
https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/376/publikationen/uba-broschuere_umweltmanagement_und_digitalisierung_final_bf.pdf
- Pauer, E., Wohner, B. & Tacker, M. (2020). The Influence of Database Selection on Environmental Impact Results. Life Cycle Assessment of Packaging Using GaBi, Ecoinvent 3.6, and the Environmental Footprint Database. *Sustainability*, 12(23), 9948. <https://doi.org/10.3390/su12239948>
- 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>

- Pohl, J., Frick, V., Finkbeiner, M. & Santarius, T. (2022). Assessing the environmental performance of ICT-based services: Does user behaviour make all the difference? *Sustainable Production And Consumption*, 31, 828–838. <https://doi.org/10.1016/j.spc.2022.04.003>
- 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., 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., Liu, R., Schischke, K. & Stobbe, L. (2012). *Zeitlich optimierter Einsatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/461/publikationen/4316.pdf>
- Printing It 3D. (2023, 9. November). *How Heavy Is a 3D Printer? The Numbers Revealed*. Printing It 3D. <https://printingit3d.com/how-heavy-is-a-3d-printer/>
- Punzet, L. (2022, 08. November). *Stromverbrauch 3D Drucker: So hoch ist er*. CHIP. https://praxistipps.chip.de/stromverbrauch-3d-drucker-so-hoch-ist-er_149731
- PWC. (2022, 12. Dezember). *Cloud Gaming Studie: Das Streaming von Spielen wird massentauglich, bleibt aber durch langsamen Internetausbau gehemmt*. PWC. <https://www.pwc.de/de/pressemitteilungen/2022/cloud-gaming-studie-das-streaming-von-spielen-wird-massentauglich-bleibt-aber-durch-langsam-internetausbau-gehemmt.html>
- Raab, W. (2014, 18. August). *Die wichtigsten Komponenten des 3D Druckers*. Webnlist. <https://webnlist.de/die-wichtigsten-komponenten-des-3d-druckers/>
- Rief, S. (2021). *Auf dem Weg in eine hybride Arbeitswelt – Büros und Büroarbeit in der Post-Corona-Epoche*. DGUV Forum 3/2021. https://forum.dguv.de/issues/RZ_DGUV_Forum_03_2021_Bueros%20und%20Bueroarbeits%20in%20der%20Post-Corona-Epoche_1.pdf
- Riethmüller, H. (2022, 17. Februar). *Lesekultur im Wandel - Essay*. bpb.de. <https://www.bpb.de/shop/zeitschriften/apuz/287319/lesekultur-im-wandel-essay/>
- 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>
- Roeck, M. & Drennen, T. E. (2022). Life cycle assessment of behind-the-meter Bitcoin mining at US power plant. *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, 27(3), 355–365. <https://doi.org/10.1007/s11367-022-02025-0>
- 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>
- Schien, D., Shabajee, P., Yearworth, M. & Preist, C. (2013). Modeling and Assessing Variability in Energy Consumption During the Use Stage of Online Multimedia Services. *Journal Of Industrial Ecology*, 17(6), 800–813. <https://doi.org/10.1111/jiec.12065>
- Schödwel, 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

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>

Solectro. (2020). *3D Printers components - how 3D printers work*. Solectro. <https://solectroshop.com/en/blog/3d-printers-components-how-3d-printers-work-n40>

Speight, J. (2018, August 02). *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>

Sprei, F., Habibi, S., Englund, C., Pettersson, S., Voronov, A. & Wedlin, J. (2019). Free-floating car-sharing electrification and mode displacement: Travel time and usage patterns from 12 cities in Europe and the United States. *Transportation Research Part D: Transport And Environment*, 71, 127–140. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2018.12.018>

Statista. (2021a). *Auf welchen der folgenden Endgeräte nutzen Sie Video-Streaming?* Statista. <https://de.statista.com> (Stand: 10. November 2021).

Statista. (2021b). *Videotelefonie - Nutzungsverhalten während der Corona-Pandemie*. Statista. <https://de.statista.com> (Stand: 10. November 2021).

Statista. (2022a). *C2E-Commerce*. Statista. <https://de.statista.com> (Stand: 15. Dezember 2022).

Statista. (2022b). *Marktverzeichnis*. Statista. <https://de.statista.com> (Stand: 15. Dezember 2022).

Statista. (2022c). *Mediales Internet - Durchschnittliche Nutzungsdauer pro Tag nach Altersgruppen in Deutschland 2022*. Statista. <https://de.statista.com> (Stand: 15. Dezember 2022).

Statista (2022d). *Durchschnittliche tägliche Nutzungsdauer von Smartphones in Deutschland im Jahr 2023 nach Altersgruppe*.

Statista. (2022e). *Durchschnittliche tägliche Smartphone-Nutzung nach App Kategorien in Deutschland 2020*. Statista. <https://de.statista.com> (Stand: 15. Dezember 2022).

Statista. (2022f). *Pendelentfernung bei Arbeitspendlern in Deutschland 2016*. Statista. <https://de.statista.com> (Stand: 15. Dezember 2022).

Statista. (2022g). *Visa, MasterCard, UnionPay transaction volume*. Statista. <https://de.statista.com> (Stand: 15. Dezember 2022). <https://de.statista.com> (Stand: 15. Dezember 2022).

Statista. (2023). *Alter der genutzten Smartphones in Deutschland 2023*. Statista. Statista. <https://de.statista.com> (Stand: 20. Februar 2023).

Statistisches Bundesamt. (2023a). *Bevölkerung im Jahr 2022 auf 84,3 Millionen gewachsen*. Destatis. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/01/PD23_026_124.html#:~:text=Deutschland%20hatte%20zum%20Jahresende%202022%20nach%20einer%20ersten,nahm%20die%20Bev%C3%B6lkerungszahl%20um%201%2C1%20Millionen%20Personen%20zu

Statistisches Bundesamt. (2023b). *Pkw-Dichte im Jahr 2022 erneut auf Rekordhoch*. Destatis. https://www.destatis.de/DE/Presse/Pressemitteilungen/2023/09/PD23_N048_46.html#:~:text=In%20den%20vergangenen%20zehn%20Jahren,Einwohner%20583%20Personenkraftwagen%20%E2%80%93%20ein%20Rekordwert

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*. Studie im Auftrag des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie Projekt-Nr. 29/14. https://www.bmwk.de/Redaktion/DE/Downloads/E/entwicklung-des-ikt-bedingten-strombedarfs-in-deutschland-abschlussbericht.pdf?__blob=publicationFile&v=3

Tablepott. (4. April 2018). *Berechnung der realen Kosten für Auftragsdrucke*. TablePott – Die TableTop Community im Ruhrgebiet / NRW. <https://www.tablepott.de/3d-drucker-teil-7-berechnung-der-realen-kosten-fuer-auftragsdrucke/>

Taylor, M. B. (2017). The evolution of bitcoin hardware. *Computer*, 50(9), 58–66. <https://doi.org/10.1109/MC.2017.3571056>

Techniker Krankenkasse. (2022). *Beweg dich, Deutschland!* Techniker Krankenkasse. <https://www.tk.de/resource/blob/2033598/9f2d920e270b7034df3239cbf1c2a1eb/beweg-dich-deutschland-data.pdf>

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).

Thielmann, A., Sauer, A., Schnell, M., Isenmann, R. A. & Wietschel, M. (2015). *Technologie-Roadmap Stationäre Energiespeicher 2030*. Fraunhofer-Institut für Systemund Innovationsforschung IS. <https://www.isi.fraunhofer.de/content/dam/isi/dokumente/cct/lib/TRM-SES.pdf>

Tripathi, Y. (2020, 28. Oktober). *How Many People Play League Of Legends? List Of Top 5 Countries Playing LoL*. Republic. <https://www.republicworld.com/technology-news/gaming/how-many-people-play-league-of-legends-list-of-top-5-countries-playing-lol.html>

Twitch. (2023). *Twitch Streamers - Twitch Video Encoding and Bitrates*. <https://stream.twitch.tv/encoding/> (Stand: 20. Februar 2023).

TwitchMetrics. (2022). *The Most Watched Deutsch League of Legends Twitch Streamers, 15. November bis 15. Dezember 2022*. TwitchMetrics. <https://www.twitchmetrics.net/channels/viewership?game=League+of+Legends&lang=de> (Stand: 15. Dezember 2022).

Umweltbundesamt. (2014). *Abiotische Rohstoffe schonend gewinnen*. <https://www.umweltbundesamt.de/themen/abfall-ressourcen/ressourcenschonung-in-produktion-konsum/abiotische-rohstoffe-schonend-gewinnen#nachhaltiger-umgang-mit-rohstoffen> (Stand: 06. Juni 2023).

Umweltbundesamt. (2015a). *ProBas. Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme*. Umweltbundesamt. <https://www.probas.umweltbundesamt.de/datenbank/#/>

Umweltbundesamt. (2015b). *Recycling von Edel- und Sondermetallen: Koordiniertes Handeln ist nötig*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/presse/pressemitteilungen/recycling-von-edel-sondermetallen-koordiniertes>

Umweltbundesamt. (2016). *Biotische Rohstoffe*. Umweltbundesamt. <https://www.umweltbundesamt.de/biotische-rohstoffe>

Umweltbundesamt. (2018). *Kennzahlen und Indikatoren für die Beurteilung der Ressourceneffizienz von Rechenzentren und Prüfung der praktischen Anwendbarkeit Abschlussbericht*. https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/1410/publikationen/2018-02-23_texte_19-2018_ressourceneffizienz-rechenzentren.pdf

Umweltbundesamt. (2021). *Handlungsfelder zur Steigerung der Ressourceneffizienz (p. 100)*. Umweltbundesamt.

- Umweltbundesamt. (2022a). *Car-Sharing*. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr/nachhaltige-mobilitaet/car-sharing#angebotsformen-des-car-sharin>
- Umweltbundesamt. (2022b). Elektro- und Elektronikaltgeräte | Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/ressourcen-abfall/verwertung-entsorgung-ausgewaehlter-abfallarten/elektro-elektronikaltgeraete#wo-steht-deutschland>
- Umweltbundesamt. (2022c). *Treibhausgas-Emissionen in Deutschland*. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/klima/treibhausgas-emissionen-in-deutschland#emissionsentwicklung> (Stand: 15. März 2022).
- Umweltbundesamt. (2023a). *Emissionen des Verkehrs*. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs#verkehr-belastet-luft-und-klimaminderungsziele-der-bundesregierung>
- Umweltbundesamt. (2023b). *Klimaschutz im Verkehr*. Umweltbundesamt.
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/verkehr-laerm/klimaschutz-im-verkehr#undefined> (Stand: 15. März 2023).
- Van Loon, P., Deketele, L., Dewaele, J., McKinnon, A. C. & Rutherford, C. (2015). A comparative analysis of carbon emissions from online retailing of fast moving consumer goods. *Journal Of Cleaner Production*, 106, 478–486. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2014.06.060>
- Van Oers, L. & Guinée, J. B. (2016). The Abiotic Depletion Potential: Background, Updates, and Future. *Resources*, 5(1), 16. <https://doi.org/10.3390/resources5010016>
- Vandromme, N., Dandres, T., Maurice, E., Samson, R., Khazri, S., Moghaddam, R. F., Nguyen, K. K., Lemieux, Y. & Cheriet, M. (2014). Life cycle assessment of videoconferencing with call management servers relying on virtualization. *Advances in Computer Science Research*. <https://doi.org/10.2991/ict4s-14.2014.34>
- VDI. (2012). *VDI 4600:2012-01*.
- VDI. (2018). *Kumulierter Rohstoffaufwand (KRA) – VDI 4800 Blatt 2*.
- Vieira, M. & Huijbregts, M. A. J. (2020). *Mineral resource scarcity*. https://lc-impact.eu/doc/method/Chapter13__Mineral_resources_20201116_final.pdf
- Weiler, A. (2021, 11. Oktober). *E-Health-Markt profitiert von gesteigertem Gesundheitsbewusstsein*. ChannelPartner. <https://www.channelpartner.de/a/e-health-markt-profitiert-von-gesteigertem-gesundheitsbewusstsein,3338668>
- Weißmann, M. (2022, 20. September). *Energie wird teurer, Gaming auch: So viel Strom verbrauchen eure Konsolen und Gaming-PCs*. EUROGAMER.de. <https://www.eurogamer.de/energie-wird-teurer-gaming-auch-so-viel-strom-verbrauchen-eure-konsolen-und-gaming-pcs>
- Whitehead, B., Andrews, D. & Shah, A. (2015). The life cycle assessment of a UK data centre. *The International Journal Of Life Cycle Assessment*, 20(3), 332–349. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0838-7>
- Wiesend, S. (2023, 20. Oktober). *So teuer ist es, seine Apple Watch zu laden – das Ergebnis überrascht*. Macwelt. <https://www.macwelt.de/article/1343649/so-teuer-ist-es-seine-apple-watch-zu-laden-das-ergebnis-uberrascht.html#:~:text=0%2C0035%20kWh.,47%2C65%20Cent%20im%20Jahr>
- Willi Kägi, I. (2022, 24. März). *Gesünder und glücklicher dank Health Apps?*. Kalaidos Fachhochschule. <https://www.kalaidos-fh.ch/de-CH/Blog/Posts/2022/03/Digitalisierung-1064-Gesuender-und-gluecklicher-dank-Health-Apps>
- Wuppertal Institut, Senatsverwaltung für Umwelt, Verkehr und Klimaschutz Berlin & eBay Kleinanzeigen. (2021). *Circular economy 2021*. <https://www.ressourcenwende.net/wp-content/uploads/2022/01/Circular-Economy-2021.pdf>

YCharts. (2023). *Bitcoin Transactions Per Day*. https://ycharts.com/indicators/bitcoin_transactions_per_day (Stand: 20. Februar 2023).

Zhang, K., Gong, T. & Shi, K. (2019). Method for evaluating user-side flexible device access to power grid. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 295(4), 042065. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/295/4/042065>

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

Zukunftsinstitut. (2023, 16. Dezember). *Gesundheitsmärkte mit großem Zukunftspotenzial*. Zukunftsinstitut. <https://www.zukunftsinstitut.de/zukunftsthemen/gesundheitsmaerkte>