



BERGISCHE  
UNIVERSITÄT  
WUPPERTAL

Potentialevaluation aktueller  
Lebenszyklusanalysen -  
Ein Beitrag zur  
produktübergreifenden  
Nachhaltigkeitsbewertung

Dissertation  
zur Erlangung eines Doktorgrades  
in der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik  
der Bergischen Universität Wuppertal

vorgelegt von  
Karsten Schmidtseifer

Wuppertal 2026

|                 |                                         |
|-----------------|-----------------------------------------|
| Vorsitz:        | Univ.-Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Janoske |
| Erstgutachter:  | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Peter Gust         |
| Zweitgutachter: | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Dominik May        |
| Beisitz:        | Univ.-Prof. Dr.-Ing. Manuel Löwer       |
| Disputation:    | 20.04.2026                              |

Nothing surpasses the beauty and elegance of a bad idea.

— Craig Bruce



## Abstract

Neben dem voranschreitenden Klimawandel sind steigender Konsum von Produkten und damit verbunden, steigende Mengen an Abfällen, eines der Hauptprobleme unserer Zeit. Um diese Probleme zu lösen sind eine erfolgreiche Kreislaufwirtschaft und nachhaltigere Produkte notwendig. Sowohl für Endkunden als auch für Hersteller ist es wichtig bewerten zu können, welche Produkte im Sinne der Nachhaltigkeit gut gestaltet sind. Durch einen Vergleich von verschiedenen Produkten kann so die beste Lösung ausgewählt werden. Aber wie wird die Nachhaltigkeit von Produkten bewertet und sind diese Bewertungen überhaupt vergleichbar?

Zur Beantwortung der Forschungsfrage wurde eine umfassende Datenbasis aufgebaut, die Smartphones, Notebooks, Waschmaschinen, Kühlschränke, PKW, Pedelecs und Fahrräder beinhaltet. Diese Produktgruppen wurden in drei Hauptgruppen unterteilt. Für alle Produktgruppen wurden zehn Hauptmerkmale in der Datenbasis aufgenommen und analysiert, bspw. *Stoffliche Zusammensetzung, LCAs nach Phasen* und *EOL Strategien*.

Ausgehend von der aufgebauten Datenbasis und der Forschungsfrage, wie vergleichbar Ergebnisse von Ökobilanzen aufgrund der Unschärfe von Ein- und Ausgangsdaten sind, wurden drei Hypothesen abgeleitet und validiert. Es wurde getestet, ob die Daten bei einem deskriptiven Vergleich statistisch bedeutsame Unschärfen aufweisen und ob innerhalb und über Hauptgruppen hinweg klar identifizierbare Merkmalscluster bestehen.

Für die Bewertung der Unschärfe wurde ein Kriterium aufgestellt, welches in 89,67 % der Fälle (295 Fälle) verletzt wurde und somit eine signifikante Unschärfe aufzeigt. Die Identifikation von Merkmalsclustern wurde mithilfe einer Clusteranalyse der Daten durchgeführt. Die Analyse zeigte, dass keine strikte Trennung der Merkmalscluster innerhalb und über Hauptgruppen hinweg möglich ist. Dabei konnte sowohl beim deskriptiven Vergleich als auch den Clusteranalysen eine Unterscheidung in kurz- und langlebige Produkte ermittelt werden. In den Ergebnissen der Clusteranalyse konnte dieses Verhalten für bestimmte Produktgruppen zudem in den Eingangs- wie auch in den Ausgangsdaten nachgewiesen werden.

Die Vergleichbarkeit beschränkt sich im Ergebnis also darauf, ob ein Produkt kurz oder langlebig gestaltet ist. Eine weitere Vergleichbarkeit anderer Merkmale ist nicht möglich, was an verschiedenen erläuterten Faktoren liegt, wie z.B. Berechnungsgrundlage und Datenbasis oder die Wahl des Life Cycle Inventorys. Aus den Ergebnissen abgeleitet, konnten Lösungsansätze formuliert werden, um Nachhaltigkeitsbewertungen zu verbessern.

## Abstract

Advancing climate change and problems such as rising consumption of products and the associated increase in waste volumes mean that new solutions are needed. More sustainable products are necessary for a successful circular economy. It is important for both end customers and manufacturers to be able to assess which products are well designed in terms of sustainability. By comparing different products, the best solution can be selected. But how is the sustainability of products assessed, and are these assessments even comparable? These questions are answered in this paper.

To answer the research question, a comprehensive database was created that includes smartphones, notebooks, washing machines, refrigerators, cars, pedelecs, and bicycles. These product groups were divided into three main groups. For all product groups, ten main characteristics were included in the database and analyzed, e.g., *material composition*, *LCAs by phase*, and *EOL strategies*.

Based on the database and the research question of how comparable life cycle assessment results are due to the uncertainty of input and output data, three hypotheses were derived and validated. Tests were conducted to determine whether the data showed statistically significant uncertainties in a descriptive comparison and whether there were clearly identifiable clusters of characteristics within and across main groups.

A criterion was established for assessing ambiguity, which was violated in 89.67 % of cases (295 cases), thus indicating significant ambiguity. Characteristic clusters were identified using cluster analysis of the data. The analysis showed that it is not possible to strictly separate the feature clusters within and across main groups. However, both the descriptive comparison and the cluster analyses revealed a distinction between short-lived and long-lived products. The results of the cluster analysis also confirmed this behavior for certain product groups in both the input and output data.

The comparability is therefore limited to whether a product is designed to be short-lived or long-lived. It is not possible to compare other characteristics due to various factors, such as modeling and data basis or the choice of life cycle inventory. Based on the results, solutions were formulated to improve sustainability assessments.

## Widmung

Die vorliegende Dissertation entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl für Konstruktion der Fakultät für Maschinenbau und Sicherheitstechnik der Bergischen Universität Wuppertal. Zunächst bedanke ich mich bei Herr Prof. Dr.-Ing. Peter Gust der es mir ermöglicht hat, in diesem komplexen und bedeutsamen Thema meine Dissertation zu verfassen. Die intensiven Diskussionen haben den Erfolg dieser Arbeit erst ermöglicht. Ebenso bedanke ich mich bei Herr Prof. Dr.-Ing. Dominik May für die kurzfristige Übernahme der Begutachtung meiner Dissertation. Die um die Didaktik erweiterte Perspektive bietet einen großen Mehrwert in dieser Arbeit. Für die Übernahme des Vorsitzes der Prüfungskommission danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing habil. Uwe Janoske. Als viertes Mitglied der Prüfungskommission danke ich Herr Prof. Dr.-Ing Manuel Löwer, der mich lange im Themenfeld der Nachhaltigkeit begleitet und unterstützt hat.

Zusätzlich bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich immer unterstützt haben und zu dem Menschen gemacht haben, der ich heute bin. Ebenfalls bedanke ich mich bei meinen Kolleginnen und Kollegen an der Bergischen Universität Wuppertal, die mich auf diesem Weg begleitet haben. Danke für das Feedback und die Unterstützung auch in schwierigen Zeiten. Auch den zahlreichen Studierenden sowie den studentischen und wissenschaftlichen Hilfskräften sei an dieser Stelle für ihre Inputs gedankt. Zuletzt möchte ich mich bei meiner Frau bedanken, die mich während des gesamten Prozesses unterstützend begleitet hat und mir stets durch ihre Aufmerksamkeit und Hilfsbereitschaft zur Seite stand. Ohne sie wäre diese Dissertation wahrscheinlich weder begonnen noch abgeschlossen worden.



# Inhaltsverzeichnis

|                                                                        |           |
|------------------------------------------------------------------------|-----------|
| Nomenklatur . . . . .                                                  | XII       |
| <b>1 Einleitung</b>                                                    | <b>1</b>  |
| <b>2 Stand der Technik</b>                                             | <b>5</b>  |
| 2.1 Der Begriff der Nachhaltigkeit . . . . .                           | 5         |
| 2.2 Auswirkungen des Klimawandels . . . . .                            | 10        |
| 2.3 Rechtliche und regulatorische Bedingungen für nachhaltige Produkte | 17        |
| 2.3.1 Gesetzliche Grundlagen . . . . .                                 | 17        |
| 2.3.2 Normen . . . . .                                                 | 25        |
| 2.4 Produktlebenszyklus . . . . .                                      | 32        |
| 2.5 Wirtschaftsmodelle und Designansätze im Nachhaltigkeitskontext . . | 34        |
| 2.5.1 Linearwirtschaft . . . . .                                       | 34        |
| 2.5.2 Kreislaufwirtschaft . . . . .                                    | 35        |
| 2.5.3 Betrachtungsweisen der Kreislaufwirtschaft . . . . .             | 39        |
| 2.5.4 Circular Design bzw. Design Circular . . . . .                   | 41        |
| 2.6 R-Systeme . . . . .                                                | 43        |
| 2.7 Obsoleszenz von Produkten . . . . .                                | 48        |
| 2.8 Lebenszyklusanalyse (LCA) . . . . .                                | 50        |
| 2.8.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens . . . . .      | 51        |
| 2.8.2 Sachbilanz . . . . .                                             | 52        |
| 2.8.3 Wirkungsabschätzung . . . . .                                    | 52        |
| 2.8.4 Auswertung und Anwendung . . . . .                               | 53        |
| <b>3 Aktuelle Forschung</b>                                            | <b>55</b> |
| 3.1 Wissenschaftlicher Stand der Nachhaltigkeitsbewertung . . . . .    | 56        |
| 3.2 Zielgrößen der Nachhaltigkeitsbewertung . . . . .                  | 60        |
| 3.3 Ableitung der Forschungsfrage . . . . .                            | 65        |

|          |                                                                        |            |
|----------|------------------------------------------------------------------------|------------|
| <b>4</b> | <b>Vorgehen</b>                                                        | <b>67</b>  |
| 4.1      | Auswahl der Produktgruppen . . . . .                                   | 67         |
| 4.2      | Aufbau der Datenbasis . . . . .                                        | 71         |
| 4.3      | Datenbasis . . . . .                                                   | 75         |
| <b>5</b> | <b>Synthese</b>                                                        | <b>91</b>  |
| 5.1      | Qualität der Datenbasis . . . . .                                      | 91         |
| 5.2      | Forschungsfrage und Hypothesen . . . . .                               | 94         |
| 5.3      | Deskriptiver Vergleich . . . . .                                       | 97         |
| 5.4      | Clusteranalyse der Datenbasis . . . . .                                | 114        |
| <b>6</b> | <b>Diskussion</b>                                                      | <b>129</b> |
| 6.1      | Deskriptiver Vergleich . . . . .                                       | 131        |
| 6.2      | Clusteranalyse . . . . .                                               | 138        |
| 6.3      | Herausforderungen aktueller Nachhaltigkeitsbewertungen . . . . .       | 141        |
| 6.4      | Beantwortung der Forschungsfrage . . . . .                             | 144        |
| 6.5      | Lösungen aus der Nachhaltigkeitsdidaktik . . . . .                     | 146        |
| 6.6      | Lösungsansätze für eine verbesserte Nachhaltigkeitsbewertung . . . . . | 149        |
| <b>7</b> | <b>Zusammenfassung und Ausblick</b>                                    | <b>153</b> |
| <b>A</b> | <b>Anhang</b>                                                          | <b>157</b> |
| A.1      | Datenbasis . . . . .                                                   | 157        |
| A.1.1    | Stoffliche Zusammensetzung (Prozentual gewichtet) . . . . .            | 158        |
| A.1.2    | Absatzzahlen (Absolut gewichtet) . . . . .                             | 164        |
| A.1.3    | Nutzungsdauer (Mittlere Nutzungsdauer (Jahre)) . . . . .               | 167        |
| A.1.4    | LCAs nach Phasen . . . . .                                             | 168        |
| A.1.5    | LCAs nach Bauteilen . . . . .                                          | 177        |
| A.1.6    | LCAs nach Werkstoffen . . . . .                                        | 183        |
| A.1.7    | Selbsterstellte LCAs nach Werkstoffen (Prozentual gewichtet) . . . . . | 184        |
| A.1.8    | EOL Strategien . . . . .                                               | 195        |
| A.1.9    | Kritische Rohstoffe . . . . .                                          | 197        |
| A.1.10   | Fehlerquellen . . . . .                                                | 199        |
| A.2      | Ergebnisse der Clusteranalyse . . . . .                                | 201        |
| A.2.1    | LCAs nach Phasen . . . . .                                             | 201        |

|          |                                                              |            |
|----------|--------------------------------------------------------------|------------|
| A.2.2    | LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen (metrisch) . . . . | 205        |
| A.2.3    | LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen (nominal) . . . .  | 211        |
| A.2.4    | LCAs nach Werkstoffen . . . . .                              | 220        |
| <b>B</b> | <b>Abbildungsverzeichnis</b>                                 | <b>229</b> |
| <b>C</b> | <b>Tabellenverzeichnis</b>                                   | <b>231</b> |
| <b>D</b> | <b>Literaturverzeichnis</b>                                  | <b>235</b> |

# Nomenklatur

## Abkürzungsverzeichnis

|                        |                                                |
|------------------------|------------------------------------------------|
| ABS                    | Acrylnitril Butadien Styrol                    |
| ANOVA                  | Analysis of Variance                           |
| BIP                    | Bruttoinlandsprodukt                           |
| BNE                    | Bildung für nachhaltige Entwicklung            |
| C2C                    | Cradle-to-Cradle                               |
| CEAP                   | Circular Economy Action Plan                   |
| CFP                    | Carbon Footprint                               |
| CO <sub>2</sub>        | Kohlenstoffdioxid                              |
| CPU                    | Central Processing Unit                        |
| CSRD                   | Corporate Sustainability Reporting Directive   |
| DIN                    | Deutsches Institut für Normung e.V.            |
| DNS                    | Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie              |
| EN                     | Europäische Norm                               |
| EOL                    | End-of-Life                                    |
| ESPR                   | Ecodesign for Sustainable Products Regulation  |
| ESRS                   | European Sustainability Reporting Standards    |
| EU                     | Europäische Union                              |
| FCKW                   | Fluorchlorkohlenwasserstoffe                   |
| GRI                    | Global Reporting Initiative                    |
| GSSB                   | Global Sustainability Standards Board          |
| GWP                    | Global Warming Potential                       |
| HOP                    | Halte à L'Obsolescence Programmée              |
| IC                     | Integrated Circuit                             |
| IKT                    | Informations- und Kommunikationstechnologie    |
| ILCD                   | International Life Cycle Data System           |
| IPCC                   | Intergovernmental Panel on Climate Change      |
| IQ-Dimensionen         | Informationsqualitäts-Dimensionen              |
| ISO                    | International Organization for Standardization |
| kg CO <sub>2</sub> Äq. | kg CO <sub>2</sub> -Äquivalent                 |
| kWh                    | Kilowattstunde                                 |

|       |                                                 |
|-------|-------------------------------------------------|
| LCA   | Life Cycle Assessment                           |
| LCI   | Life Cycle Inventory                            |
| LCIA  | Life Cycle Impact Assessment                    |
| LCT   | Life Cycle Thinking                             |
| NE    | nachhaltige Entwicklung                         |
| PA    | Polyamide                                       |
| PDCA  | Plan-Do-Check-Act                               |
| PKW   | Personenkraftwagen                              |
| PS    | Polystyrol                                      |
| PVC   | Polyvinylchlorid                                |
| S-LCA | Social Life Cycle Assessment                    |
| SDG   | Sustainable Development Goals                   |
| TBL   | Triple-Bottom-Line                              |
| THG   | Treibhausgas                                    |
| UN    | United Nations                                  |
| WCED  | World Commission on Environment and Development |
| WEEE  | Waste Electrical and Electronic Equipment       |

## Formelverzeichnis

|           |                        |
|-----------|------------------------|
| $a$       | Heterogenitätszuwachs  |
| $k$       | Kriterium              |
| $n$       | Anzahl                 |
| $s$       | Standardabweichung     |
| $s^2$     | Varianz                |
| $v$       | Variationskoeffizient  |
| $x$       | Einzelwert             |
| $\bar{x}$ | Mittelwert             |
| $z$       | z-transformierter Wert |
| $\alpha$  | Signifikanzniveau      |



# 1 Einleitung

Das stetige Bevölkerungswachstum auf der Erde geht mit einem wachsenden Ressourcenverbrauch sowie einer wachsenden Menge an Abfall pro Jahr einher [Forti et al., 2020]. Dabei hat nicht nur das Bevölkerungswachstum selbst, sondern auch davon abgeleitete Effekte, wie die Industrialisierung dazu geführt, dass es in der jüngsten Zeit zu einem sehr starken Anstieg der CO<sub>2</sub> (Kohlenstoffdioxid) Konzentration in der Luft kam [UN Environment, 2019]. Durch die Analyse von Bohrkernen und Messungen aus mittlerweile mehr als 60 Jahren ist gut erkennbar, dass dieser Anstieg eine Anomalie ist, verglichen mit den letzten 800.000 Jahren [Mann, 2021]. Die Gründe für diesen Anstieg sind vielfältig, neben dem genannten Bevölkerungswachstum sind die Industrialisierung sowie weitere davon abhängige Faktoren wie z.B. steigende Energienutzung, Kohleproduktion und der Verlust von Waldgebieten Ursachen dieser Anomalie [McNeill, 2000].

Durch diese Veränderungen der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft werden Probleme wie die Versauerung der Ozeane sowie mehr extreme Hitzeperioden immer wahrscheinlicher und gefährden das Leben auf der Erde für Menschen und alle anderen Lebewesen [Team et al., 2023]. Die extensive Nutzung der Ressourcen auf der Erde und der starke Eingriff des Menschen in vorliegende Ökosysteme führen dazu, dass immer mehr planetare Grenzen erreicht und überschritten werden [Rockström et al., 2009]. Diese „planetary boundaries“ beschreiben einen wissenschaftlich ermittelten Korridor für menschliches Wirken, in dem es möglich ist, nachhaltig über viele Generationen zu leben [WCED, 1987].

Für die Lösung dieser Probleme bedarf es vielfältiger neuer Lösungsstrategien. Ein Punkt dabei ist die nachhaltigere Gestaltung des Wirtschaftssektors, wie es zum Beispiel mit den Ansätzen der Kreislaufwirtschaft versucht wird. Die aktuell noch vorherrschende Linearwirtschaft verursacht große Probleme für die Umwelt durch immer neue Verkäufe und einen wachsenden Müllberg, der gerade bei elektronischen Geräten zu beobachten ist [Forti et al., 2020, Statistisches Bundesamt, 2021]. Durch

## 1 Einleitung

kurze Produktlebenszyklen, eine schlechte Reparierbarkeit von Produkten sowie anderen Faktoren lebt die Menschheit global gesehen in einer Zeit des Überkonsums [Wieser und Troeger, 2015]. Um die Gestaltung, wie auch die Nutzung und Entsorgung von Produkten nachhaltiger zu gestalten, sind Hersteller, Verbraucher und auch die Wissenschaft gefragt, um gemeinsame Ansätze zu entwickeln, zu bewerten und umzusetzen. Durch verschiedene Strategien, die Nutzungsphase eines Produktes zu verlängern oder es am Lebensende wieder zu benutzen, wie z.B. mit einer Reparatur oder einem Recycling, können Produkte nach ihrer Produktion nachhaltiger werden. Aber wie können diese Umweltauswirkungen überhaupt gemessen werden, sowohl in den Phasen in denen das Produkt beim Hersteller entsteht als auch später bei der Benutzung durch Verbraucher?

Für die Bewertung der Umweltauswirkungen von Produkten und dem dabei erlangten Wissen für eine nachhaltigere Produktgestaltung, existieren zahlreiche Methoden wie z.B. Normen wie die DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 sowie die GRI-Standards (Global Reporting Initiative) [DIN e. V., 2021a, DIN e. V., 2021b, GRI, 2024a]. Diese Normen bieten ein Grundgerüst, um sogenannte Lebenszyklusanalysen durchzuführen, welche die Auswirkungen eines Produktes auf die Umwelt beschreiben. Diese Auswirkungen werden durch Faktoren wie z.B. dem „Global Warming Potential“ (GWP) beschrieben, welches in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent gemessen wird [DIN e. V., 2021a]. Die Lebenszyklusanalysen oder auch Ökobilanzen werden dabei mit verschiedenen Betrachtungsweisen ausgeführt. Es können z.B. die Phasen des Produktlebenszyklus oder die werkstoffliche Zusammensetzung des Produktes und deren Auswirkungen auf das GWP beschrieben werden. Mit den Ergebnissen von Ökobilanzen werden aktuell sowohl bei Herstellern als auch in wissenschaftlichen Veröffentlichungen Aussagen über die Nachhaltigkeit gemacht, wie z.B. zu sehen bei Cordella et al., Rüdenauer und Prakash, Buberger et al., Apple, Riese & Müller und zahlreichen anderen [Cordella et al., 2021b, Rüdenauer und Prakash, 2020, Buberger et al., 2022, Apple, 2025, Riese & Müller, 2025]. Die berechneten Auswertungen aus den Lebenszyklusanalysen sollen Auskunft über die Nachhaltigkeit eines Produktes geben und sind auch für Gesetzgeber von Interesse. Diese treffen auf Basis der Ergebnisse Entscheidungen für neue Gesetzentwürfe, wie bspw. in Änderungen der Ökodesignrichtlinie erkennbar [European Commission, 2019]. Für den Endkunden sind diese Informationen ebenso interessant, um ein nachhaltigeres Produkt zu erwerben und zu benutzen. Bei dieser Auswahl eines Pro-

duktes werden unweigerlich Rückschlüsse auf andere Produkte aus der betrachteten Produktgruppe gezogen und Vergleiche durchgeführt. Eine Handlungsempfehlung für Endkunden für diese Vergleiche ist z.B. beim Blauen Engel oder dem Siegel „EINE GRÜNERE WAHL“ formuliert [Umweltbundesamt, 2012, Nendza, 2026]. Aber wie gut sind diese Nachhaltigkeitsbewertungssysteme wirklich geeignet, um sie für Vergleiche und eine umweltbewusstere Wahl eines Produktes zu nutzen?

Um diese Frage zu beantworten wird zunächst der Begriff der Nachhaltigkeit erklärt. Die Auswirkungen des Klimawandels als konkretes Problem bedürfen neuer Lösungen im Bereich der Nachhaltigkeit. Damit die Auswirkungen zum einen messbar und zum anderen auswertbar gemacht werden können, wird der aktuelle Rahmen an rechtlichen und regulatorischen Bedingungen für nachhaltige Produkte dargestellt. Die Nachhaltigkeit von Produkten wird durch dessen Produktlebenszyklus sowie verschiedene Wirtschaftsmodelle aufgezeigt. Dabei wird sowohl auf Lösungsansätze zur Verbesserung der Nachhaltigkeit z.B. die R-Systeme, als auch auf aktuelle Probleme wie die Obsoleszenz von Produkten eingegangen. Für die Vergleichbarkeit von Nachhaltigkeit werden aktuelle Richtlinien zum Erstellen und Auswerten von Lebenszyklusanalysen betrachtet, wie z.B. die DIN EN ISO 14040.

Die gesammelten Erkenntnisse werden in Kontext mit dem Vorgehen in der aktuellen Forschung zum Thema Nachhaltigkeitsbewertung gebracht. Aus dem Stand der aktuellen Forschung und den aktuellen Zielgrößen in der Nachhaltigkeitsbewertung wird die Forschungsfrage abgeleitet.

Für die Beantwortung dieser Forschungsfrage werden in dieser Arbeit verschiedene Produktgruppen ausgewählt. Die Wahl erfolgt dabei auf Basis von definierten Merkmalen, die deren Bezug zur Nachhaltigkeit beschreiben, wie z.B. die Produktlebensdauer, Absatzzahlen, Anteil am Abfallaufkommen oder schon existierende Regulierungen für eine Verbesserung der Nachhaltigkeit. Für die ausgewählten Produktgruppen werden dann wiederum bestimmte Hauptmerkmale für spätere Analysen erfasst. Die gewählten Hauptmerkmale beschreiben dabei direkt oder indirekt die Nachhaltigkeit von Produkten und sollen einen ganzheitlichen Überblick verschaffen. Für die Auswahl wird der Standard für die Nachhaltigkeitsbewertung identifiziert und genutzt. Mithilfe der so erstellten Datenbasis wird die Vergleichbarkeit und Relevanz der aktuellen Methoden für Ökobilanzierungen analysiert und unter Zuhilfenahme mathematischer Methoden bewertet. Nur so kann eine objektive Bewertung ermöglicht werden. Dabei werden aktuell existierende Probleme aufgedeckt

## *1 Einleitung*

und beschrieben sowie erste Handlungsmöglichkeiten zur Verbesserung präsentiert. Ein besserer Vergleich von Produkten und deren Nachhaltigkeitsbewertung bieten das Potential, die drängenden Probleme, die am Anfang beschrieben wurden, zumindest in einem Teilbereich zu lösen. Endkunden können begründet die Wahl eines nachhaltigen Produktes treffen und Hersteller können danach streben, das im Vergleich nachhaltigste Produkt zu produzieren.

## 2 Stand der Technik

Das folgende Kapitel stellt grundlegende Themen, die allgemeine Nachhaltigkeit betreffen, dar. Dabei werden zuerst Begrifflichkeiten wie der Nachhaltigkeitsbegriff selbst sowie grundlegende Konzepte wie die drei Säulen der Nachhaltigkeit erklärt. Davon ausgehend wird die Relevanz der Nachhaltigkeit in aktuellen gesetzlichen Rahmenbedingungen sowie Normen aufgezeigt und diese erklärt. Aufbauend auf den genannten Informationen werden Wirtschaftsmodelle im Nachhaltigkeitskontext wie z.B. die Kreislaufwirtschaft oder Cradle-to-Systeme beschrieben. Für diese Modelle werden Lösungen wie die R-Systeme, um eine Kreislaufwirtschaft realisieren zu können, erläutert. Abschließend werden der Produktlebenszyklus sowie die Lebenszyklusanalyse als Mittel zur Nachhaltigkeitsbewertung dargestellt.

### 2.1 Der Begriff der Nachhaltigkeit

Das Thema der Nachhaltigkeit ist ein sehr facettenreiches. Da sich im Folgenden intensiv damit auseinandergesetzt wird, lohnt es sich, zuerst die generellen Begrifflichkeiten wie auch den „Werdegang“ der Nachhaltigkeit zu erläutern. Zunächst wird die Entwicklung des Nachhaltigkeitsbegriffs über die Zeit aufgezeigt, wie in Abb. 2.1 zu sehen, da so die eigentliche Definition der Nachhaltigkeit besser nachvollziehbar ist. Die Literatur ist weitestgehend im Konsens, dass der erste wissenschaftliche Diskurs, bei dem der Begriff „Nachhaltigkeit“ das erste Mal genannt bzw. umschrieben wurde, die Abhandlungen von Hannß Carl von Carlowitz aus dem Jahr 1713 sind [Grober, 2013]. Dieser schreibt in seiner „Sylvicultura oeconomica“ über die „[...] Nachricht und [n]aturmäßige Anweisung zur [w]ilden Baum-Zucht“ [von Carlowitz et al., 2012].

Carlowitz beobachtete bzw. analysierte schon damals, dass eine gewisse Menge Holz kontinuierlich nachgepflanzt und gepflegt werden muss, um dauerhaft eine gewisse weitere Menge Holz aus einem definierten Bereich entnehmen zu können.

## 2 Stand der Technik

Dabei umschrieb er die bis dato existierende Nachhaltigkeit meistens mit anderen Begrifflichkeiten, im folgenden Zitat wurde dieser dann das erste Mal gebraucht: „[...] /Wird derhalben die größte Kunst/Wissenschaft/ Fleiß/ und Einrichtung hiesiger Lande darinnen beruhen/ wie eine sothane **Conservation** und Anbau des Holtzes anzustellen/ daß es eine **continuirliche beständige** und **nachhaltende** Nutzung gebe/ weiln es eine unentberliche Sache ist/ ohne welche das Land in seinem Esse [Existenz] nicht bleiben mag.“ [von Carlowitz et al., 2012]. Aus der „continuirliche[n], beständige[n] und nachhaltige[n] Nutzung“ wurde dann die nachhaltige Nutzung und später die Nachhaltigkeit an sich.

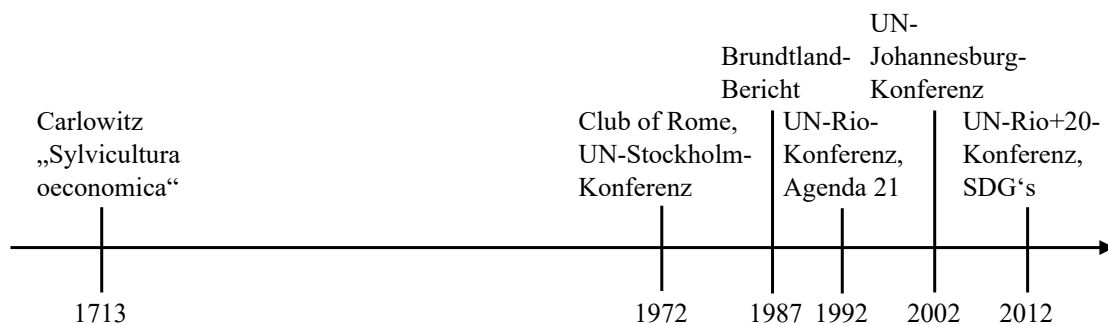


Abbildung 2.1: Zeitstrahl der Nachhaltigkeitsgeschichte (Eigene Darstellung)

Die zuvor beschriebene Vorgehensweise, nur so viel zu entnehmen, wie auf natürlichem Wege nachwachsen kann, wird auch im Folgenden immer als Basis für den Nachhaltigkeitsbegriff gesehen. Dieser wurde lange Zeit aber nicht populär aufgegriffen oder weiterentwickelt. 1972 veröffentlichte der Club of Rome noch das englischsprachige Buch „The limits to growth“ (Die Grenzen des Wachstums) [Meadows, 1972]. In diesem Bericht, verfasst von einigen Wissenschaftlern und Experten, wurde das in vielen Bereichen exponentielle Wachstum angeprangert, z.B. bei Düngemitteln [Meadows, 1972]. Laut dem Bericht würden viele der planetaren Grenzen um das Jahr 2000 erreicht werden, alleine schon wegen des weiter steigenden ausgerechneten Bevölkerungswachstums [Meadows, 1972].

Die Veröffentlichung des Club of Rome kam passend zu der ersten Versammlung der Vereinten Nationen mit dem Thema „Human Environment (eng.: menschliche Umwelt)“. Bei der Stockholm-Konferenz wurde von allen Beteiligten festgehalten, dass der Mensch in erheblichem Maße in die Umwelt eingreift und diese damit verändert [United Nations, 1972]. Als Antwort auf diese Probleme wurden 26 Prinzipien

## 2.1 Der Begriff der Nachhaltigkeit

gemeinsam entwickelt. Unter anderem, dass der Mensch die Welt für nachfolgende Generationen schützen muss. Gerade Land, Luft, Flora und Fauna wurden hier genannt, die in einem gleichbleibenden Zustand erhalten bleiben sollen [United Nations, 1972].

Der nächste große Meilenstein für die Nachhaltigkeit war der „Brundtland-Bericht“ im Jahr 1987 der United Nations (UN), bzw. der World Commission on Environment and Development (WCED). Mit dem Obertitel „Our Common Future“ der Konferenz sollten lang angelegte Lösungen für die Umwelt erarbeitet werden, um ein nachhaltiges Wachstum bis zum Jahr 2000 und darüber hinaus zu sichern [WCED, 1987]. Dabei wurde eine Weiterentwicklung des Nachhaltigkeitsbegriffs definiert, die ebenfalls oft als Zitat verwendet wird: „Humanity has the ability to make development sustainable to ensure that it meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs“ (dt.: Die Menschheit hat die Fähigkeit, Entwicklung nachhaltig zu gestalten, um sicherzustellen, dass sie den Bedürfnissen der Gegenwart gerecht wird, ohne die Fähigkeit künftiger Generationen zu beeinträchtigen, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen) [WCED, 1987]. Im Zusammenhang des Brundtland-Berichtes wurde auch erstmals über die soziale Nachhaltigkeit gesprochen und damit der Grundstein für das heute noch aktuelle Drei-Säulen-Modell der Nachhaltigkeit gelegt.

Als nächster großer Meilenstein kann die „Rio-Konferenz 1992“ der Vereinten Nationen genannt werden. Bei der Konferenz ging es spezifisch um die Umwelt und die Entwicklung dieser, sowie der Entwicklung bestimmter benachteiligter Länder [United Nations, 1992]. Dabei wurde die „Agenda 21“ erstellt und von allen beteiligten Ländern anerkannt, um global die nachhaltige Entwicklung voranzutreiben [Dahl, 2014]. Als geforderte Ziele wurde eine Ansammlung an Maßnahmen erstellt, die sehr viele Bereiche betreffen, wie z.B. Armut, Verbrauch, Schutz der Atmosphäre, Schutz der Waldflächen, Schutz der Biodiversität und vielen mehr [United Nations, 1992].

Der „World Summit on Sustainable Development“ tagte 2002, 10 Jahre nach der Konferenz in Rio, diesmal in Johannesburg [United Nations, 2002]. In Johannesburg wurde von den Anwesenden die Absicht, die Maßnahmen, die in Rio vereinbart wurden, umzusetzen, nochmals erneuert. Die Maßnahmen wurden dabei teilweise nochmal erweitert, außerdem wurde offiziell ein Zehn-Jahres-Turnus festgelegt, in dem gemeinsam die Umsetzung überprüft werden soll [United Nations, 2002]. Bei den Umsetzungen der geplanten Maßnahmen gibt es allerdings oft große Diskrepan-

## 2 Stand der Technik

zen, so wurde z.B. ermittelt, dass für die Umsetzung der Maßnahmen der Agenda 21 ca. 120 Milliarden US-Dollar jährlich international nötig wären, als Ziel wurden beim „Earth Summit“ allerdings nur 20 Milliarden US-Dollar pro Jahr festgelegt [Dahl, 2014]. Durch diese Diskrepanzen sowie multilaterale Zielkonflikte einzelner Länder konnte bis jetzt an den gemessenen Klimawandel-Indikatoren noch keine signifikante Verbesserung gemessen werden [WMO, 2022].

Im Jahr 2012 tagten die Vereinten Nationen in Rio, diesmal unter dem Namen „Rio+20“. Dabei wurden erneut die drei Säulen der Nachhaltigkeit festgehalten, die Ziele der Agenda 21 nochmals anerkannt und weiterverarbeitet in die bis heute aktuellen „Sustainable Development Goals (SDGs)“ [United Nations, 2012]. Bei den Sustainable Development Goals gibt es 17 verschiedene Oberziele, die sich wiederum in 169 Unterziele aufteilen, wobei die Oberziele auch nach dem Drei-Säulen-Modell ausgewählt wurden [United Nations, 2023]. Diese gesetzten Ziele werden mittlerweile jährlich auf ihren Umsetzungsgrad überprüft und in einem Bericht zusammengetragen [United Nations, 2022]. Eine weitere Konferenz (eigentlich im Jahr 2022) fand aufgrund der Corona-Pandemie nicht statt.

### Drei Säulen der Nachhaltigkeit

Wie zuvor beschrieben entstand das erste Konzept der „Drei Säulen der Nachhaltigkeit“ (siehe Abb. 2.2) durch den Brundtland-Bericht im Jahre 1987. Die ökologische Nachhaltigkeit bedeutet in diesem Kontext, dass ein ökologisches System dauerhaft genutzt werden kann. Bei der ökonomischen Nachhaltigkeit geht es darum, dass Hersteller so agieren, dass ein dauerhaftes Wirtschaften auf einem gewissen Niveau gewährleistet wird. Die soziale Nachhaltigkeit sichert den dauerhaften Fortbestand der Gesellschaft, sowie auch die gerechte Behandlung dieser [Pufé, 2020].

Dabei wird unter den neuen Ansätzen für die Umwelt und die Entwicklung dieser davon gesprochen, dass die Verschlechterung der Umwelt durch direkte Maßnahmen an ihr und durch ökonomische Entscheidungen maßgeblich betroffen ist [WCED, 1987]. Als dritte Verknüpfung der Umweltprobleme werden soziale und politische Faktoren genannt [WCED, 1987]. Dabei wurde gerade die Verkopplung dieser Einzelprobleme herausgestellt und im Umkehrschluss die Schwierigkeit, in allen Dimensionen so zu handeln, dass eine ganzheitliche Nachhaltigkeit erreicht wird. Das Spannungsfeld zwischen Ökonomie und Ökologie ist dabei einfacher verständlich als

## 2.1 Der Begriff der Nachhaltigkeit

die sich ergebenden Felder mit der sozialen Nachhaltigkeit. Laut Pufé besteht das Problem darin, die Dreidimensionalität bzw. Ganzheitlichkeit der Anforderungen alle miteinander vereinbar zu machen, um so eine „wirklich nachhaltige“ Entwicklung hervorzubringen [Pufé, 2020].

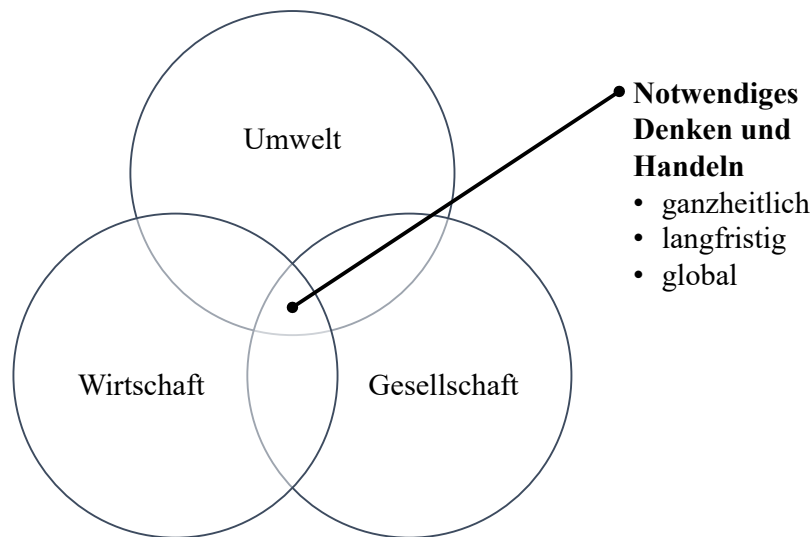


Abbildung 2.2: Drei-Säulen-Modell, in Anlehnung an Pufé 2020 (Eigene Darstellung)

Gerade die ökonomische Nachhaltigkeit eröffnet in dieser Dreidimensionalität ein beträchtliches Spannungsfeld. So soll eine Grundversorgung und Existenzsicherung bestehen, allerdings wird es mit einem „grenzenlosen Wachstum“ schwierig vereinbar sein, dass sämtliche aktuell existierende Unternehmen auf einem für alle vereinbaren Niveau weiter wirtschaften und ggf. durch kommende Generationen auch noch neue Betriebe in diesen Kreislauf aufgenommen werden, ohne mehr Ressourcen zu verbrauchen. Balderjahn schreibt weiter dazu, dass nur Unternehmen, die wirtschaftlich wettbewerbsfähig sind, die Position innehaben, sich sozial und auch ökologisch zu engagieren [Balderjahn, 2013].

An dem Drei-Säulen-Modell gibt es durchaus auch Kritik. So ist es fraglich, wie diese dreidimensionale Nachhaltigkeit global oder lokal auf der Welt stringent zu verfolgen wäre, da an dieser Stelle durchaus lokal nachhaltige Interessen auf einem globalen Maßstab, bzw. in anderen Ländern oder Kontinenten mit anderen Randbedingungen nicht mehr als nachhaltig zu bewerten wären [Ekardt, 2016]. Weiterhin führt die angestrebte Dreidimensionalität der Nachhaltigkeit dazu, dass oftmals nur

## 2 Stand der Technik

einzelne Indikatoren erstellt werden, um Fortschritte zu messen, die wiederum aber nur Teilbereiche des Drei-Säulen-Modells abdecken. So hat zum Beispiel die Bundesregierung in ihrer letzten Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie (DNS) neue Indikatoren festgelegt, wie z.B. „Frauen in Führungspositionen im öffentlichen Dienst des Bundes“, „Väterbeteiligung beim Elterngeld“ oder auch den „Breitbandausbau“ [Bundesregierung, 2020]. Bei den genannten Indikatoren ist es zunehmend komplex, die Dreidimensionalität oder wie im zuvor erwähnten Beispiel den Bezug zur Ökonomie und Ökologie herzustellen, was dazu führen kann, dass der Nachhaltigkeitsbegriff eher unschärfer, als stärker definiert wird.

Die Drei Säulen der Nachhaltigkeit werden auch weiter Drei-Säulen-Modell oder im englischen „Triple Bottom Line: People, Planet, Profit“ genannt [Balderjahn, 2013]. Der Begriff Triple-Bottom-Line (TBL), leitet sich dabei als Umkehrschluss der sog. Bottom Line ab, die im Finanzwesen in der Regel für explizite Finanz- bzw. Wertziele steht [Wellbrock und Ludin, 2021]. Aktuelle Weiterentwicklungen des Drei-Säulen-Modells sind z.B. das „Design Circular“, welches den ökologischen, ökonomischen und sozialen Aspekt noch um den technologischen Aspekt als vierte Säule erweitert [Münger, 2021]. Die technologische Säule steht dabei für die Relevanz, die Herausforderungen der anderen Säulen mit technologisch sinnhaften und vielleicht auch innovativen Ansätzen zu lösen. Der Eigenname Design Circular soll zudem noch die Kreislauffähigkeit der Rohstoffe und Produkte unterstreichen, welche betont kreislauffähig entwickelt, produziert und verwendet werden [Münger, 2021].

## 2.2 Auswirkungen des Klimawandels

Die Nachhaltigkeit bzw. der Nachhaltigkeitsbegriff hat nicht zuletzt durch die steigende Relevanz des Klimawandels ebenfalls an Bedeutung zugenommen. Im großen Themenfeld „Klimawandel“ kommt es allerdings auch zu Verwechslungen mit Klimaerwärmung, menschengemachtem und natürlichen (zeitlicher) Klimawandel sowie den Zusammenhängen des Klimawandels mit jüngeren Umweltkatastrophen. Dieses Kapitel soll daher einen kurzen Einblick in den Klimawandel geben und dabei auch die Signifikanz von Nachhaltigkeitsbemühungen bestätigen.

Das Zeitalter der Erde wird in einem engmaschigen Umfang in Epochen angegeben, dabei ist die letzte Epoche das Holozän, welches in etwa die letzten 11.700 Jahre

## 2.2 Auswirkungen des Klimawandels

der Erde beschreibt [Fairbridge und Agenbroad, 2023]. Vor der Epoche des Holozäns fanden das Pleistozän (ca. vor 1,8 Millionen Jahren) und davor das Pliozän (ca. vor 5,3 Millionen Jahren) als Epochen statt, wobei die beiden zuletzt genannten im Gegensatz zum Holozän eine deutlich längere zeitliche Dauer und auch den Wechsel zwischen Warm- und Eiszeiten beschreiben [Fairbridge und Agenbroad, 2023]. Durch entnommene Bodenproben, sogenannte Kerne vom Grunde des Ozeans, können durch spezifische Sedimentzusammensetzungen und darin vorhandene Isotope, wie auch Eisbohrkerne aus Permafrostgebieten viele Informationen gewonnen werden, wie die Konzentration bestimmter Gase sowie auch die damals durchschnittliche Temperatur oder der Meeresspiegel [Berger et al., 2012]. Dabei konnte festgestellt werden, dass in den letzten beiden wärmsten Warmzeitperioden, der Eem- und der Holstein-Warmzeit, welche ca. 0,1 und 0,4 Millionen Jahre zurückliegen, die Temperaturen etwa ein Grad unter der im Jahr 2000 gemessenen globalen Temperatur lagen [Berger et al., 2012]. In der Epoche des Pliozäns waren die Temperaturen nur etwa ein Grad wärmer als im Holozän, wobei hier der Meeresspiegel etwa 25 Meter über dem heutigen lag und die Geographie der Erde eine vollkommen andere war [Dowsett et al., 1994].

Diese Unterschiede in den durchschnittlichen Temperaturen lassen sich durch eine Vielzahl von Faktoren auf der Erde erklären, wie z.B. die Landbedeckung, Permafrostsysteme aber auch die Gaszusammensetzung welche innerhalb der Atmosphäre herrscht. Gerade das Gas Methan ( $CH_4$ ) sowie auch das Kohlendioxid ( $CO_2$ ) führen zu großen Teilen zur Erwärmung dieser [Kappas, 2009]. Dabei hat das Methan das größere Treibhauspotential (eng.: „Global Warming Potential“, GWP), das Kohlendioxid überwiegt allerdings mengenmäßig und macht in der heutigen Zeit etwa 60 Prozent des gemessenen Treibhauseffekts aus [Kappas, 2009, Benner et al., 2021]. Werden die Daten der  $CO_2$ -Konzentration über die Zeit betrachtet, ist zu erkennen, dass in den letzten Jahrzehnten bis zur heutigen Zeit ein sehr starker Anstieg erfolgt ist [UN Environment, 2019]. Dabei schwankte der durchschnittliche, in der Atmosphäre gemessene Kohlendioxidgehalt in den letzten 0,8 Millionen Jahren zwischen ca. 180 ppm bis maximal ca. 300 ppm und stieg dann in den letzten knapp 200 Jahren auf einen Wert von über 400 ppm an (siehe Abb. 2.3) [UN Environment, 2019].

Seit 1960 wird dieser Wert kontinuierlich an einer Messstation auf Hawaii, dem Mauna Loa Observatorium, gemessen. Die Datenreihe ist seit dem Beginn der Auf-

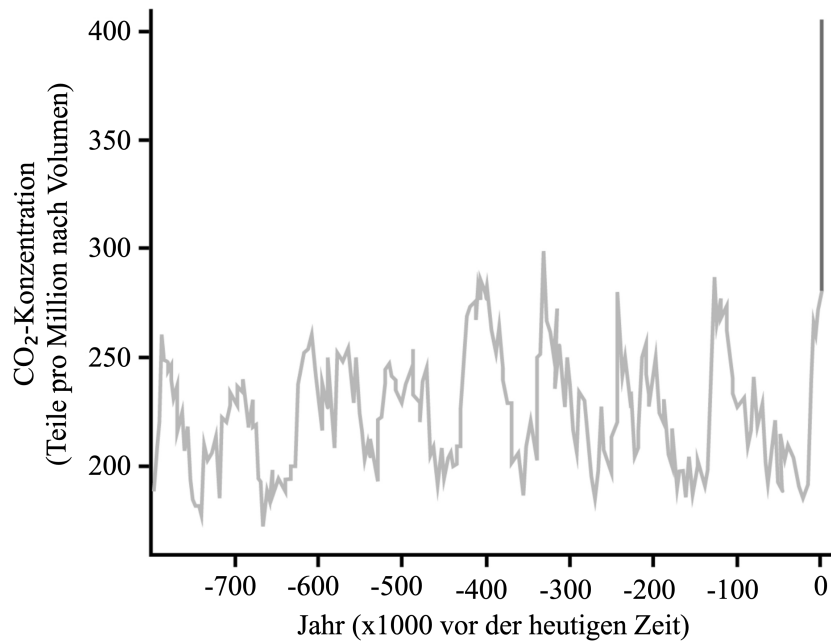


Abbildung 2.3: Mittlere atmosphärische CO<sub>2</sub>-Konzentration. Datenbasis Lüthi et al. 2008, in Anlehnung an UN Environment 2019

zeichnungen kontinuierlich über die Jahre steigend und hat sich in 60 Jahren von knapp 320 ppm auf heute 420 ppm erhöht [Tans, 2023]. Durch die präsentierten Daten aus den Bohrkernen und denen des Observatoriums ist gut erkennbar, dass es in den Messungen, die die letzten 800.000 Jahre betreffen, in den letzten Jahrzehnten zu einer signifikanten Anomalie gekommen ist. Ähnliche Messdaten werden auch zu den weltweit gemessenen mittleren Temperaturen geliefert, wo noch deutlicher eine sogenannte „Hockey-Stick-Kurve“, zu sehen in Abb. 2.4, sichtbar wird. Mann et al. haben dafür verschiedene Mess- und Simulationsdaten zu einer Kurvenschar zusammengelegt, das Ergebnis ist eine relativ gleichbleibende mittlere Temperatur bis ins Jahr 1000, danach leicht abfallend bis ca. zum Jahr 1800 gefolgt von einem sehr scharfen Anstieg, wobei die Daten der Kontur eines Hockeyschlägers ähneln [Mann, 2021].

Dies deckt sich ebenfalls mit den zuvor analysierten Daten von Berger et al., wo die heutigen gemessenen Temperaturen signifikant über den Warmzeiten der letzten 0,8 Millionen Jahre liegen [Berger et al., 2012]. Diese scharfen Anstiege lassen sich bei vielen verschiedenen Variablen feststellen, welche nicht zuletzt unter anderem an der Industrialisierung in den letzten 100 bis 150 Jahren liegen.

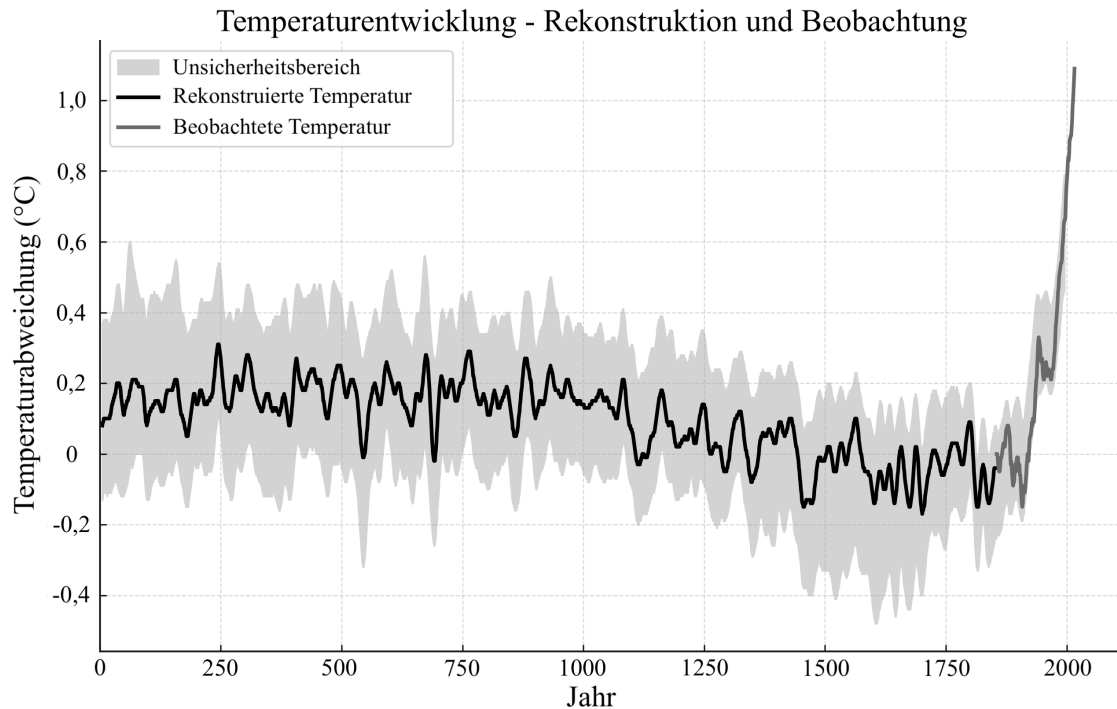


Abbildung 2.4: Rekonstruierte und beobachtete globale Temperaturentwicklung auf der Erde. Datenbasis [IPCC, 2001] und [Mann, 2021]

McNeill hat eine Liste an Wachstumsfaktoren zwischen den Jahren 1890 bis 1990 zusammengetragen, in der zu erkennen ist, dass sich in dieser Zeit z.B. die Weltbevölkerung vervierfacht, der Ausstoß industriell hergestellter Güter vervierzigfacht und die Wassernutzung verneunfacht haben (siehe Tab. 2.1) [McNeill, 2000].

Dabei sind die ersten Veränderungen dieser Daten ab dem 18. Jahrhundert messbar. Einige Wissenschaftler nehmen hier auch die Erfindung der Dampfmaschine um 1784 als Startpunkt an, was ebenfalls den Startpunkt der Industrialisierung beschreibt ab dem der Mensch, durch Maschinen unterstützt, in seine Umwelt eingreift und diese verändert [Benner et al., 2021]. Da sich die zuvor angesprochenen Änderungen so schnell und signifikant in den letzten 200 Jahren weiterentwickeln, spricht Nobelpreisträger Paul Crutzen vom neuen Anthropozänen Zeitalter, welches das Zeitalter beschreibt in dem der Mensch so massiv in alle Abläufe der Erde eingreift, dass er die treibende Kraft bei der Veränderung dieser ist [Crutzen und Stoermer, 2000]. Dabei handelt es sich aktuell noch um keinen offiziell gültigen Namen, dieser wurde allerdings mehrheitlich bei der „International Commission on Stratigraphy“,

## 2 Stand der Technik

Tabelle 2.1: Teilweiser Auszug der Wachstumsfaktoren von menschlichen Aktivitäten im 20. Jahrhundert, nach [McNeill, 2000]

| <b>Element</b>          | <b>Wachstumsfaktor<br/>zwischen 1890 - 1990</b> |
|-------------------------|-------------------------------------------------|
| Weltbevölkerung         | 4                                               |
| Urbane Weltbevölkerung  | 13                                              |
| Weltwirtschaft          | 14                                              |
| Industrielle Produktion | 40                                              |
| Energienutzung          | 16                                              |
| Kohleproduktion         | 7                                               |
| Kohlendioxidemission    | 17                                              |
| Schwefeloxidemission    | 13                                              |
| Bleiemission            | ~8                                              |
| Wassernutzung           | 9                                               |
| Meeresfischfang         | 35                                              |
| Viehbestand             | 4                                               |
| Schweinebestand         | 9                                               |
| Bewässerte Fläche       | 5                                               |
| Ackerland               | 2                                               |
| Waldgebiet              | 20 % Verlust                                    |

welche die offizielle Benennung der einzelnen Epochen verwaltet, verabschiedet und sollte 2024 umgesetzt werden, wozu es jedoch nicht kam [Subramanian, 2019].

Diese massiven Eingriffe in die Natur brachten auch einige negative Aspekte mit sich. So wie die neu auftretenden Ozonlöcher, welche in den 1970er Jahren das erste Mal wissenschaftlich festgestellt wurden [Molina und Rowland, 1974]. Dabei wurde entdeckt, dass industriell hergestellte und eingesetzte Fluorchlorkohlenwasserstoffe (FCKW) ( $CF_2Cl_2$  und  $CFCl_3$ ) in der Atmosphäre stark mit Ozon ( $O_3$ ) und Sauerstoff ( $O$ ) reagieren [Molina und Rowland, 1974]. Auch Crutzen kam zu dem gleichen Schluss, dass das FCKW das Ozon in der Atmosphäre bindet und es so zu Ozonlöchern kommt [Crutzen, 1974]. Außerdem stellten die Forscher fest, dass Ozonlöcher zu mehr ultravioletter Strahlung auf der Erde und somit zu mehr Erwärmung dieser führen, wobei die FCKW-Gase eine Verweildauer zwischen 40 und 150 Jahren in der Atmosphäre haben und die Effekte des FCKW erst nach 50 bis 100 Jahren vollständig wirken [Molina und Rowland, 1974, Crutzen, 1974]. Diese und weitere Arbeiten führten 1987 auf der UN-Konferenz in Montreal zum Brundtland-Bericht, in dem FCKW international als einer der Hauptverursacher für wachsende Ozon-

löcher verantwortlich gemacht wurde [WCED, 1987]. Die Industrie suchte danach nach Lösungen, das generelle Verbot für den Einsatz von FCKW-Gasen erfolgte in Deutschland um 1991 und weltweit ist der FCKW-Ausstieg seit 2010 umgesetzt, wobei mittlerweile die Erholung der Ozonschicht gemessen werden kann [BMUV, 2021].

Ein Jahr nach der UN-Konferenz in Montreal (1987) wurde das Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) (dt.: „Zwischenstaatlicher Ausschuss für Klimaänderungen“) gegründet, welcher bis heute die Hauptquelle für Daten zum Klimawandel ist und in etwa in einem Sechs-Jahres-Turnus einen neuen Bericht vorlegt [Berger et al., 2012]. Neben den dokumentierten Werten aus der Vergangenheit, werden hier auch mögliche Zukunftsszenarios und deren Eintrittswahrscheinlichkeit mit den errechneten Vertrauensniveaus vorgestellt [Pörtner et al., 2022]. Dabei wurden diverse Veränderungen von klimatischen Bedingungen durch menschlichen Einfluss ermittelt, wie in Tabelle 2.2 zu sehen.

Tabelle 2.2: Zuordnung der beobachteten Klimaveränderungen als Folge des menschlichen Einflusses, [Team et al., 2023]

| <b>Veränderung klimatischer Bedingungen</b>                   | <b>Eintrittswahrscheinlichkeit</b> |
|---------------------------------------------------------------|------------------------------------|
| Zunahme der landwirtschaftlichen und ökologischen Trockenheit | Mittleres Vertrauen                |
| Zunahme der Brandgefahr                                       | Mittleres Vertrauen                |
| Zunahme von Überschwemmungen                                  | Mittleres Vertrauen                |
| Zunahme von Starkniederschlägen                               | Wahrscheinlich                     |
| Gletscherrückgang                                             | Sehr wahrscheinlich                |
| Globaler Meeresspiegelanstieg                                 | Sehr wahrscheinlich                |
| Versauerung der oberen Ozeane                                 | Praktisch sicher                   |
| Zunahme extremer Hitzeperioden                                | Praktisch sicher                   |

Viele Berechnungen beinhalten die 1,5°C-Grenze, welche seit dem Pariser Klimaabkommen auf der UN Climate Change Conference (COP21) in Paris 2015 von den Vereinten Nationen verabschiedet worden ist [United Nations, 2016, United Nations, 2023]. Es handelt sich um eine Begrenzung des weltweit durchschnittlichen Temperaturanstiegs im Vergleich zur vorindustriellen Zeit. Über einen längeren wissenschaftlichen Diskurs wurde für die Erde als „Begrenzung“ 2°C ermittelt, wobei das Pariser Klimaabkommen diesen Wert auf 1,5°C verkleinert hat, da unklar ist was für Auswirkungen ein kurzfristiges Überschreiten dieser Zielwerte hat [Rockström

## 2 Stand der Technik

et al., 2009]. Diese Begrenzung des Temperaturanstiegs ist eine der von Rockström et al. definierten planetaren Grenzen. Laut Rockström et al. ist die globale mittlere Temperatur nur eine Auswirkung der CO<sub>2</sub>-Konzentration und des Strahlungsantriebs (eng.: radiative forcing), welche beide laut deren Daten schon 2009 nicht mehr innerhalb der ermittelten sicheren Grenzen lagen [Rockström et al., 2009]. Der Strahlungsantrieb beschreibt dabei die Netto-Strahlungsflussdichte am oberen Ende der Atmosphäre und drückt die Änderungen in Watt pro Quadratmeter aus [Rockström et al., 2009]. Zu den ermittelten Daten gehören beim Bericht des IPCC's sowie auch den „Planetary Boundaries“ von Rockström nicht nur CO<sub>2</sub> sowie die mittlere globale Temperatur, sondern viele weitere, wie z.B. Temperaturen innerhalb und oberhalb der Meere, arktische Sommereismenge, Schneemenge auf der nördlichen Halbkugel, Gletschermasse, Versauerung der Meere, Landnutzung sowie viele weitere [Rockström et al., 2009, Team et al., 2023].

Alle diese gemessenen Indikatorwerte sollen am Ende ein Verständnis für den voranschreitenden Klimawandel vermitteln. Dabei besteht die Schwierigkeit, nicht nur alle angesprochenen Daten auszuwerten, sondern diese auch miteinander zu verknüpfen. Rockström spricht hier von einer „delikatsten Balance“, unter der die einzelnen Einflussfaktoren miteinander in Beziehung stehen [Rockström et al., 2009]. So führt zum Beispiel der Temperaturanstieg in den Meeren zu einem großen Artensterben, gerade bei Korallenriffen. Es wird damit gerechnet, dass bei einem Temperaturanstieg von 2°C diese Riffe ca. 99 % ihrer Größe verlieren werden. Global gesehen wird die gesamte Biodiversität einen Artenrückgang von ca. 30 % verzeichnen. [UNEP, 2021]. Bei noch komplexeren Themen wie dem arktischen und auch dem tropischen Jetstream und deren Zusammenhang mit vermehrten Wetterextremen sowie länger andauernden Wetterlagen sind sich auch die daran forschenden Wissenschaftler noch nicht einig [Stendel et al., 2021]. Die alleinige Größe und Vielfalt des Klimasystems der Erde scheint dabei aktuell ein Problem zu sein, sämtliche mit dem Klimawandel in Verbindung stehende Elemente zu ermitteln und zu verknüpfen.

Bei den Daten des IPCC geht es nicht nur um Überschreitungen von Grenzwerten, sondern auch um die weltweite Verteilung der verbrauchten Ressourcen und ausgestoßenen Emissionen. Dabei fällt im Sinne der Drei Säulen der Nachhaltigkeit (siehe Kap. 2.1) auf, dass z.B. ehemals schlechter entwickelte Länder wie China oder Indien im Zeitraum von 1990 - 2016 einen signifikant steigenden CO<sub>2</sub>-Ausstoß verzeichneten, zu vergleichsweise sinkenden Emissionen in den USA und der Europäischen

## *2.3 Rechtliche und regulatorische Bedingungen für nachhaltige Produkte*

Union [Le Quéré et al., 2016]. Gerade China ist z.B. in diesem Zeitraum von ca. 0,5 auf fast 3 Gigatonnen Kohlenstoffdioxidausstoß pro Jahr gekommen, in der gleichen Zeit lagen die USA und die EU (Europäische Union) gemeinsam bei einem Wert von 3 - 2,5 Gigatonnen ausgestoßenem Kohlenstoffdioxid mit einer fallenden Tendenz [Le Quéré et al., 2016]. Im Sinne der sozialen Nachhaltigkeit muss auch allen weiteren sich entwickelnden Ländern die Chance gegeben werden, einen vergleichbaren Betrag an Emissionen auszustoßen, um sich auf ein vergleichbares Niveau zu entwickeln. Es liegt dabei aber auf der Hand, dass die Klimaziele so schwierig zu erreichen sind, gerade in den zeitnah gesteckten Pariser Klimazielen bis 2025 bzw. 2030 [United Nations, 2016]. Diese Verteilung gilt nicht nur zwischen einzelnen Ländern sondern ebenso stark zwischen armen und reichen Personen weltweit. Dabei emittieren die reichsten 10 % der Weltbevölkerung 49 % des global ausgestoßenen CO<sub>2</sub> und die ärmsten 50 % emittieren nur 10 % des global ausgestoßenen CO<sub>2</sub> [King, 2015].

## **2.3 Rechtliche und regulatorische Bedingungen für nachhaltige Produkte**

Die zuvor beschriebenen Herausforderungen für das Erreichen der Klimaziele, bilden die Motivation für Politik und verschiedene Verbände, Vorgaben zu formulieren. Im Folgenden werden daher die aktuellen gesetzlichen Grundlagen sowie die aktuelle Normung beschrieben.

### **2.3.1 Gesetzliche Grundlagen**

Durch die zuvor angesprochenen Punkte der Drei Säulen der Nachhaltigkeit (Kap. 2.1) sowie dem umfassenden Thema des Klimawandels (Kap. 2.2), ist in den letzten Jahren bzw. Jahrzehnten weltweit der Handlungsbedarf in diesen Themenfeldern gestiegen. Sowohl global als auch lokal werden durch Gesetzgeber Handlungsspielräume definiert, die eine Entwicklung hin zu einer nachhaltigeren Wirtschaft bzw. nachhaltigeren Lebensweisen begünstigen. In diesem Kapitel sollen einige dieser gesetzlichen Grundlagen, gerade im europäischen Raum aufgezeigt werden.

### **Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG**

Innerhalb der EU, nicht zuletzt auch durch die zuvor diskutierten WCED-Konferenzen, die oftmals in Europa stattfanden, gibt es daher in der Region ein starkes Bestreben, die Handlungen aller Akteure wie Verbraucher, Hersteller aber auch Importeure bzw. Inverkehrbringer, nach dem heutigen Verständnis von Nachhaltigkeit entsprechend, zu steuern. Dabei gibt es mittlerweile ein großes Instrumentarium an Gesetzen und Richtlinien, die viele Bereiche des Lebens, Arbeitens und Konsumierens in der Europäischen Union reglementieren [Alt, 2018]. Mit der Richtlinie über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (eng.: „Waste Electrical and Electronic Equipment“ (WEEE)) hat die EU 2012 eine zentrale Richtlinie für den Umgang mit Elektroschrott verabschiedet [European Union, 2012]. Diese Richtlinie wurde 2015 in Deutschland im „Gesetz über das Inverkehrbringen, die Rücknahme und die umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- und Elektronikgeräten (Elektro- und Elektronikgerätegesetz - ElektroG)“ landesspezifisch umgesetzt [Bundesregierung, 2015]. Dabei wurde in §4 Abs. 2 (1) auch schon die Produktkonzeption nach nachhaltigkeitspezifischen Merkmalen reglementiert. Hersteller haben ihre Produkte so zu gestalten, dass eine Wiederverwendung, wie auch die Demontage oder sortenreine Verwertung erleichtert wird. Speziell Batterien bzw. Akkumulatoren sollen so verbaut sein, dass diese „problemlos und zerstörungsfrei“ entnommen und ausgetauscht werden können [Bundesregierung, 2015]. In Abs. 2 §4 (2) wird noch einmal allgemein definiert, dass Produkte so konstruiert werden sollen, dass die Wiederverwendung dieser bzw. von Teilen der Produkte nicht behindert wird, es sei denn es gibt dafür Gründe wie Gesundheits-, Umwelt- oder Sicherheitsvorschriften. Ebenfalls wird in Abs. 5 §28 schon auf die Bereitstellung von Informationen zur gezielten Wiederverwendung und sortenreinen Trennung eingegangen, diese Informationen müssen von den Inverkehrbringern bzw. Herstellern unaufgefordert in schriftlicher Form vorgelegt werden [Bundesregierung, 2015].

### **Ökodesignrichtlinie**

Eine weitere Richtlinie der EU mit vielen Änderungen und einer langen Historie ist die sog. „Ökodesignrichtlinie“, namentlich Richtlinie 2009/125/EG welche ebenfalls Anforderungen für die umweltgerechte Konstruktion von Produkten definiert. Die Ökodesignrichtlinie ist verpflichtend für jeden Inverkehrbringer von energiever-

### *2.3 Rechtliche und regulatorische Bedingungen für nachhaltige Produkte*

brauchsrelevanten Produkten, die bestimmte Kriterien wie z.B. Verkaufsvolumen innerhalb der EU sowie eine nach Beschluss Nr. 1600/2002/EG erhebliche Umweltauswirkung erfüllen. Sie ist ebenfalls ein Bestandteil der zu erfüllenden Kriterien für die CE-Kennzeichnung [European Union, 2009]. Die Grundlagen einer LCA sind im Anhang Bestandteil der Ökodesignrichtlinie. So sollen laut Teil 1 von Anhang 1 in den verschiedenen Lebensphasen des Produktes viele umweltrelevante Parameter abgeschätzt werden. Diese sind z.B. verbrauchtes Material, Energie oder auch Rohstoffe wie Wasser, ebenso wie Emissionen aus den Produkten und einzelnen Phasen sowie schlussendlich auch „Möglichkeiten der Wiederverwendung“, wie auch Recycling- und Verwertungsrouten [European Union, 2009]. Somit müssen sich Hersteller bzw. Inverkehrbringer sowohl in der Produktentwicklungs- als auch in der Nutzungsphase damit befassen, ihr Produkt entsprechend der Richtlinien zu gestalten und die geforderten Informationen bereitzustellen. Dieses Vorgehen wird im Anhang der Richtlinie weiter konkretisiert, so werden Indikatoren für die Wiederverwendbarkeit und Rezyklierbarkeit genannt, wie z.B. „Zahl der verwendeten Materialien und Bauteile, Verwendung von Normteilen, Zeitaufwand für das Zerlegen, Komplexität der zum Zerlegen benötigten Werkzeuge“ und viele weitere [European Union, 2009]. In Teil 3 des Anhang 1 werden die Hersteller nochmals konkret angewiesen, ein ökologisches Profil des Produktes anhand einer Lebenszyklusanalyse zu erstellen und mit diesen Informationen die Umweltverträglichkeit des Produktes zu bewerten und zu verbessern.

Die Richtlinie wurde in ihrem zeitlichen Verlauf noch weiter angepasst, die aktuellste Anpassung ist 2019 beschlossen worden und bringt einige Änderungen was die Richtlinien für spezifische Produkte und deren Handhabung angeht [European Commission, 2019]. Dabei handelt es sich wiederum um untergeordnete Durchführungsverordnungen für das Ökodesign und die Änderungen betreffen Energieeffizienz sowie andere Anforderungen. Die Produkte kommen größtenteils aus dem Bereich Weißwaren sowie weiteren, z.B. Displays (Fernseher), Elektromotoren oder auch Lichtquellen. Die weiteren Neuerungen der Richtlinie 2009/125/EG von 2019 betreffen explizit die Reparierbarkeit und Haltbarkeit der angesprochenen Produkte. Hier werden Voraussetzungen für eine erfolgreiche Reparatur reglementiert, wie z.B. die Ersatzteilverfügbarkeit, Lieferfristen und Preise sowie auch die Bereitstellung von Anleitungen, um die Reparaturen durchzuführen.

Es ist auffällig, dass sowohl beim ElektroG als auch der Ökodesignrichtlinie jeweils

## *2 Stand der Technik*

konkrete Handlungsempfehlungen für das Design umweltfreundlicher Produkte verfasst werden. Dieser Zustand verdeutlicht die weitreichenden Eingriffe des Gesetzgebers in zentrale Prozesse von Herstellern sowie auch Verbrauchern. Waren die zuvor vorgestellten Richtlinien bzw. Gesetze noch recht spezifisch und betrafen nur einzelne Produktgruppen, sind neuere (teilweise noch nicht verabschiedete) Entwürfe dieser deutlich umfassender und weitreichender.

### **Maßnahmenpaket zur Kreislaufwirtschaft**

Im Jahr 2015 wurde ein weiteres Maßnahmenpaket zur Kreislaufwirtschaft veröffentlicht bei dem gleichzeitig umfangreiche Finanzierungsangebote der EU im Rahmen von Horizont 2020 herausgegeben wurden, hier 650 Mio. € für Horizont 2020 und 5,5 Mrd. € für Strukturfonds [European Commission, 2015]. Neben diesen Finanzierungsanreizen für eine kreislauffähigere Wirtschaft wurden außerdem neue Maßnahmen und Legislativvorschläge erarbeitet. Dabei gibt es neue Maßnahmen gegen Lebensmittelverschwendung sowie auch für die Verbesserung der Kreislauffähigkeit von Kunststoffen und die Reduktion von Abfällen, die auf Deponien enden [European Commission, 2015]. Die Abfälle sollen mit neuen Legislativvorschlägen ebenfalls reglementiert werden. So werden gemeinsame EU-Zielvorgaben für das Recycling von Siedlungs- und Verpackungsabfällen wie auch die Beschränkung der Deponierung von Abfällen schrittweise erhöht, mit neuen höheren Zielen bis 2030 [European Commission, 2015]. Neben den genannten Maßnahmen gibt es ein Ökodesign-Arbeitsprogramm, in dem bis 2017 neue Maßnahmen für die Kreislauffähigkeit von Produkten erarbeitet werden sollten, die sich an das ElektroG sowie die Ökodesignrichtlinie anlehnen, aber über diese hinausgehen. Bei dem Maßnahmenpaket von 2015 ist ein ganzheitlicherer Ansatz als bei den zuvor vorgestellten Richtlinien und Gesetzen festzustellen.

### **Verordnung zur Verwirklichung der Klimaneutralität**

Im Jahr 2021 wurde von der EU die „Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates“ verabschiedet. Diese Verordnung soll noch einmal für alle Mitgliedsstaaten der EU die Verwirklichung der Klimaneutralität bewirken und ist daher auch ein in großen Teilen selbst auferlegtes Gesetz. Untergeordnet werden die Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimages-

### *2.3 Rechtliche und regulatorische Bedingungen für nachhaltige Produkte*

etz“) geändert. Dabei ist ein großes neu ausgerufenes Ziel die Einhaltung des Pariser Klimaabkommens, da aktuelle Studien zeigen, dass dieses verfehlt wird [Team et al., 2023]. Die Verordnung (EU) 2021/1119 ist in ihrem Zweck allgemeiner formuliert, so wird hier darauf eingegangen, dass die ausgestoßenen Treibhausgase zwischen 1990 und 2019 bei einer steigenden Wirtschaftsleistung rückläufig sind. Da die Reduktionen allerdings nicht ausreichen, um das Pariser Klimaabkommen zu erfüllen, müssen diese weiter intensiviert werden. Dabei wird innerhalb der Verordnung mehrfach auf die Vielzahl an schon erfolgten Maßnahmen bzw. Verordnungen eingegangen. Die Richtlinie 2003/87/EG ist z.B. der Grundstein für das EU-Emissionshandelssystem [Europäisches Parlament, 2021]. Die Verordnung (EU) 2018/842 setzt nationale Ziele für die Reduzierung der Treibhausgase und die Verordnung 2018/841 verpflichtet die Mitgliedsstaaten wiederum, ausgestoßene Treibhausgasemissionen bestimmter Bereiche auszugleichen [Europäisches Parlament, 2021]. Diesen weitreichenden Zielen, die durch verschiedene hier vorgestellte Verordnungen realisiert werden sollen, stehen ebenso große Emissionsreduktionen gegenüber. Durch die Kommission der Verordnung (EU) 2018/841 wurde abgeschätzt, dass die Einhaltung der gemachten Verordnungen bis zum Jahr 2030 „zu einer Netto-Kohlenstoffsenke von 225 Mio. Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent“ führt [Europäisches Parlament, 2021]. Für die Überprüfung der Verwirklichung der ausgesprochenen Ziele bewertet eine Kommission die Fortschritte der einzelnen Länder, dabei wird ein Bericht der durchgeführten Bewertung alle fünf Jahre vorgelegt. Weiterhin heißt es in Absatz (36) der Verordnung (EU) 2021/1119 „[s]ollten die kollektiven Fortschritte der Mitgliedsstaaten [...] unzureichend sein, [...] so sollte die Kommissionen die erforderlichen Maßnahmen im Einklang mit den Verträgen ergreifen“. Die Verordnung soll dabei das verbindliche Ziel der Einhaltung des Übereinkommens von Paris vorgeben, ohne weiter zu spezifizieren, wie dieses Ziel erreicht werden kann oder soll. Dabei wird das verbindliche Ziel genau vorgegeben. Dieses entspricht einer Reduktion der Nettotreibhausgasemissionen innerhalb der EU von mindestens 55 % im Vergleich zum Stand von 1990 [Europäisches Parlament, 2021].

### **Ökodesign-Richtlinie für nachhaltige Produkte**

Der Trend eher universell angelegter Verordnungen führt sich auch bei schon bestehenden fort. Dabei sind bei einigen Verordnungen umfangreiche Änderungen geplant,

## 2 Stand der Technik

wie z.B. bei der zuvor beschriebenen Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG. Diese liegt seit 2022 als Vorschlag für eine neue Ökodesign-Richtlinie vor, wobei ihr Name voraussichtlich geändert wird in „Ökodesign-Richtlinie für nachhaltige Produkte“ (eng.: Ecodesign for Sustainable Products Regulation (ESPR)) [European Commission, 2022]. Die Überarbeitung der Ökodesign-Richtlinie soll dabei im Einklang mit den Zielen der zuvor beschriebenen Verordnung (EU) 2021/1119 sein [European Commission, 2022]. In Absatz (7) der vorgeschlagenen Verordnung wird weiter das Paket „Fit for 55“ genannt. Aus diesem Paket ergibt sich für die Energieeffizienz der Produkte, die unter die geplante Ökodesign-Richtlinie fallen, eine Verbesserung der Energieeffizienz um ca. 36 % des Energieverbrauchs zum Zeitpunkt der Erstellung des Vorschlags. So soll der Energiefußabdruck von relevanten Produkten, die in ihrer Nutzungsphase Energie verbrauchen, maßgeblich gesenkt werden. Ein Novum der vorgeschlagenen Richtlinie ist der teilweise Wegfall der spezifischen Gruppen, für die die Richtlinie gilt. Die vorgeschlagenen Ökodesign-Anforderungen richten sich an alle physischen Waren, mit Ausnahme von Lebens- oder Futtermitteln, Arzneien oder lebenden Pflanzen, Tieren und Mikroorganismen die für die Reproduktion bestimmt sind [European Commission, 2022]. Durch diese Neuerung sind jetzt auch explizit Produkte betroffen, die in ihrer Nutzungsphase keine Energie verbrauchen. Produktgruppen der Verordnung, die sich aktuell noch in Kraft befindet, finden im Vorschlag auch weiterhin eine Verwendung, hier jetzt mit Merkmalen, die für die spezifischen Produktgruppen gelten sollen. Es wird von „horizontale[n] Ökodesign-Anforderungen“ gesprochen, die so technische Ähnlichkeiten innerhalb verschiedener Produktgruppen vereinnahmen sollen, sofern hier eine Verbesserung der Nachhaltigkeit mit einhergeht [European Commission, 2022]. Ferner sollen diese Merkmale als Leistungsanforderungen an die Produkte definiert werden, bei denen eine Leistungsverbesserung für das jeweilige Merkmal zu erwarten ist. Diese dürfen sich allerdings nicht gegen die Gewährleistung der Primärfunktion des Produktes wenden. Die Informationspflicht von Herstellern über den Umweltfußabdruck ihrer Produkte wird ebenfalls auf „relevante Produktparameter“ ausgeweitet, die mit der neuen Verordnung bereitgestellt werden müssen [European Commission, 2022]. Um die verfügbaren Informationen zentral und auch vergleichbar zur Verfügung zu stellen, wird in dem neu erarbeiteten Vorschlag erstmals auch ein Produktpass eingefordert. Dieser soll Informationen für alle betroffenen Zulieferer, Hersteller sowie auch Verbraucher und Gesetzgeber bereitstellen und die Rückverfolgbarkeit der

### *2.3 Rechtliche und regulatorische Bedingungen für nachhaltige Produkte*

Produkte erheblich verbessern [European Commission, 2022]. Dabei ist das Ziel der Kommission, nicht die klassische Anleitung bzw. Handbücher zu ersetzen, sondern diese noch weiter mit (Reparatur-)Informationen zu ergänzen, welche dann Verbrauchern sowie Reparaturbetrieben helfen. Im Produktpass sollen ebenfalls explizit Nachhaltigkeitsaspekte für das Produkt herausgestellt werden, ausgewählt für die jeweilige Produktgruppe [European Commission, 2022]. Die Anforderungen, die zum Teil in den geplanten Produktpass einfließen sollen, sind in Artikel 1 und 5 beschrieben und umfassen viele Nachhaltigkeitsaspekte, wie z.B. Haltbarkeit, Zuverlässigkeit, Wiederverwendbarkeit, Möglichkeit der Wiederaufbereitung und des Recyclings [European Commission, 2022]. Wie zuvor schon angesprochen, soll sich der neue Vorschlag der Ökodesignrichtlinie künftig auch an Produkte ohne Stromverbrauch in der Nutzungsphase richten. So sollen hier z.B. auch die Vernichtung von Rückläuferprodukten und Überproduktion aus dem Textil- und Schuhbereich reglementiert und verboten werden [European Commission, 2022]. Bei den genannten Merkmalen des Vorschlags der Ökodesignrichtlinie ist ebenfalls ein Trend hin zu umfassenderen Reglementierungen zu erkennen, in dem Versuch eine ganzheitliche Nachhaltigkeitsstrategie zu verwirklichen.

#### **Abfallrichtlinie**

Der zuletzt angesprochene Bereich der Abfälle sowie Rückläufer und Überproduktionen aus der Textilindustrie wird im Vorschlag für die Neufassung der Richtlinie 2008/98/EC für Abfälle ebenfalls stark überarbeitet und neu geregelt. Diese Gesetzesgrundlage ist auch unter dem englischen Namen „waste framework directive“ oder im Deutschen als Abfallrichtlinie bekannt. Ein Grund für die Überarbeitung ist, dass laut Joint Research Centre im Jahr 2019 etwa 12,6 Megatonnen Textilabfälle innerhalb der EU generiert wurden, von denen wiederum ca. 78 % in den normalen Hausmüll gelangen und nicht separat gesammelt und sortiert werden [European Commission, 2023a]. Als Maßnahme gegen die Mengen an Müll soll deshalb ab dem 01. Januar 2025 in allen EU-Ländern die separate Sammlung von Altkleidern verpflichtend sein [European Commission, 2023c]. Die gesammelten Textilien sollen dabei laut Article 22d (1.) in Wiederbenutzung, Vorbereitung zur Wiederbenutzung und Recycling sortiert werden. In dem neuen Vorschlag werden ebenfalls weitere EU-Maßnahmen genannt, welche die Zirkularität von Textilien erhöhen sol-

## 2 Stand der Technik

len, wie z.B. der „Circular Economy Action Plan“ (CEAP) sowie die „Textilstrategie“ der EU für nachhaltige und zirkuläre Textilien, ebenso findet sich der Verweis auf die zuvor beschriebene Neufassung der Ökodesignrichtlinie in der neue Ökodesignanforderungen an Textilien gestellt werden [European Commission, 2023c]. Wie auch in der vorgeschlagenen Ökodesignrichtlinie werden die Hersteller von Textilien in der neuen Abfallrichtlinie dazu verpflichtet, diverse Informationen zu übermitteln. Die bereitgestellten Informationen sind dabei zum einen angelehnt an die in der Ökodesignrichtlinie verfassten, zum anderen kommen noch Informationen zu Müllvermeidung, nachhaltigem Konsumverhalten und auch Wiederbenutzungs- sowie Reparaturmöglichkeiten dazu, durch die Endverbraucher dazu gebracht werden sollen, die erworbenen Textilien länger zirkulär zu nutzen [European Commission, 2023c]. Auch bei diesem Vorschlag für die Neufassung einer Richtlinie ist eine ganzheitlichere Ausrichtung dieser zu erkennen, bei der genannte Probleme umfassender gelöst werden sollen.

### European Green Deal

Als aktuelle große und umfassende Anstrengung der Europäischen Union kann noch der „European Green Deal“ genannt werden, der wiederum die Vorschläge aus dem „Fit For 55“ Paket beinhaltet. Die einzelnen Bausteine des Vorhabens sind in Abbildung 2.5 zu sehen. Mit diesem Maßnahmenbündel soll bis zum Jahr 2030 eine Treibhausgasreduktion um mindestens 55 %, verglichen zum jetzigen Stand, erreicht werden [European Union, 2023]. Für das Erreichen des gesteckten Ziels werden z.B. Maßnahmen wie ein EU-weites Emissionshandelssystem, welches für verschiedenste Sektoren wie Verkehr, See- und Flugverkehr und auch Gebäude gelten soll [Europäischer Rat, 2023]. Um diese Kosten für Bewohner der EU fairer zu gestalten, ist ein Klima-Sozialfonds sowie ein CO<sub>2</sub>-Grenzausgleichssystem an der EU-Außengrenze geplant [Europäischer Rat, 2023]. Weiter werden die Sektoren wie Energie, Industrie, Verkehr und Gebäude ebenfalls mit Maßnahmen zur Effizienzsteigerung bzw. Wandel hin zu grünen Energien belegt. Aus diesen Maßnahmen ergeben sich wiederum Gesetze für die einzelnen EU-Mitgliedsstaaten.

Abschließend kann festgehalten werden, dass Gesetzgeber der Europäischen Union sowie der einzelnen Länder in den letzten Jahrzehnten die Strategie geändert haben, angefangen von einzelnen konzentrierten Aktionen, hin zu immer umfassenderen

## 2.3 Rechtliche und regulatorische Bedingungen für nachhaltige Produkte



Abbildung 2.5: Einzelne Bausteine des Maßnahmenplans des „European Green Deal’s“. Eigene Darstellung in Anlehnung an [European Union, 2021]

Maßnahmenplänen, die weitreichende Eingriffe und Folgen mit sich ziehen. Somit ist zu erwarten, dass sowohl für Hersteller als auch Verbraucher in den kommenden Jahren mehr Gesetze bzw. Auflagen zu erwarten sind, die eingehalten werden müssen.

### 2.3.2 Normen

Neben neuen Gesetzen und Richtlinien, die auf Länder- bzw. Europaebene verabschiedet werden, gibt es gerade für Hersteller verschiedene Normen und Richtlinien, die eingehalten werden sollten, da diese den Stand der Technik darstellen. Die in diesem Kapitel aufgeführten Normen sind allesamt DIN EN ISO Normen, das heißt es sind international von der „International Organization for Standardization (ISO)“ verfasste Normen, welche wiederum in Europa als „Europäische Norm (EN)“ sowie

## 2 *Stand der Technik*

auch als Deutsche Norm (Deutsches Institut für Normung (DIN)) gelten und übernommen wurden [DIN e.V. et al., 2001].

### **DIN EN ISO 14001**

Die erste hier genannte Norm ist die DIN EN ISO 14001:2015-11, welche Anforderungen und Anleitungen zur Anwendung von Umweltmanagementsystemen beschreibt. Ziel der Norm ist es, einen „systemischen Ansatz beim Umweltmanagement“ zu bieten, der es einem Unternehmen ermöglicht, sich strategisch nachhaltig auszurichten [DIN e. V., 2015]. Dabei bildet die Grundlage ein „Plan-Do-Check-Act (PDCA)“ Zyklus für das Umweltmanagementsystem [DIN e. V., 2015]. Unternehmen, welche Konformität für die DIN EN ISO 14001:2015-11 erreichen möchten, haben dafür verschiedene Möglichkeiten, wie z.B. die Durchführung einer Selbstbewertung oder das Erlangen der Bestätigung der Konformität durch eine externe Partei, Sachverständige oder Organisationen [DIN e. V., 2015]. Die Ziele, die durch die Umsetzung der Norm im Unternehmen erreicht werden sollen, sind dabei eher generisch formuliert. Es wird z.B. die „Verbesserung der Umweltleistung“ oder das „Erreichen von Umweltzielen“ genannt, welche für die Organisation selbst, Teile von dieser aber auch für einzelne Produkte oder Dienstleistungen gelten kann [DIN e. V., 2015]. Für das Erreichen der Ziele werden Anforderungen definiert. Um überhaupt Anforderungen aus dem Nachhaltigkeitsbereich definieren zu können, werden einzelne Umweltaspekte festgelegt, welche von der Organisation, den Produkten oder Dienstleistungen dann ermittelt und ausgewertet werden [DIN e. V., 2015]. Diese Ziele bzw. Umweltziele und Anforderungen sollen mess- und überwachbar sein sowie aktuell und im Einklang mit der Umweltpolitik stehen, was ebenfalls für die vom Unternehmen erreichte Umweltleistung gilt. Neben dem Messen und Erreichen von Zielen und Leistungen ist auch die Kommunikation darüber, sowohl intern im Unternehmen als auch extern zu Partnern, Lieferanten und Organisationen wichtig, inklusive interner Audits [DIN e. V., 2015]. In der Norm wird nicht weiter kommuniziert, was der Inhalt der beschriebenen Merkmale im Detail sein soll, sie ist nur als Leitlinie bzw. Richtungsweiser zu verstehen, der ein Unternehmen oder ein Teil davon hin zu einem funktionierenden Umweltmanagement führen soll. Im Anhang der Norm werden noch beispielhafte Umweltaspekte genannt, die berücksichtigt werden können, wie z.B. Emissionen in die Atmosphäre, Verunreinigungen von Böden, Verbrauch

### 2.3 Rechtliche und regulatorische Bedingungen für nachhaltige Produkte

von Rohstoffen und natürlichen Ressourcen, Energieverbrauch und weitere [DIN e. V., 2015]. In der Norm wird ebenfalls noch erwähnt, dass für die zu ermittelnden Umweltaspekte keine komplette Ökobilanz erstellt werden muss.

#### DIN EN ISO 14040

Eine Ökobilanz ist nach DIN EN ISO 14040:2021-02 eine ausführliche und unter technischen Gesichtspunkten erstellte Analyse eines Lebenswegs eines gewählten Produktes. Dabei können ggf. unterschiedliche Sichtweisen bzw. auch Start- und Endpunkte dieses Lebenswegs definiert werden, wobei der Lebensweg wiederum aus einzelnen Schritten besteht, beginnend mit der „Rohstoffgewinnung und -erzeugung über die Energieerzeugung und Materialherstellung bis zur Anwendung, Abfallbehandlung und endgültigen Beseitigung“ [DIN e. V., 2021a]. Die DIN EN ISO 14040 beschreibt die Vorgehensweise zur Erstellung einer Ökobilanz. Die Ökobilanz wird

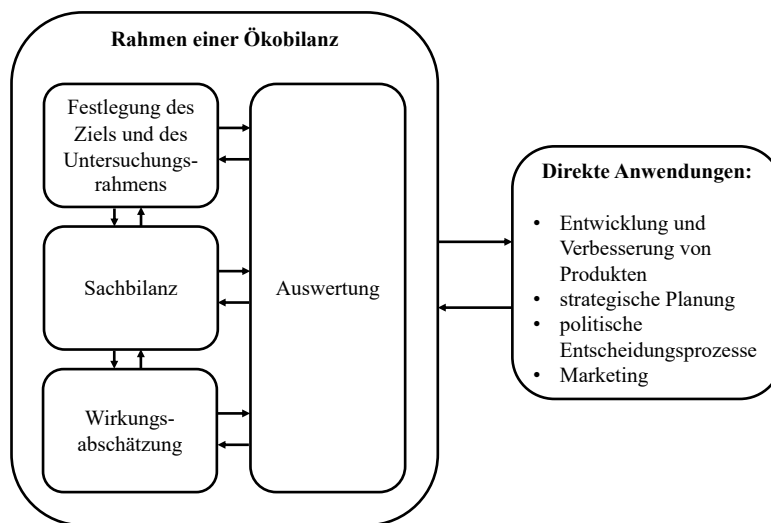


Abbildung 2.6: Phasen einer Ökobilanz. Eigene Darstellung in Anlehnung an [DIN e. V., 2021a]

dabei in verschiedene Phasen unterteilt, die jeweils in einer Auswertung enden, aber durch die einzelnen Auswertungen auch untereinander in Wechselwirkung treten können. Die dabei auftretenden Phasen, wie in Abb. 2.6 gezeigt, sind die „Festle-

## *2 Stand der Technik*

gung des Ziels und des Untersuchungsrahmens“ sowie die Sachbilanz und die Wirkungsabschätzung. Aus der gemeinsamen Auswertung der Phasen lassen sich dann wiederum direkte Anwendungen ableiten wie z.B. die „Entwicklung und Verbesserung von Produkten“ oder die strategische Planung und Entscheidungsfindung [DIN e. V., 2021a]. Mithilfe der definierten Phasen sollen durch die Methodik der Ökobilanz systematisch Umweltaspekte und -wirkungen der einzelnen Lebensabschnitte abgeschätzt werden. Ähnlich wie in der zuvor beschriebenen DIN EN ISO 14001 werden in der DIN EN ISO 14040 die grundsätzlichen Eigenschaften einer Ökobilanz auch eher generisch beschrieben. So ist z.B. der Detaillierungsgrad abhängig von Ziel- und Untersuchungsrahmen, wobei die im speziellen angewandten Methoden zur Erstellung einer Ökobilanz nach den Bedürfnissen des Unternehmens auszuwählen sind. Dabei können Umweltwirkungen nur potentiell und nicht absolut vorausgesagt werden [DIN e. V., 2021a]. Das Vorgehen für die Erstellung der Auswertung soll systematisch und iterativ erfolgen. Mithilfe der Wirkungsabschätzung, die am Ende der Methode steht, können den Sachbilanzen einzelne Wirkungskategorien zugeordnet werden und so Verknüpfungen der einzelnen Phasen realisiert werden, wodurch wiederum eine umfassende Aussage für die Ökobilanz möglich ist [DIN e. V., 2021a]. Ein Produkt wird in der Norm definiert als eine Einheit oder auch ein System, welches „eine oder mehrere definierte Funktion(en) ausführt“, wobei ein Produktsystem durch seine Funktion und nicht durch das Endprodukt definiert wird [DIN e. V., 2021a]. Diese Produktsysteme können wiederum in Prozessmodule unterteilt werden, welche dann durch Prozessflüsse mit anderen Produktsystemen oder Teilbereichen verbunden sind. Es ist darauf zu achten, dass am Anfang einer Ökobilanzierung der Untersuchungsrahmen klar definiert wird, also z.B. die Systemgrenzen, Funktionen und funktionelle Einheit, Annahmen und Einschränkungen [DIN e. V., 2021a]. Bei den einzelnen Phasen der Ökobilanz wird die Wirkungsabschätzung noch genauer definiert. Die Auswahl von Wirkungskategorien bzw. -indikatoren ist dabei der erste festgesetzte Schritt. Darauf folgen die Klassifizierung, bei der einzelne Sachbilanzergebnisse den Wirkungsindikatoren zugeordnet werden, gefolgt von der Charakterisierung, bei der Werte für die Indikatoren ausgerechnet werden [DIN e. V., 2021a]. Normierung, Ordnung und Gewichtung stellen optionale Bestandteile der Wirkungsabschätzung dar. In einem iterativen Verfahren gelangt man so nach der Durchführung der drei Phasen zu gesammelten Ergebnissen. Je nach Rahmen der Ökobilanz können Ergebnisse aus allen drei Phasen oder nur Teile davon benutzt

### *2.3 Rechtliche und regulatorische Bedingungen für nachhaltige Produkte*

und in Zusammenhang gebracht werden. Werden alle drei Phasen in der Ökobilanz behandelt und soll der Bericht an Dritte weitergegeben werden, so gelten bestimmte Anforderungen an den Bericht, wie etwa die Beziehung der einzelnen Ergebnisse, die Datenqualität, die Auswahl von Wirkungskategorien und weitere [DIN e. V., 2021a].

#### **DIN EN ISO 14044**

Ergänzend zu der DIN EN ISO 14040 gibt es ebenfalls die DIN EN ISO 14044 mit dem Titel „Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen“ als ergänzendes Dokument [DIN e. V., 2021b]. In dieser Norm werden Inputs für die Ökobilanz genauer beschrieben, z.B. Ressourcen wie Wasser, Biomasse oder Erze, Dienstleistungen wie der Transport oder die Energieversorgung, Betriebsstoffe wie Schmier- oder Düngemittel, aber auch Emissionen wie Kohlendioxid, Stickstoffoxid und weitere [DIN e. V., 2021b]. Diese Daten bzw. Inputs werden in vier Hauptgruppen zusammengefasst und kategorisiert. Es wird umfassend darauf eingegangen, wie diese Daten erhoben und in Sachbilanzen angewendet werden sollen, wobei die angewendeten Berechnungsverfahren in der Sachbilanz alle vollständig dokumentiert und auf gleiche Weise durchgeführt werden müssen [DIN e. V., 2021b]. Die Daten und Inputs werden dabei in ihre Grundbestandteile zerlegt, so soll z.B. bei der Bereitstellung vom Strom dieser in seine Zusammensetzung zerlegt werden, um die Wirkungsgrade verschiedener Energieträger mit in die Sachbilanz einbeziehen zu können [DIN e. V., 2021b]. Das Zerlegen der Inputs und die Zuweisung zu bestimmten Prozessen und Wirkungskategorien wird in der Norm im Kapitel „4.3.4.2 Allokationsverfahren“ genauer beschrieben. Die Allokation beschreibt in diesem Kontext die gemeinsame Nutzung eines Prozesses in verschiedenen Produktsystemen, wobei diese Allokation so weit es geht zu vermeiden ist, da diese zu Fehlern in der Berechnung anderer Produktsysteme führen kann, wenn die Allokation nicht konsequent angewendet wird. Prozesse sollten dabei soweit zerlegt werden, dass diese nur noch einem Produktsystem zugeordnet werden können [DIN e. V., 2021b]. Weiter wird in dem Kapitel auf Unterkategorien der Allokationsverfahren eingegangen, wie auf die Lösungen Wiederverwertung und Recycling. Dabei ist besonders bei Verwertungsverfahren zu beachten, welche Produktsysteme beteiligt sind und inwiefern z.B. durch einen Wechsel des Anwendungsfalls vom recycelten Input eine Allokation benötigt wird [DIN e. V., 2021b]. Nach der Sachbilanz erfolgt wie in Abb. 2.6 zu se-

## 2 Stand der Technik

hen die Wirkungsabschätzung, welche in der DIN EN ISO 14044 ebenfalls im Detail beschrieben wird. Die Wirkungsabschätzung besteht mindestens aus drei verbindlichen Bestandteilen, der „Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen“, der Zuordnung der Ergebnisse der Sachbilanzen zu ausgewählten Wirkungskategorien und der Berechnung von Wirkungsindikatorwerten [DIN e. V., 2021b]. Dabei wird die zweite Phase auch Klassifizierung und die dritte Charakterisierung genannt [DIN e. V., 2021b]. Für eine komplette Wir-

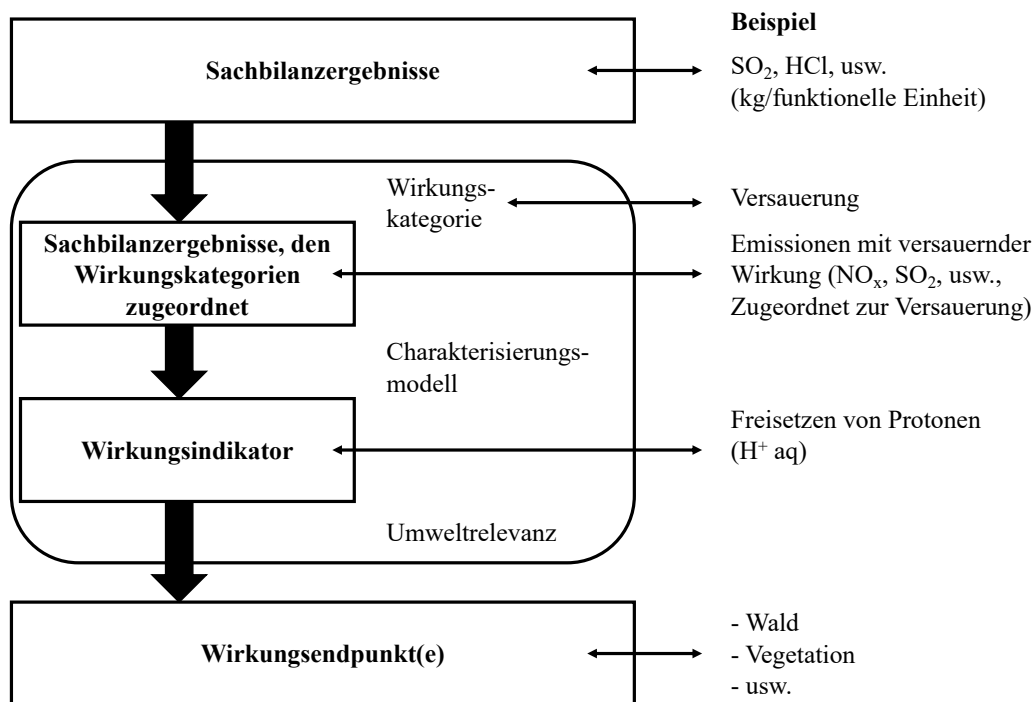


Abbildung 2.7: Konzept der Wirkungsindikatoren. Eigene Darstellung in Anlehnung an [DIN e. V., 2021b]

kungsabschätzung muss ebenfalls ein Wirkungsendpunkt definiert werden. So ergibt sich ein Konzept, wie in Abbildung 2.7 zu sehen, bei dem Sachbilanzergebnisse, also Inputs, einzelnen Wirkungskategorien zugeordnet und charakterisiert werden können und durch die Wirkungsindikatoren die Umweltrelevanz für einen bestimmten Wirkungsendpunkt bestimmt werden kann [DIN e. V., 2021b]. Für alle zuvor genannten Begriffe gibt es in der Norm Beispiele für ein besseres Verständnis. Aus den Hauptpunkten „Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens“, Sachbi-

## 2.3 Rechtliche und regulatorische Bedingungen für nachhaltige Produkte

lanz und Wirkungsabschätzung können in der Auswertung dann wiederum einzelne signifikante Parameter ermittelt und beurteilt werden, woraus sich Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen ableiten lassen [DIN e. V., 2021b]. Die Ergebnisse der Auswertung müssen noch methodisch auf Vollständigkeit, Sensitivität und Konsistenz geprüft werden. Sich daraus ergebende Schlussfolgerungen sollten am Ende vollständig dokumentiert werden. Mithilfe der Normen DIN EN ISO 14040 und 14044 wird somit das Verständnis geschaffen, umfangreiche Ökobilanzen zielgerichtet und ergebnisorientiert durchzuführen.

### DIN EN ISO 14067

Die letzte im Zusammenhang mit Nachhaltigkeit vorgestellte Norm ist die DIN EN ISO 14067, mit dem Titel „Treibhausgase - Carbon Footprint von Produkten - Anforderungen an und Leitlinien für Quantifizierung“ [DIN e. V., 2019]. Die Norm soll ergänzend zu den vorher genannten Normen 14040 und 14044 die genaue Bestimmung und Quantifizierung der Treibhausgas-Mengen (THG-Mengen) in den einzelnen Lebensabschnitten eines Produktes ermöglichen [DIN e. V., 2019]. Sie ist Teil der Normenreihe 14060 und ermöglicht das Verfassen einer Carbon Footprint Studie (CFP-Studie), wobei alle Normen der Reihe das Ziel haben, die Erstellung eines THG-Berichtes zu unterstützen [DIN e. V., 2019]. Bei einer CFP-Studie wird in der Norm der gesamte Lebenszyklus eines Produktes betrachtet, die Ökobilanzierung erfolgt dabei in iterativer Form über seine vier Phasen wie in der DIN EN ISO 14040 beschrieben, um konsistente Studien und Ergebnisse zu erhalten [DIN e. V., 2019, DIN e. V., 2021a]. Neben den vier Phasen müssen in der CFP-Studie auch die Prozessmodule genannt und in Lebenswegabschnitte gegliedert werden, wie z.B. „Rohstoffgewinnung, Konstruktion, Produktion, Transport“ [DIN e. V., 2019]. Dabei werden auch alle emittierten und entzogenen Treibhausgase den einzelnen Lebenszyklusabschnitten zugeordnet [DIN e. V., 2019]. Durch diese Quantifizierung der einzelnen THG-Mengen lässt sich am Ende das GWP, also der potentielle Beitrag zur Erderwärmung beziffern. Der Untersuchungsrahmen sollte dabei, ähnlich wie bei der DIN 14040 und 14044 auch, gewissen Kriterien unterliegen, wie etwa den Systemgrenzen, Hauptfunktionen des Systems, Anforderungen und Aktualität der Daten und weitere [DIN e. V., 2019]. Diese speziellen Kriterien werden in der Norm im Folgenden einzeln behandelt und weiter erläutert, sodass eine Durchführung der

## 2 Stand der Technik

CFP-Studie anhand von Beispielen gut durchführbar ist. Für die Auswertung und den Bericht werden einige der zuvor genannten Kriterien ebenfalls verwendet. Der Bericht der CFP-Studie muss insgesamt 20 verschiedene Kriterien und Informationen enthalten [DIN e. V., 2019]. Dadurch sollen einzelne Studien gut untereinander vergleichbar werden.

Mit den hier gezeigten Normen ist es Herstellern bzw. Unternehmen möglich, sich insgesamt oder in einzelnen Teilbereichen nachhaltiger auszurichten und ihre Prozesse umzustellen. Mithilfe der Ökobilanz sowie der CFP-Studie können wiederum Produkte, Dienstleistungen oder Prozesse auf ihr GWP untersucht werden. Dabei ist es sehr wichtig, sich vorher im Klaren zu sein, was die Betrachtungsgrenzen sind und welche Merkmale bzw. Indikatoren dabei festgestellt, ausgewertet und am Ende berichtet werden sollen. Dadurch, dass der Rahmen einer Ökobilanz von Produkt zu Produkt bzw. von Hersteller zu Hersteller unterschiedlich gewählt wird, ist ein produkt- oder herstellerübergreifender Vergleich oft schwierig.

## 2.4 Produktlebenszyklus

Der Produktlebenszyklus definiert den kompletten zeitlichen Ablauf eines Produktes, angefangen bei der Erzeugung oder Vorstufen davon, bis zu seinem Lebensende. In der DIN EN ISO 14040 wird der Lebensweg eines Produktes definiert als „aufeinander folgende und miteinander verbundene Stufen, beginnend mit der Rohstoffgewinnung oder Rohstoffherzeugung bis zur endgültigen Beseitigung“ [DIN e. V., 2021a]. Die Unterschiede in den Definitionen der einzelnen Lebenszyklusphasen sollen in diesem Kapitel analysiert werden. Münger spricht von den Phasen Produktion, Nutzungsphase, Nachnutzungsphase und Rückführung von Materialien in das System [Münger, 2021]. Diese Punkte eines Produktlebenszyklus sind auf eine Kreislaufwirtschaft ausgelegt, bei der am Ende des Produktlebens eine Weiternutzung von Teilen, Werkstoffen oder Energien angestrebt wird.

Klöpffer und Grahl haben eine Definition, die für die Linearwirtschaft wie auch für die Kreislaufwirtschaft gilt, zu sehen in Abb. 2.8. Sie greifen dabei der Produktion noch weiter vor, begonnen mit der „Rohstoff- und Energieträergewinnung“, gefolgt von der „Herstellung der Zwischenprodukte“ [Klöpffer und Grahl, 2009]. Hier werden auch die Vorproduktion bzw. Extraktion der Rohstoffe und das Herstellen von

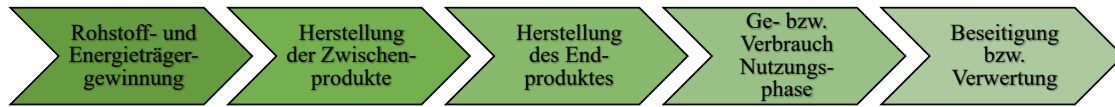


Abbildung 2.8: Lebensweg eines Produktes. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Klöpffer und Grahl, 2009]

Halbzeugen und anderen Zwischenprodukten betrachtet, die am Ende mit zum Produktlebenszyklus gehören. Zwischen jedem einzelnen Schritt kann dabei noch ggf. ein Transportschritt erfolgen, je nachdem wo weiterverarbeitet wird. Am Ende des Zyklus kann das Produkt beseitigt oder verwertet werden, somit sind Linear- wie auch Kreislaufwirtschaft gültig [Klöpffer und Grahl, 2009]. Auch Vezzoli unterteilt den Produktlebenszyklus in mehr Abschnitte als die Definition der Norm DIN EN ISO 14040. Bei ihm existieren die aufeinander folgenden Schritte Vorproduktion, Produktion, Distribution, Benutzung und Entsorgung [Vezzoli, 2018]. Bei Vezzolis Definition wird ebenfalls noch von einer Linearwirtschaft ausgegangen, sowie einer aufwändigeren Produktion, die noch eine Vorproduktion beinhaltet.

Bender und Gericke integrieren den Produktentstehungsprozesses in den Produktlebenszyklus. Dabei wird der Produktlebenszyklus ebenfalls als ein Kreislauf wahrgenommen, begonnen mit der Produktplanung und dann der Produktentwicklung. Darauf folgen die Beschaffung, die Produktherstellung und die Produktentstehung. Das fertig erzeugte Produkt wird durch die Vertriebsphase in die Nutzung gebracht, nach der es außer Betrieb genommen wird, um schließlich über ein Produktrecycling wieder in der Produktplanung Verwendung zu finden. [Bender und Gericke, 2021]

In der Quelle wird deutlich, dass es neben den schon zuvor genannten Phasen in einem Produktlebenszyklus auch immer Punkte gibt, an denen Arbeit von Entwicklern oder Konstrukteuren mit in das Produkt fließen. Die Außerbetriebnahme ist in dem von Bender und Gericke definierten Zyklus ein fester Bestandteil, so können Produkte z.B. auf eine definierte Nutzungsphase ausgelegt sein, an deren Ende das Produkt im Zweifel vorsorglich außer Betrieb gesetzt wird, bevor Defekte entstehen können [Bender und Gericke, 2021]. Frei teilt die Definition auf in den Produktlebenslauf und den Produktlebenszyklus [Frei, 1999]. Der Lebenslauf betrachtet dabei den kompletten Produktlebensweg „von der Wiege bis zur Bahre“, begonnen mit der Rohmaterialgewinnung über die Nutzungsphase bis hin zur Entsorgung [Frei, 1999].

Der Produktlebenszyklus ist im Vergleich dann „die Marktbetrachtung eines Produktes“, also Einführung, Wachstum, Reife und Niedergang eines Produktes [Frei, 1999]. Auch bei dieser Definition gibt es noch vorgelagerte Phasen vor dem Produktionsschritt, insgesamt betrachtet in einer Linearwirtschaft. Die Trennung zwischen den Lebenszyklen von Produkten und deren wirtschaftlicher Betrachtung ist dabei ein neuer Ansatz.

Insgesamt kann festgehalten werden, dass ein Produktlebenszyklus in allen genannten Definitionen eine Produktions-, Nutzungs- und Endphase besitzt. Je nach Auffassung gibt es noch weitere Phasen, oftmals vor der Produktionsphase vorgelagert oder auch zwischen allen Phasen kleinteiliger definiert. Je nachdem, ob von einer Linear- oder Kreislaufwirtschaft ausgegangen wird, gestaltet sich die Endphase des Produktes dementsprechend anders. Diese verschiedenen Betrachtungsweisen sind gerade für die Ökobilanzierung (Kap. 2.3.2) wichtig, da hier der Betrachtungsrahmen zu Anfang eindeutig definiert werden muss.

## 2.5 Wirtschaftsmodelle und Designansätze im Nachhaltigkeitskontext

Die zuvor dargestellten gesetzlichen Grundlagen (Kap. 2.3.1) betreffen nicht nur einzelne Produkte, sondern ganze Unternehmen und somit auch Wirtschaftszweige und -modelle. Diese werden im Folgenden, im Hinblick auf die jüngeren Entwicklungen der Wirtschaftsmodelle im Sinne der Nachhaltigkeit erläutert. In den folgenden Unterkapiteln wird eine Auswahl an wissenschaftlichen Erkenntnissen vorgestellt, die zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit aufgrund von mehreren Publikationen in dem jeweiligen Thema eine gewisse Relevanz besitzen und eine Grundlage für die spätere Synthese darstellen.

### 2.5.1 Linearwirtschaft

Ein zentrales Element im Ökodesign ist die Kreislauffähigkeit von Produkten, die wiederum mit der Kreislaufwirtschaft in Zusammenhang steht. Bevor diese erläutert wird, macht es Sinn das aktuell wahrscheinlich vorherrschende Modell der Linearwirtschaft zu analysieren, um aktuelle Entwicklungen nachvollziehen zu können. In

## 2.5 Wirtschaftsmodelle und Designansätze im Nachhaltigkeitskontext

der bis zuletzt vorherrschenden Linearwirtschaft beschaffen Hersteller für ihre Produkte Ressourcen und verarbeiten diese zu neuen Produkten, um sie dann an einen Endkunden zu verkaufen [Kortmann und Piller, 2016]. Durch den Verkauf an den Kunden wechselt das Produkt und seine inhärenten Rohstoffe den Besitzer, sowie auch die Verantwortung für das Produkt. Der Hersteller benötigt so immer neue Rohstoffe, um wieder neue Produkte herstellen und verkaufen zu können, so gibt es einen stetigen Strom an Ressourcen, der am Ende durch den Kunden entsorgt wird und verloren geht [Walcher und Leube, 2017]. Man spricht in diesem Zusammenhang auch von „transaktions-orientierten Herstellern“. Das Geschäftsmodell der Linearwirtschaft wird heutzutage immer noch sehr häufig von Unternehmen verwendet, wie z.B. in großen Teilen Supermärkte und viele Verkäufer von Kleidung oder Möbeln [Kortmann und Piller, 2016]. Bei der Linearwirtschaft wird das Produkt an seinem Lebensende durch den Kunden entsorgt und landet auf einer Deponie. Dadurch, dass die eingesetzten Ressourcen so verloren gehen, spricht man bei der Linearwirtschaft auch von der „Wegwerfgesellschaft“ oder dem „Cradle-to-Grave-Verfahren“ [Walcher und Leube, 2017]. Durch die Industrialisierung und die damit einhergehende Beschleunigung in der Herstellung von Produkten, ist auch eine Beschleunigung im Verbrauch von Produkten festzustellen [Vezzoli, 2018]. Um dieses Phänomen zu unterstützen, bewerben Unternehmen ihre neuen Produkte, wodurch unter anderem Werte vermittelt werden sollen, dass nur neue Produkte qualitativ am besten sind und ältere nicht [Stahel, 2016]. Für Unternehmen, die mit dem Bruttoinlandsprodukt (BIP) arbeiten, müssen immer neue Produkte verkauft werden, um einen stetigen Strom an finanziellem Einkommen zu generieren [Stahel, 2016]. Bei dem Modell der Linearwirtschaft werden negative Auswirkungen der Produkte oftmals nicht beachtet, da der Hersteller beim Verkauf seine Verantwortung dafür aufgibt [Münger, 2021]. Durch den hohen Ressourcenverbrauch und erhöhten Konsum steht die Linearwirtschaft zunehmend in der Kritik und soll durch neuartige Geschäftskonzepte wie die Kreislaufwirtschaft ersetzt werden.

### 2.5.2 Kreislaufwirtschaft

Um den Problemen der Linearwirtschaft zu begegnen bzw. diese aufzulösen, soll das Modell der Kreislaufwirtschaft (eng.: circular economy) verwendet werden. Die beiden Modelle sind als Gegensätze zu verstehen. So sollen in der Kreislaufwirtschaft

## 2 Stand der Technik

keine neuen Ressourcen abgebaut und verwendet werden, sondern solche aus schon existierenden Produkten wiederverwendet werden [Kurth und Oexle, 2022]. Das Modell orientiert sich dabei an Kreisläufen, wie sie auch in der Natur vorkommen, bei z.B. einem biologischen Kreislauf eines Lebewesens wird nach dessen Ableben in kurzer Zeit alles durch seine Umwelt verwertet und bildet die Grundlage für neues Leben [Münger, 2021]. Als Analogie ist die Linearwirtschaft wie ein Fluss zu verstehen, dessen gesamter Inhalt irgendwann selbigen verlässt und die Kreislaufwirtschaft gleicht eher einem See, der eine beständige Größe hat [Stahel, 2016]. Um diese beständige Größe zu erhalten, müssen Produkte aber auch verwendete bzw. gebundene Energien (eng.: embodied energy) ebenfalls immer wieder in den Kreislauf zurückgeführt werden. Für diese Rückführung gibt es verschiedene Strategien, die im Kapitel 2.6 noch tiefgreifender als sogenannte „R-Strategien“ beschrieben werden [Potting et al., 2017]. Grob für die Kreislaufwirtschaft beschrieben, bedeutet die Zirkularität, dass z.B. erneuerbare Energien eingesetzt werden, welche sich erholen können [Pauly und Traufetter, 2016]. Weitere Aspekte sind das Ändern von Nutzungsverhalten im Kontext mit Produkten, so dass z.B. nur der Service erworben wird und nicht das Produkt, oder auch das Recycling, bei dem Produktteile auf einer stofflichen Ebene wiederaufbereitet und wiederverwendet werden [Pauly und Traufetter, 2016]. Die Unterschiede zwischen Linear- und Kreislaufwirtschaft sind in Abb 2.9 zu sehen, in der Grafik sind außerdem exemplarisch einige Maßnahmen präsentiert, um Produkt(teil)e in einem Kreislauf zu halten. Die Linearwirtschaft endet dabei immer in der Entsorgung (eng.: disposal) welche auf einer Deponie oder in der Verbrennung mündet. Bei der Kreislaufwirtschaft gibt es diverse Strategien, um das betrachtete Produkt oder Teile davon in unterschiedlichen Zuständen wieder einem Kreislauf zurückzuführen. Die Kreislaufwirtschaft als ganzheitliches Konzept soll in der Produktion die Nachhaltigkeit stark verbessern, es ist daher ein Anliegen von Herstellern wie auch Gesetzgebern, die Kreislaufwirtschaft aus verschiedenen Interessen heraus zu fördern. Die Europäische Union hat 2015 einen großen Aktionsplan mit dem Titel „Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy“ (dt.: Den Kreislauf schließen - Ein Aktionsplan der EU für die Kreislaufwirtschaft) veröffentlicht, in dem viele neue Maßnahmen zur Verbesserung der Kreislaufwirtschaft präsentiert werden [European Commission, 2015]. Die Kreislaufwirtschaft dient im Kontext der EU-Maßnahmen von 2015 zur Werterhaltung von bestehenden Produkten und Materialien, zur Müllvermeidung und zu einer Produktivitäts- bzw. Effekti-

## 2.5 Wirtschaftsmodelle und Designansätze im Nachhaltigkeitskontext

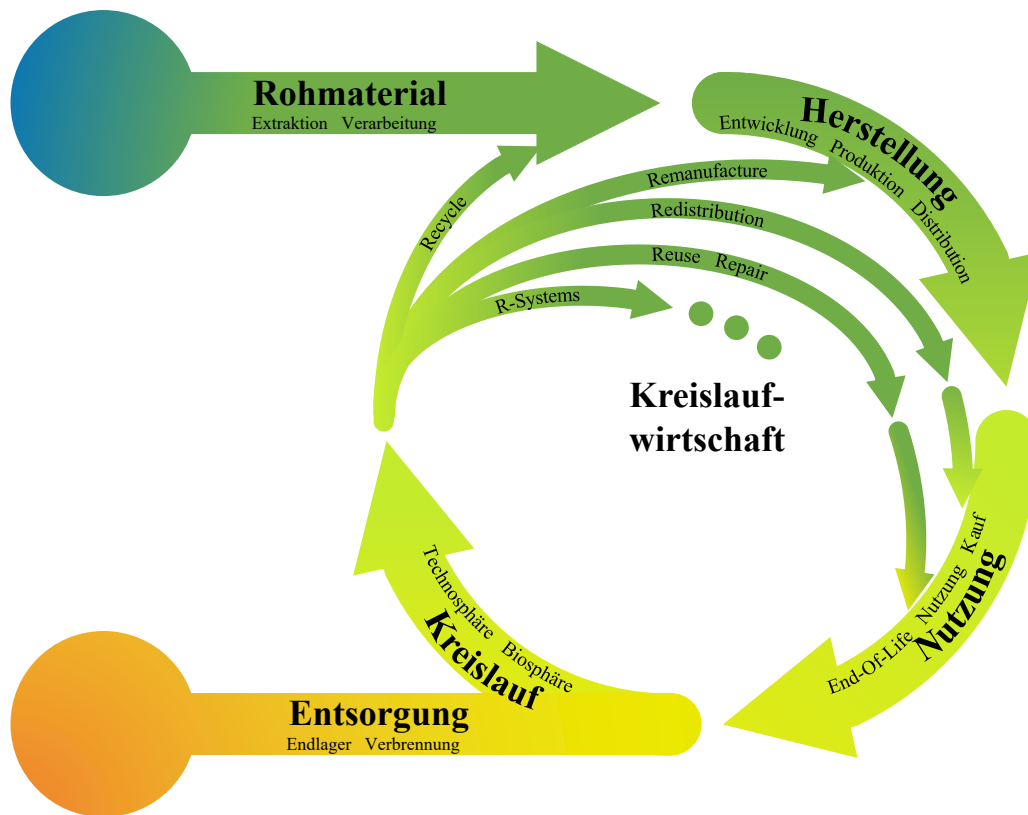


Abbildung 2.9: Darstellung von Kreis- und Linearwirtschaft. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Walcher und Leube, 2017]

vitätssteigerung der Wirtschaftsleistung innerhalb der EU [European Commission, 2015]. Der Aktionsplan kann als Anstoß verstanden werden, unter dem andere EU-Richtlinien maßgeblich in einem Kontext der Kreislaufwirtschaft erneuert wurden, wie z.B. die zuvor in Kapitel 2.3.1 angesprochenen Richtlinien 2009/125/EG und 2008/98/EC sowie die weiteren genannten Verordnungen, die eher genereller gehalten sind. Dabei wurde konkret die Ökodesign-Richtlinie 2009/125/EG überarbeitet unter Gesichtspunkten wie Reparierbarkeit, Aufwertbarkeit oder auch Recyclingfähigkeit von Produkten [European Commission, 2015]. Eine der ersten spezifischen Änderungen innerhalb der Richtlinie, die aus dem Aktionsplan entstanden ist, waren neue Anforderungen für elektronische Displays [European Commission, 2015]. Durch alle angestoßenen Maßnahmen aus dem Aktionsplan wurde eine Kostensenkung von

## 2 Stand der Technik

ca. 25 % in den Bereichen Mobilität, Wohnen und Lebensmitteln für Bürger innerhalb der EU in einer Studie ausgerechnet [Pauly und Traufetter, 2016]. Diesem Aktionsplan sind noch weitere Konzepte vorausgegangen, die die Europäische Kommission präsentiert hat, wie z.B. die „Null-Abfall-Gesellschaft“, „Kreislauf schließen“ oder auch „Ressourcenschonung und -effizienz“, die mit den Anstoß zu dem 2015 präsentierten Plan gaben [Alt, 2018].

Um das Wachstum hin zu mehr Nachhaltigkeit zu beschleunigen, lohnt es sich, nicht erst am Ende eines Produktlebens Maßnahmen zu ergreifen, sondern diese direkt in den Phasen des Produktdesigns und der Produktentwicklung vorzunehmen [Vezzoli, 2018]. Hersteller liegen somit oft in der Verantwortung, ihre Produkte nachhaltiger zu gestalten. Neben dem gesetzgebenden Teil, der oft als Auflagen oder Regeln verstanden werden kann, gibt es auch Chancen für Hersteller, ihr Wachstum mit neuen Strategien, die die Nachhaltigkeit betreffen, zu verbessern. So haben z.B. Hersteller, die die Verantwortung für das komplette Produktleben übernehmen, die Chance aus der Zirkulation ihrer Produkte Gewinne zu ziehen. Zurückgenommene Produkte können aufgearbeitet oder in Teilen für neue Produkte verwendet und so mehrfach verkauft werden [Kortmann und Piller, 2016]. Durch verringerte Rohstoffverbräuche und mehrere Lebenszyklen für Produkte und Produktteile ergeben sich für Hersteller Chancen auf ein Gewinnwachstum [Kortmann und Piller, 2016]. Auch bei der Kreislaufwirtschaft gibt es diverse Konzepte, wie trotzdem ein wirtschaftliches Wachstum erreicht werden kann. Die Ellen MacArthur Foundation spricht hier von vier verschiedenen Konzepten, mit denen in Kreisläufen Wertschöpfung betrieben werden kann [Ellen McArthur Foundation, 2013].

Der „innere Kreislauf“ bezieht sich dabei auf die „Reduktion bzw. Minimierung des Materialeinsatzes“, so sollen durch Leichtbau und Standardisierung sehr enge Kreisläufe und eine ressourcengünstige, direkte Wiederverwendung von Produkten ermöglicht werden, ohne vorheriges stoffliches Recycling [Münger, 2021]. Beim „verlängerten Kreislauf“ wird alles darauf ausgerichtet, die Lebensdauer eines Produktes zu maximieren, durch Strategien wie Wiederverwendung, Reparatur oder Wiederaufbereitung [Ellen McArthur Foundation, 2013]. Im „industrieübergreifenden Kreislauf“ soll der Kreislauf in sinnvollen Beziehungen mehrerer Hersteller geschlossen werden. Dabei sind z.B. sinnvolle Verknüpfungen von Werkstoff- bzw. Materialflüssen denkbar, sodass ein nachgelagerter Hersteller ein für ihn wichtiges Halbzeug oder Rohstoff von einem anderen Hersteller erhält, der dieses Material aus einem Recy-

clingingprozess seiner Produkte erhält [Münger, 2021]. Der vierte und sogenannte „reine Kreislauf“ bezieht sich auf die stoffliche Zusammensetzung von Produkten. Je weniger verschiedene Werkstoffe in einem Produkt verwendet werden und je einfacher diese am Lebensende wieder zu trennen sind, desto größer kann die Nachhaltigkeit des Produktes sein [Ellen McArthur Foundation, 2013].

Die aufgezeigten Wege sind nicht exklusiv zu verstehen sondern können auch vermischt angewendet werden, Ziel bei den präsentierten Methoden sind auch hier Anreize für Hersteller, ihre Wirtschaftsleistung parallel zu einer steigenden Nachhaltigkeit zu verbessern. Die Kreislaufwirtschaft wird so zu einem wichtigen Werkzeug, um die drei Säulen der Nachhaltigkeit umzusetzen (Kap. 2.1).

### 2.5.3 Betrachtungsweisen der Kreislaufwirtschaft

In den Kapiteln Kreislaufwirtschaft (Kap. 2.5.2) und Linearwirtschaft (Kap. 2.5.1) wurden die beiden gegensätzlichen Vorgehensweisen des Wirtschaftens beschrieben. Für die Beschreibung bestimmter Kreisläufe bzw. Kreislaufabschnitte gibt es auch die „Cradle-to-...“ (dt.: Von der Wiege bis zur ...) Begriffe bzw. Konzepte. Diese werden häufig benutzt, um z.B. den Beobachtungsrahmen einer Lebenszyklusanalyse zu beschreiben, wie z.B. „Cradle-to-Grave“ (dt.: Von der Wiege bis zur Bahre), welcher das Produktleben von seiner Entstehung bis zu seiner Deponierung beschreibt [Balderjahn, 2013]. Ein Zwischenschritt wird durch „Cradle-to-Gate“ (dt.: Von der Wiege bis zum Werkstor) beschrieben, dabei wird das Produktleben von seiner Entstehung bis zum Versand, bzw. dem Verlassen des Produktes vom Hersteller betrachtet [Nickel, 2023]. Die darauf folgenden Abschnitte wie (Transport), Nutzung und Deponie bzw. Wiederverwendung werden hier nicht betrachtet.

Der umfassendste Begriff ist „Cradle-to-Cradle“ (dt.: von der Wiege bis zur Wiege), welcher dann einen geschlossenen Kreislauf beschreibt, bei dem im Idealfall nichts verschwendet wird [Eisenriegler et al., 2020]. Der Begriff Cradle-to-Cradle (C2C) ist dabei aber nicht nur als Beschreibung eines Produktlebenszyklus zu verstehen, sondern eher als Methode, die angewendet werden kann, um nachhaltige Produkte zu entwerfen. Das Cradle-to-Cradle Konzept wurde von Braungart und McDonough entwickelt, wobei der Begriff „Cradle-to-Cradle“ schon seit 1970 existiert und damals von Walter R. Stahel entwickelt wurde [McDonough und Braungart, 2002]. Die Erkenntnisse für das C2C-Konzept führten zu einem Markenschutz für

## 2 Stand der Technik

die Bezeichnung Cradle-to-Cradle sowie diversen Ausgründungen, unter anderem für das Unternehmen Cradle to Cradle Products Innovation Institute auf verschiedenen Kontinenten, bei denen unter dem Markenbegriff C2CCertified das eigene Unternehmen oder ein Produkt ein Zertifikat erhalten kann, ähnlich wie z.B. der Blaue Engel [c2ccertified.org, 2024]. Es gibt außerdem eine enge Zusammenarbeit mit der Ellen MacArthur Foundation, wo ebenfalls das C2C-Konzept beworben wird [Ellen MacArthur Foundation, 2013].

Beim Cradle-to-Cradle Konzept geht es darum, einen geschlossenen Kreislauf zu erzeugen in dem Rohstoffe und Produkte für eine unbestimmte Zeit zirkulieren und immer wieder verwendet werden können [Balwan et al., 2022]. Innerhalb des Konzepts wird zwischen dem biologischen und dem technischen Kreislauf unterschieden, wobei bei beiden eine maximale Ökoeffizienz angestrebt wird [Braungart et al., 2007]. Das C2C-Konzept besteht aus drei Grundsätzen, die im Folgenden kurz beschrieben werden. Der erste Grundsatz „Waste equals food“ (dt.: Abfall ist Nahrung) soll verdeutlichen, dass es in der Natur kein Konzept für Abfall gibt, da hier sämtliches „totes“ Material, welches am Lebensende von Tieren oder Pflanzen anfällt, wieder die Grundlage für neues Leben ist [McDonough, 2003]. Der Begriff Abfall ist daher auch laut Schlussfolgerung von McDonough und Braungart umzudeuten und es müssen Lösungen oder Prozesse ermittelt werden, in denen Abfall weiter genutzt werden kann und somit kein Abfall mehr ist. „Use current solar income“ (dt.: Solarenergie nutzen) ist der zweite Grundsatz, welcher aus der Erkenntnis kommt, dass die Sonne der Grund für Pflanzen und auch anderen Lebensformen auf der Erde ist und als dauerhafte grüne Energiequelle zu sehen ist, die auch für andere Prozesse benutzt werden kann [McDonough, 2003]. Der dritte Grundsatz „Celebrate diversity“ sagt aus, dass es sinnvoll ist, für sehr kleine Teilsysteme Lösungen zu finden, da laut Ansicht der Autoren große Monokulturen fast immer negative Auswirkungen mit sich bringen, die langfristig nicht nachhaltig sind [McDonough, 2003]. Bei den drei Grundsätzen orientiert sich das C2C-Konzept immer an einem Vorbild aus biologischen Kreisläufen, welche durch die Erkenntnis darüber auf technische Kreisläufe übertragen werden können. So kann aus den Grundsätzen z.B. abgeleitet werden, dass Produkte sehr einfach reparierbar, erweiterbar oder auch einfach und sortenrein zerlegbar gestaltet sein sollten, um so als Energie bzw. Material für weitere Kreisläufe zu dienen [Ellen MacArthur Foundation, 2013]. Bei dem Konzept wird auch immer wieder auf die Designphase eingegangen, welche für die Integration

der drei Grundsätze fundamental ist, um signifikante Verbesserungen zu erzeugen [Hauschild et al., 2018]. Auch innerhalb der Designphase ist es laut McDonough am wirksamsten, in die frühen Phasen der Problemdefinition zu gehen und nicht z.B. eine existierende Lösung zu optimieren, um die größtmögliche Wirkung zu erreichen [McDonough, 2003]. Um nicht nur die allgemeingültigen drei Grundsätze zu präsentieren, sondern auch konkrete Handlungsempfehlungen für die Produktentwicklung zu bieten, haben McDonough und Braungart noch zwölf weitere Prinzipien für die grüne Produktentwicklung aufgestellt [McDonough, 2003]. Durch die initiale Arbeit der beiden Autoren sowie viele weitere Veröffentlichungen ist dann der Markenschutz sowie diverse Unternehmen entstanden, die heute die schon beschriebene Zertifizierung durchführen und Unternehmen bei der Produktgestaltung und -entwicklung beraten.

### 2.5.4 Circular Design bzw. Design Circular

Damit die in den vorangegangenen Kapiteln ermittelten Methoden wie die Kreislaufwirtschaft (Kap. 2.5.2), das Cradle-to-Cradle Prinzip (Kap. 2.5.3) oder auch die Ideen des Ökodesigns (Kap. 2.5) umgesetzt werden können, bedarf es diverser konkreter Methoden und tatsächlicher Werkzeuge, mit denen die geplanten Ziele erreicht werden können. Es wird in diesem Stadium dann von (Design-)Strategien gesprochen bzw. im Englischen oftmals von sogenannten „Design-for-X“ Methoden, bei denen durch gezielte Entscheidungen in frühen Phasen der Produktentwicklung wiederum bestimmte Eigenschaften in einzelnen Lebensabschnitten des Produktes erreicht werden sollen [Huang, 1996]. Im Kontext der Nachhaltigkeit gibt es eine steigende Anzahl an Veröffentlichungen, die neuartige Methoden für das Erreichen besagter Ziele entwickeln, wie z.B. das „Circular Design“ (dt.: zirkuläre Gestaltung) oder auch umgekehrt das „design Circular“ (Anm.: Eigenname einer Methode von Münger 2021), sowie viele weitere Design-for-X Methoden [Ellen McArthur Foundation, 2013, Münger, 2021]. Die meisten dieser Methoden haben aktuell keinen angemeldeten Markenschutz, daher kann es für manche Begriffe wie z.B. das Circular Design vorkommen, dass es verschiedene Definitionen und Auslegungen durch unterschiedliche Autoren gibt. Die Ellen MacArthur Foundation spricht beim Circular Design von einer sinnvolleren Materialauswahl sowie einer Produktgestaltung die standardisiert, modularisiert, demontagefreundlich ist und reinere Werkstoffver-

## 2 Stand der Technik

wendungen vorweist [Ellen McArthur Foundation, 2013]. Geisendorf und Pietrulla zerteilen das Circular Design weiter in die verschiedenen Teilbereiche Materialbeschaffung, Produktion, Verbrauch, Kundendienst und Lebensende, für die einzeln eine Circular Design Strategie entwickelt wird [Geisendorf und Pietrulla, 2018]. Ihre entwickelten Systeme unterstellen sie dabei noch einer makro- und einer mesoökonomischen Perspektive, die damit begründet wird, dass die Zielvorgaben z.B. von einzelnen Firmen und größeren Wirtschaftsbereichen oder Ländern oft sehr verschieden sein können [Geisendorf und Pietrulla, 2018]. Die zirkuläre Gestaltung sollte nach Meinung der Autoren keinen Abfall generieren, Dienste und keine Produkte verkaufen, und die zuvor angesprochenen Teilbereiche unter Gesichtspunkten der Nachhaltigkeit optimieren [Geisendorf und Pietrulla, 2018]. Bakker et al. entwickeln in einer Veröffentlichung unter den „Circular-Product-Design-Prinzipien“ direkt sechs verschiedene Design-for-X Methoden für eine verbesserte Nachhaltigkeit, wie in Tabelle 2.3 gezeigt [Bakker et al., 2014b]. Bei den genannten Prinzipien ist schnell zu

Tabelle 2.3: Sechs Design-for-X Prinzipien, entwickelt von [Bakker et al., 2014b]

### **Circular-Product-Design-Prinzipien**

---

Design for Durability  
Design for Product Attachment and Trust  
Design for Ease of Maintenance and Repair  
Design for Disassembly and Reassembly  
Design for Upgradability and Adaptability  
Design for Standardisation and Compatibility

erkennen, worauf der Fokus im Einzelnen gelegt wird. Produkte sollen unter Anwendung aller Prinzipien haltbarer gestaltet werden, sie sollen eine starke emotionale Bindung beim Nutzer hervorrufen, einfach zu warten und reparieren sein und dazu einfach demontier- und montierbar sein [Bakker et al., 2014b]. Für weitere Lebenszyklen sollten Produkte weiter upgradefähig und adaptierbar sein und standardisierte Schnittstellen für maximale Kompatibilität zu anderen Produkten aufweisen [Bakker et al., 2014b].

Das Design Circular als Methode von Münger bezieht sich auf die grundlegende Neugestaltung von Produkten, bei der das Thema Nachhaltigkeit möglichst vollständig integriert wird [Münger, 2021]. Auch bei dieser Strategie geht es, ähnlich wie auch beim Circular Design, um eine Verlängerung der Produktlebensdauer durch

z.B. „Wartungs-, Reparatur-, Umverteilungs-, Aufarbeitungs- und/oder Wiederherstellungskreisläufe“ die gezielt entwickelt werden [Münger, 2021]. Auch Vezzoli hat mit seinem „Design for Environmental Sustainability“ eine umfangreiche Strategie für die Verbesserung der Nachhaltigkeit von Produkten entwickelt [Vezzoli, 2018]. In seiner Strategie sollen Material- und Energieverbrauch für Produkte minimiert werden, ebenso wie der Einsatz von potentiell toxischen Werkstoffen [Vezzoli, 2018]. Die eingesetzten Werkstoffe sollen außerdem erneuerbar und am Lebensende kompostierbar bzw. „biokompatibel“ sein [Vezzoli, 2018]. Das Produkt selber soll in seiner Entwicklungs- wie auch Nutzungsphase auf eine lange Lebensdauer hin optimiert werden, die ähnlich wie bei den zuvor beschriebenen Strategien z.B. durch Reparaturen, Erweiterung, einfache (De-)Montage oder lebensdaueroptimierte Werkstoffe zu erreichen ist. In der Veröffentlichung von Walcher und Leube werden im Kapitel „Zirkulation“ treffend, die vier Kreislauftypen Verlängerung (Maintenance/Reuse), Umverteilung (Redistribution), Aufarbeitung (Remanufacturing) und das Recycling beschrieben [Walcher und Leube, 2017]. Auffällig ist dabei, dass sich im englischen Sprachgebrauch viele der konkreten Strategien, die innerhalb der Design-for-X-Prinzipien genannt werden, mit einem „Re-“ beginnen, wie z.B. das oben genannte Reuse oder auch Remanufacturing. Diese Tatsache wurde auch von der Wissenschaft und weiteren Akteuren erkannt und es gibt eine steigende Anzahl an Veröffentlichungen zu den sogenannten „R-Strategien“ [Reike et al., 2018]. Dabei sind die R-Strategien in ihrem Anwendungsbezug meistens noch konkreter als die in diesem Kapitel angesprochenen Design-for-X-Strategien.

## 2.6 R-Systeme

Wie schon im Kapitel „Circular Design“ (Kap. 2.5.4) angesprochen, ergeben sich aus den einzelnen Design-for-X-Strategien noch konkretere Maßnahmen, welche im Englischen immer mit „Re-“ beginnen und daher auch R-Strategien genannt werden [Reike et al., 2018]. Es gibt dabei verschiedene R-Systeme mit unterschiedlichen Maßnahmen und deren Anzahl, wie z.B. drei, fünf oder auch zehn R-Systeme, die in verschiedenen wissenschaftlichen Arbeiten herausgestellt wurden. Dabei hat sich das System mit 5 „Rs“ zum Zeitpunkt der Verfassung dieser Dissertation weitestgehend etabliert [Sztangret, 2021]. Reike et al. analysierten die Nutzung der verschiedenen

## 2 Stand der Technik

R-Systeme. Die 5 R Variante ist mit etwa 27 % Anwendung, die von Reike et al. analysierten, am häufigsten vertretene, daher wird in dieser Arbeit darauf eingegangen [Reike et al., 2018, Balwan et al., 2022]. Die 5 Rs stehen dabei für verschiedene Maßnahmen, die umgekehrt pyramidenförmig angeordnet sind, wie in Abbildung 2.10 dargestellt. Dabei entspricht die Größe des Pyramidenstücks ihrer Wertigkeit im Sinne der Nachhaltigkeit.

Das erste R in der Pyramide ist dabei das Vermeiden (eng.: Refuse) von neuen Produkten als wichtigste Maßnahme. Darauf folgt als zweites R das Verringern (eng.: Reduce) des generellen Konsums von Produkten bzw. Neuanschaffungen [Sztangret, 2021].

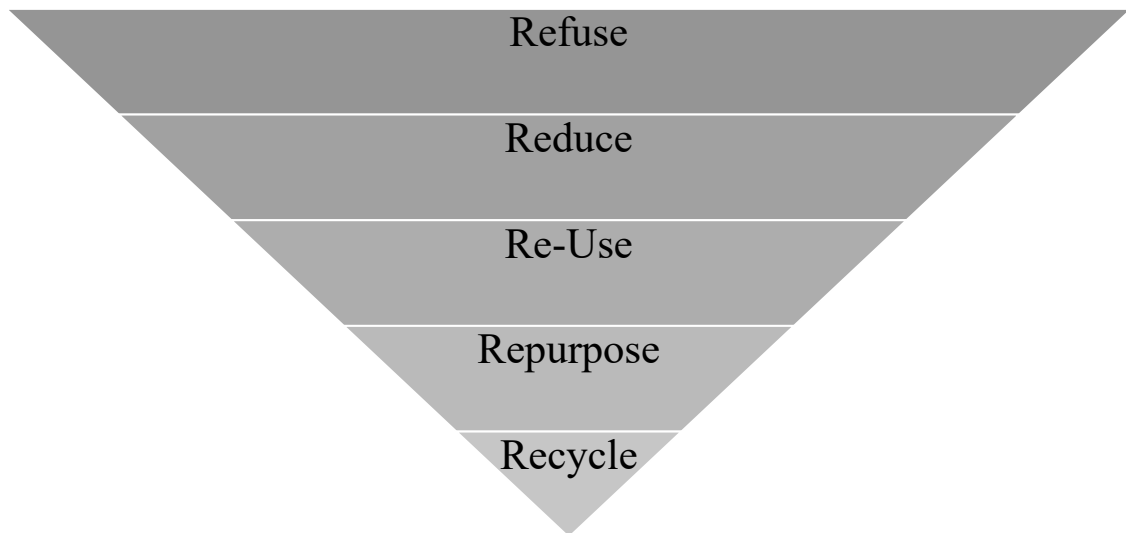


Abbildung 2.10: Umgekehrte Pyramide der 5Rs. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Balwan et al., 2022]

Als drittes R kommt die Wiederverwendung (eng.: Re-Use), welche einige Vorteile besitzt. Einer dieser Vorteile kommt dadurch zustande, dass bei der Wiederverwendung gebundene Primärenergie nicht verloren geht, welche bei der Beschaffung der Rohstoffe und der Fertigung des Produktes eingesetzt wurde [Santarius, 2012, Sherman, 1998]. Gerade dieser Teil an gebundener Primärenergie ist bei Produkten der Unterhaltungselektronik oft sehr hoch, verglichen zu den benötigten Energien im restlichen Lebenszyklus [Suckling und Lee, 2015].

Das vierte R in der Pyramide ist das „Repurpose“, also das Umfunktionieren von

bestehenden Produkten, die am Ende ihrer Nutzungsphase angelangt sind, so dass diese in anderem Kontext in anderen Bereichen wieder eingesetzt werden können [Mills, 2012]. Ein populäres Beispiel, welches zum Gebiet des Repurpose gehört, ist das sogenannte Upcycling, bei dem Produkte in anderem Kontext weiter genutzt werden, wie zum Beispiel das Herstellen von Schmuck aus alten Metall- oder Kunststoffprodukten [Sung et al., 2019].

Erst an letzter Stelle steht das Recycling, da es bei der thermischen Verwertung zu Verlusten von Rohstoffen sowie gebundener Primärenergie kommt [Eurostat, 2021, Crowther, 1999]. Trotz der Vorteile der Methoden, welche vorrangig vor dem Recycling erfolgen sollten, existieren aktuell fast nur Recycling-Ströme und nur wenige Re-Use-Stoffströme [Sherman, 1998, Statistisches Bundesamt, 2021].

### Detaillierte Betrachtung der Wiederverwendung

Innerhalb des Re-Use-Vorgangs gibt es wiederum verschiedene Methoden, Produkte oder Teile davon wiederzuverwenden, die im Folgenden beschrieben sind. Hatcher et al. unterteilen die Untergruppen der Wiederverwendung in verschiedene Hierarchiestufen, wie in Abbildung 2.11 zu sehen, die sich auch weitestgehend mit den von Potting et al. präsentierten weiteren R-Strategien decken [Hatcher et al., 2011, Potting et al., 2017].

Nach Kissling et al. sind drei Aspekte für die Wiederverwendung (Re-Use) zentral. Bei erneuter Wiederverwendung wird ein Besitzerwechsel vollzogen, wobei der neue Nutzer dann das ganze Produkt oder Teile davon noch einmal benutzt [Kissling et al., 2012]. In der letzten Aussage steht der zweite Aspekt, es können entweder das ganze Produkt oder auch nur Teile davon wiederverwendet werden. Drittens sollte laut Kissling et al. eine Wiederverwendung immer auch einen sozialen, ökonomischen oder ökologischen Vorteil bieten [Kissling et al., 2012]. Cooper und Gutowski stellen fest, dass die Wiederverwendung in sehr vielen verschiedenen Produktsparten Anwendung findet, von elektrischen Motoren über Flaschen und Essensbehälter bis zu der Wiederverwendung von Teilen von Häusern [Cooper und Gutowski, 2015].

Neben der direkten Wiederverwendung von Produkten nach ihrer Nutzungsphase gibt es einige weitere Vorgehensweisen, wie z.B. die Reparatur mit darauf folgender Wiederverwendung [M. King, 2006]. Hierbei wird das Produkt durch den Verbraucher oder den Hersteller selber, eine freie Reparaturwerkstatt oder eine Fach-

## 2 Stand der Technik

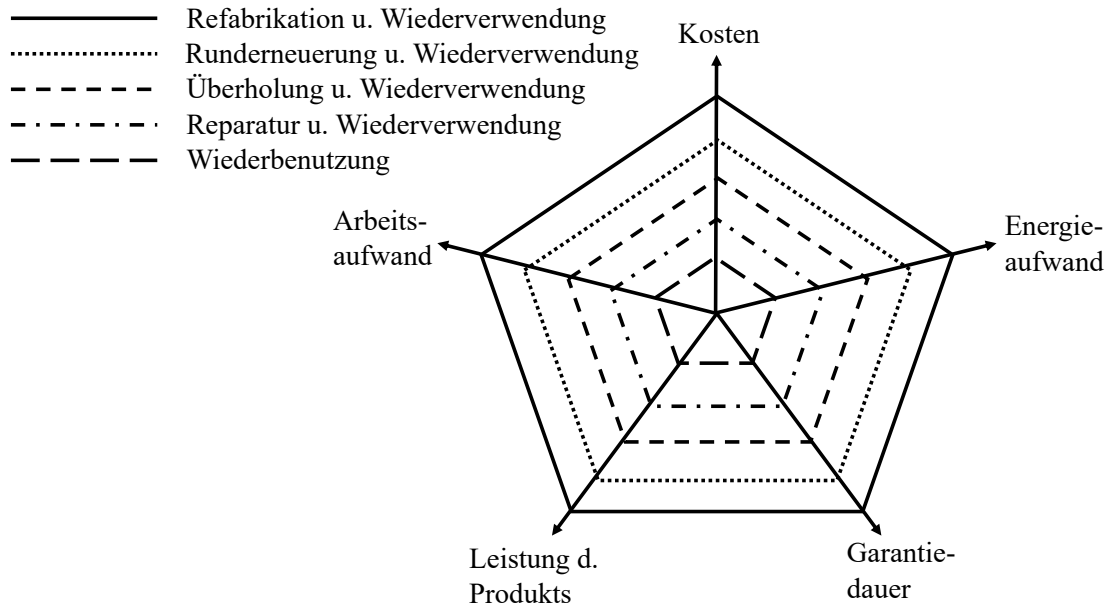


Abbildung 2.11: Hierarchiestufen der Wiederverwendung. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Gharfalkar et al., 2016]

reparaturwerkstatt repariert und kann dann in einem neuen Zyklus genutzt werden [Bracquené et al., 2018]. In einer weiteren Veröffentlichung definierten Bracquené et al. die Reparierbarkeit so, dass Informationen für etwaige Reparaturen bereitstehen, das Produkt entsprechend gestaltet ist und ein Reparaturservice vom Hersteller mit angeboten wird [Bracquené et al., 2021]. Dao et al. definierten die Reparatur als Prozess, um die Funktionalität eines Produktes mithilfe einer Korrektur eines Defektes zu erhalten [Dao et al., 2021]. Laut De Fazio tritt Reparierbarkeit meistens mit den Fähigkeiten zur Wiederverwendung und Erweiterung auf (eng.: Re-Usability und Upgradeability) [De Fazio, 2019].

Die nächste Stufe nach der Reparatur ist die Überholung (eng.: Reconditioning) eines Produktes, dabei existieren verschiedene Auffassungen, was die genaue Definition von Überholung ist. Der „British Standard“ definiert die Überholung und Runderneuerung gemeinsam als „[to] return a used product to a satisfactory working condition by rebuilding or repairing major components that are close to failure, even where there are no reported or apparent faults in those components“, also die Reparatur oder Aufarbeitung, ohne dass spezifische Defekte schon aufgetreten sind [British Standard, 2009]. Auch Gharfalkar et al. kommen in ihren Untersuchun-

gen zu dem Schluss, dass „Recondition“ und „Refurbish“ sehr nah beieinanderliegen und daher weiter untersucht werden müssen, um dessen Unterschiede und hierarchische Ordnung festzustellen [Gharfalkar et al., 2016]. Von der Einordnung liegt die Überholung dann zwischen der Reparatur und der Runderneuerung, besitzt aber im Gegensatz zu einem runderneuterten Produkt noch keine neue Außenhülle und ist daher optisch in einem gebrauchten Zustand [M. King, 2006].

Das Runderneuern (eng.: Refurbishing) ist die nächste Stufe, auf der die komplette Funktionsfähigkeit des Produktes wiederhergestellt und ebenfalls alle optischen Mängel beseitigt werden [Cambridge Dictionary, 2022]. „Refurbished“ Produkte sind beispielsweise oft in der Unterhaltungselektronik zu finden, z.B. bei namenhaften Herstellern von Smartphones [Apple, 2022]. Laut Ziout et al. können bei einer Runderneuerung auch neue Teile hinzugefügt werden, die das Produkt auf einen höheren Stand bringen als bei seiner ersten Nutzung [Ziout et al., 2014].

Die letzte Hierarchiestufe ist die Refabrikation (eng.: Remanufacturing), bei der Produkte oder Teile davon industriell wieder aufgearbeitet werden und am Ende auf dem gleichen Niveau von Neuteilen bzw. neuen Produkten sind [Lange, 2017]. Die Definition der Europäischen Kommission geht noch einen Schritt weiter und sagt aus, dass das Produkt entweder wie neu oder sogar besser in seinen Eigenschaften und Funktionen ist [European Commission, 2015]. In der in Abb. 2.11 beschriebenen Reihenfolge, angefangen von der direkten Wiederverwendung, gefolgt von der Reparatur, bis hin zur Refabrikation, steigt stetig die Qualität des wiederaufbereiteten Produktes, aber auch die eingesetzte Energie und verwendete Ressourcen sowie Kosten an. Es existiert in einigen Ländern oder Märkten allerdings die Schwierigkeit, dass „remanufactured“ Produkte nicht mehr als neu angeboten werden dürfen, wie z.B. in England [Gehin et al., 2008].

Sämtliche von Gharfalkar et al. präsentierten Strategien haben das gemeinsame Ziel, ein schon vorhandenes Produkt durch verschiedene Aufarbeitungsstufen wieder in seine Nutzungsphase zu bringen für einen weiteren Lebenszyklus [Gharfalkar et al., 2016]. Bei den lebensverlängernden Maßnahmen von Potting et al. kommt zusätzlich noch das dort genannte „R7 Repurpose“ hinzu, welches sich inhaltlich komplett mit dem von Balwan präsentierten deckt, auch hier ist gut zu sehen das je nach Verfasser des R-Systems oftmals Gemeinsamkeiten zwischen diesen bestehen [Potting et al., 2017, Balwan et al., 2022].

Potting et al. haben ein zehn R-System entwickelt, welches logischerweise neben

den hier schon beschriebenen fünf R fünf Erweiterungen aufweist [Potting et al., 2017]. Unter dem Punkt „Refuse“ kommt neu die Methode „Rethink“ zum Tragen, bei der die Anwendung und auch die Funktionalität der Produkte nachhaltiger gestaltet werden [Potting et al., 2017]. Gerade der Bereich „Extend lifespan of product and its parts“, welcher mit dem Re-Use als Strategie beginnt, wird deutlich erweitert. Als letzte Ergänzung bei der 10 R-Strategie haben Potting et al. unter der Strategie „Recycle“ noch den Punkt „Recover“ hinzugefügt, bei dem im letztem Schritt eine thermische Verwertung für Produkte angestrebt werden soll und keine Deponierung [Potting et al., 2017].

## 2.7 Obsoleszenz von Produkten

Am Lebensende eines Produktes wird auch oft von „Obsoleszenz“ gesprochen. Der Begriff leitet sich von dem lateinischen „obsolescere“ ab und kann mit Abnutzung oder Altwerden übersetzt werden [Eisenriegler et al., 2020, Pfannmöller, 2018]. Wenn, wie in Kap. 2.4, in der Definition von Bender und Gericke eine Außerbetriebnahme vorgesehen ist, wird in anderen Worten die Lebensdauer des Produktes geplant bzw. festgelegt [Bender und Gericke, 2021]. In diesem Zusammenhang wird von „geplanter Obsoleszenz“ gesprochen, also der definierten Begrenzung der Lebenszeit eines Produktes durch den Hersteller. Die geplante Obsoleszenz wird von Herstellern genutzt, um schneller neue Geräte zu verkaufen und so einer Marktsättigung vorzubeugen [Eisenriegler et al., 2020]. Der Ausfall der Produkte liegt dabei meistens nur an wenigen Einzelteilen, die mit einem Defekt zum Verlust der Primärfunktion führen, ähnlich wie Softwareupdatebeschränkungen, die eine sinnvolle Weiternutzung des Produktes verhindern [Eisenriegler et al., 2020].

Der Begriff der Obsoleszenz wurde dabei aber nicht durch Verbraucher, sondern eher durch die Wirtschaft selbst definiert. So sprach der Ökonom Bernard London im Jahr 1932 von Obsoleszenz als „ein wirtschaftliches Instrument und Ausweg aus der damals vorherrschenden Depression“ [Poppe und Longmuß, 2019]. Er wollte das Ganze als Gesetz verankern lassen und Konsumenten in die Pflicht nehmen, kontinuierlich neue Produkte zu kaufen, um so die wirtschaftliche Depression der damaligen Zeit abwenden zu können. Sein konkreter Vorschlag sah die amtliche Zerstörung von Produkten nach einer bestimmten Zeit oder eine Besteuerung der Weiternutzung

nach der bestimmten Zeit vor [Poppe und Longmuß, 2019]. Auch wenn der Ansatz Londons zuerst radikal erscheinen mag, so ist ein herbeigeführtes Überkonsumverhalten schon oft ein probates Mittel gewesen, um die Wirtschaft eines Landes nach einer Rezession wieder zu stärken. In Amerika wurde nach dem zweiten Weltkrieg ein Überkonsum herbeigeführt, um so der lokalen Industrie zu helfen. Dabei wurde teilweise konkret beworben, dass der Konsum zu mehr Sicherheit im Land und einer gesunden Industrie führt [Cohen, 2004]. Auch in Mitteleuropa konnte dieser Überkonsum in den 1960er- und 70er Jahren beobachtet werden [Wieser und Troeger, 2015]. Dieser Überkonsum wurde auch durch eine geplante Obsoleszenz herbeigeführt, so sprachen sich zu dieser Zeit Designer für die Anwendung von geplanter Obsoleszenz aus und Autohersteller wie General Motors begannen, jährlich neue Modelle auf den Markt zu bringen, um so die Neuverkäufe auf einem hohen Niveau halten zu können [Poppe und Longmuß, 2019].

Die geplante Obsoleszenz kann dabei durch verschiedene Vorgehensweisen herbeigeführt werden und wird laut Packard in drei verschiedene Arten unterteilt, die funktionelle, qualitative und psychologische Obsoleszenz [Packard, 1960]. Bei der funktionellen Obsoleszenz werden in sehr kurzen Zeitabständen neue Produkte mit neuen Funktionen auf den Markt gebracht, um das aktuelle Produkt alt erscheinen zu lassen. Der erhöhte Verschleiß und das damit verbundene frühzeitige Versagen eines Produktes bezeichnet Packard mit der qualitativen Obsoleszenz [Packard, 1960]. Als letztes definiert er die psychologische Obsoleszenz, dabei wirkt ein Produkt oftmals aus modischen oder designtechnischen Gründen veraltet [Packard, 1960].

Erst später bekam der Begriff (geplante) Obsoleszenz eine negative Konnotation, beginnend durch die Erkenntnisse in der Nachhaltigkeit. Eines der jüngeren Werke ist der Film „Kaufen für die Müllhalde“ (eng.: Originaltitel: „The Light Bulb Conspiracy“) von Cosima Dannoritzer, in dem z.B. das sog. Glühbirnenkartell oder die Verschlechterung der Haltbarkeit von Nylonstrumpfhosen aufgezeigt werden [Dannoritzer, 2010]. In Frankreich wurde aus diesem neuen Verständnis für Obsoleszenz das „Halte à l’Obsolescence Programmée“ (HOP) (eng.: Stop to Planned Obsolescence) gegründet, das mittlerweile mehr als 70.000 Unterstützer hat [Halte à l’Obsolescence Programmée, 2022]. Einige Mitarbeiter des HOP’s haben wiederum mit an dem aktuell in Frankreich aktiven Reparierbarkeitsindex gearbeitet, mit dem einige Produktgruppen gekennzeichnet werden müssen [Halte à l’Obsolescence Programmée, 2022]. Auch die neueren Änderungen von Gesetzen (Kap. 2.3.1) haben oft

den Hintergrund, die Obsoleszenz von Produkten zu verzögern. Die Methoden um Obsoleszenz abzuwenden bzw. zu verlangsamen, können final in den R-Strategien (Kap. 2.6) wiedergefunden werden [Prakash et al., 2016b].

## 2.8 Lebenszyklusanalyse (LCA)

Seit den WCED-Konferenzen (siehe Kap. 2.1) wurde der Nachhaltigkeitsbegriff immer feiner definiert. Um zu bewerten, ob ein Produkt oder ein Prozess als nachhaltig gilt, muss dieses unter bestimmten Gesichtspunkten analysiert werden, die Methoden dafür werden als „Life Cycle Thinking“ (LCT) Methoden benannt [Arzoumanidis et al., 2020]. Innerhalb der LCT-Methoden gibt es wiederum verschiedene weitere. Zu nennen wären die LCA, welches sich auf die ökologischen Aspekte richtet, während ein Social Life Cycle Assessment (S-LCA) (dt.: soziale Lebenszyklusanalyse), die sozialen Aspekte analysiert [Arzoumanidis et al., 2020]. Die Lebenszyklusanalyse als solche wurde in den 1980er bis 1990er Jahren das erste Mal wissenschaftlich entwickelt und festgehalten [Hauschild et al., 2018]. In den folgenden Jahren wurde die LCA stetig weiterentwickelt, bis sie in der DIN EN ISO 14040 (siehe Kap. 2.3.2) als Norm festgehalten wurde [Hauschild et al., 2018].

Da die zuvor beschriebene DIN EN ISO 14040 sehr allgemeingültig und dadurch auch ungenau angewendet werden kann, hat die Europäische Kommission 2010 das „International Life Cycle Data system“ (ILCD) veröffentlicht, was als Zusatz zu der DIN EN ISO 14040 verstanden werden kann, um diese genauer und besser durchführen zu können [European Commission, 2010]. Die ILCD-Richtlinien bieten gerade bei der methodischen Unterstützung ein viel detaillierteres Niveau als die angesprochene Norm [Hauschild et al., 2018]. Die einzelnen Phasen der Lebenszyklusanalyse decken sich mit den in Kap. 2.3.2 schon genannten aus der DIN EN ISO 14040, also der Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens, der Sachbilanz, der Wirkungsabschätzung, der Auswertung und der Anwendung, welche im Folgenden genauer analysiert werden [DIN e. V., 2021a]. In Grafik 2.12 ist der iterative Ansatz einer Lebenszyklusanalyse nach der ILCD zu sehen.

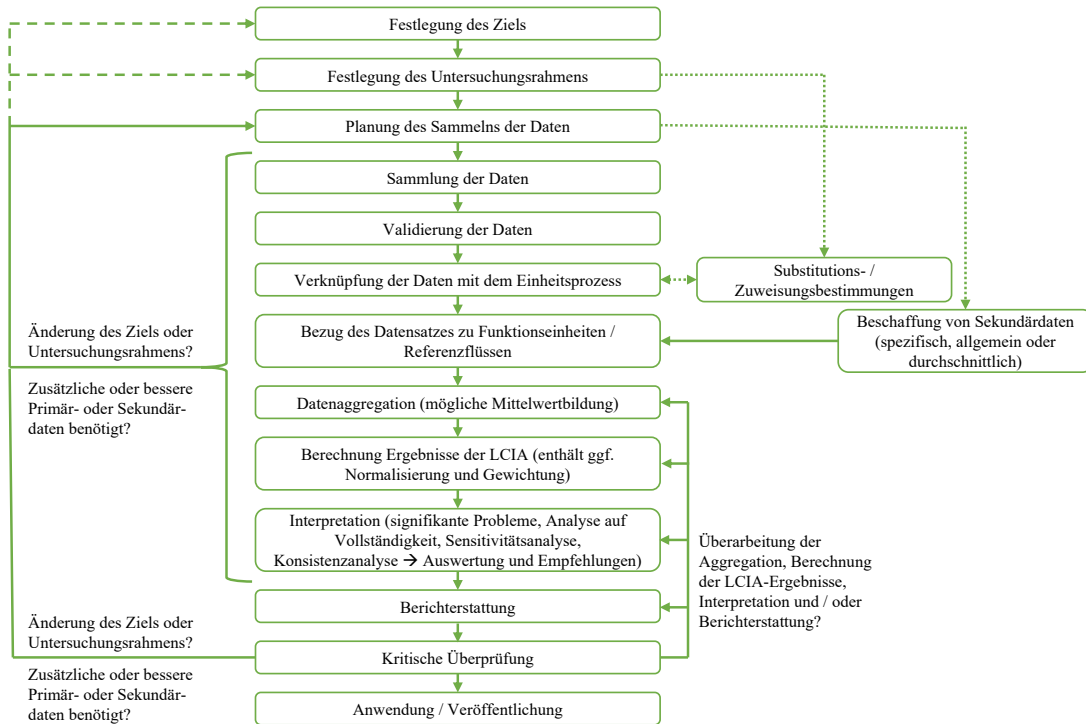


Abbildung 2.12: Iterativer Ansatz zur Erstellung einer Lebenszyklusanalyse. Eigene Darstellung in Anlehnung an [European Commission, 2010]

### 2.8.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Für die Festlegung des Ziels wird bei LCAs zuerst die funktionelle Einheit (eng.: functional unit) bestimmt, welche eine messbare, quantifizierbare Beschreibung der Funktion des Produktes darstellt und als Grundlage für weitere Berechnungen bei der Wirkungsabschätzung dient [Berwald et al., 2020]. Die funktionelle Einheit wird dabei z.B. oft als Masse, Stückzahl, Energie, Fläche, Volumen, ökonomischen Nutzen oder anderen messbaren Werten definiert [Arzoumanidis et al., 2020].

Als nächster Schritt sollte der Untersuchungsrahmen festgelegt werden, dabei geht es darum zu definieren, welche Prozesse und Aktivitäten zum betrachteten Lebenszyklus gehören und welche nicht [Hauschild et al., 2018]. Nach der Festlegung des Untersuchungsrahmens sollten die Annahmen und Parameter ausgewählt werden, die das Produkt am Ende ideal beschreiben [Berwald et al., 2020]. Als nächster Schritt sollten die benötigten Daten, die Beschaffung dieser und auch deren Qualität bzw. Umfang geplant werden [European Commission, 2010]. Bei den Informationen aus

## 2 *Stand der Technik*

den beschriebenen Daten geht es auch um Aspekte wie Ort oder Zeit der Erzeugung der Daten und die Quelle dieser [Berwald et al., 2020]. Wurden die Daten erfasst und validiert, können diese mit dem zu analysierenden Produkt und den betroffenen Teilprozessen aus der Festlegung des Untersuchungsrahmens in Verbindung gebracht werden, um in einem nächsten Schritt auch mit der vorher bestimmten funktionellen Einheit verknüpft zu werden [European Commission, 2010].

Als letzter Punkt ist die Art des Berichtes zu nennen, je nachdem was betrachtet werden soll oder ob die Studie anderen Studien untergeordnet werden soll, sowie anschließende Veröffentlichung dieser, am besten mit allgemeinverständlichen und messbaren Ergebnissen, z.B. GWP, Toxizität oder andere Werte [Berwald et al., 2020].

### 2.8.2 **Sachbilanz**

Die Erstellung der Sachbilanz wird im englischen „Inventory analysis“ genannt [DIN e. V., 2021a]. Dieser Schritt wird in einigen Quellen auch „Life Cycle Inventory“ (LCI) genannt und ist laut Klöpffer die zentrale und wissenschaftlichste Phase bei der Durchführung einer Lebenszyklusanalyse [Berwald et al., 2020, Klöpffer, 1997]. In dieser Phase werden alle Aktivitäten, die in irgendeiner Weise mit der Realisierung der zuvor definierten funktionellen Einheit in Zusammenhang stehen, erfasst und in einer Bilanz bzw. einem Inventory zusammengetragen [Klöpffer, 1997]. Die beschriebenen Aktivitäten beziehen sich dabei auf alle physischen In- und Outputs, wie Ressourcen, Material, Halbzeuge, Energie oder auch Emissionen, Müll und Einzelteile, welche in Zusammenhang mit dem vorher definierten Untersuchungsrahmen und der funktionellen Einheit des Produktes stehen [Hauschild et al., 2018].

### 2.8.3 **Wirkungsabschätzung**

Für die Erstellung der Wirkungsabschätzung wird das zuvor erstellte Life Cycle Inventory als Basis genommen. An diesem Punkt in der Lebenszyklusanalyse sollen von den zuvor erwähnten physischen In- und Outputs, die bei dem Produkt entstehen, Auswirkungen auf die Umwelt ermittelt werden [Hauschild et al., 2018]. Im Englischen wird diese Phase auch „Impact Assessment“ oder, in Bezug auf die vorangegangene Phase, „Life Cycle Impact Assessment“ (LCIA) genannt [Berwald

et al., 2020]. Die Wirkungsabschätzung besteht laut der DIN EN ISO 14040 aus fünf einzelnen Elementen, wobei drei davon obligatorisch bei der Erstellung einer Ökobilanz sind [DIN e. V., 2021a]. Bei den beschriebenen Elementen handelt es sich um die Auswahl repräsentativer Parameter aus dem Untersuchungsrahmen, der Klassifizierung von Elementarflüssen, die aus dem LCI hervorgehen, der Charakterisierung durch Umweltmodelle, um Auswirkungen quantifizieren zu können und den beiden nicht obligatorischen Punkten, der Normalisierung der Ergebnisse, um eine Vergleichbarkeit zu erreichen und einer Gruppierung und Gewichtung, um Ergebnisse im Zweifel einfacher verständlich aufzubereiten [Hauschild et al., 2018]. Die in der Wirkungsabschätzung erstellten Ergebnisse helfen, die Ergebnisse der LCI einzugruppieren und vergleichbar mit ähnlichen Produktsystemen zu machen. Bei der Klassifizierung werden z.B. die lokalen physikalisch messbaren Ergebnisse, wie z.B. CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> oder N<sub>2</sub>O in das Global Warming Potential umgerechnet, um einen einfacheren Vergleich zu ermöglichen [Klöpffer, 1997].

### 2.8.4 Auswertung und Anwendung

Die Auswertung und die Anwendung sind die letzten Schritte einer Lebenszyklusanalyse. Die Auswertung ist dabei die zusammenfassende Analyse aus den vorangegangenen Schritten der LCA, welche in Zusammenhang gebracht und gemeinsam genutzt werden, um die Fragen aus der anfänglichen Zieldefinition zu beantworten [Hauschild et al., 2018]. Die Auswertung ist dabei neu zur Lebenszyklusanalyse hinzugekommen, als diese in den ISO-Normen zur Ökobilanzierung abgebildet worden ist [Klöpffer und Grahl, 2009]. In diesem Schritt soll die durchgeführte LCA noch einmal kritisch betrachtet werden, um bei der Durchführung ggf. aufgetretene Fehler oder Probleme zu ermitteln und bei einer erneuten Durchführung mit berücksichtigen zu können [Klöpffer und Grahl, 2009]. In der Anwendung werden alle Erkenntnisse und Rückschlüsse aus der erzeugten Lebenszyklusanalyse eingesetzt, um z.B. das betrachtete Produkt weiterzuentwickeln oder zu verbessern, oder auch um verschiedene Prozesse im Unternehmen weiter zu verbessern [Berwald et al., 2020, DIN e. V., 2021a].

Auf Basis von Lebenszyklusanalysen werden aktuell viele Nachhaltigkeitsbewertungen bzw. Ökobilanzen erstellt. Diese können dabei mit unterschiedlichen Systemen durchgeführt werden, wie z.B. den DIN EN ISO 14044 und DIN EN ISO

## *2 Stand der Technik*

14044 Normen, wie auch mit den Erweiterungen des ILCD-Handbuchs. Das aktuelle Vorgehen in der Forschung wird im folgenden Kap. 3 beschrieben.

### 3 Aktuelle Forschung

Nachdem im Kapitel „Stand der Technik“ (Kap. 2) Nachhaltigkeits-, gesetzliche und regulatorische Grundlagen der Ökobilanzierung präsentiert wurden, soll in diesem Kapitel gezielt die Erstellung von Ökobilanzen unter verschiedenen Gesichtspunkten vertieft betrachtet werden. Die DIN EN ISO 14040 und 14044, die schon im Kapitel 2.8 betrachtet wurden, sind für den aktuellen Stand der Forschung Ausgangspunkt, da die Normen die Grundlage für die Ökobilanzierung von Produkten darstellen. Auch wenn die Normierung bzw. Standardisierung das Ziel der Vereinheitlichung inne hat, so wird in der DIN EN ISO 14040 als eine grundsätzliche Eigenschaft der Ökobilanz geschrieben „der relative Charakter ist darauf zurückzuführen, dass die Methodik auf die funktionelle Einheit bezogen ist“ und weiter „Detaillierungsgrad und Zeitrahmen einer Ökobilanz können sich in Abhängigkeit von der Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens beträchtlich unterscheiden“ [DIN e. V., 2021a].

Die funktionelle Einheit ist, wie die Systemgrenze, Teil des Untersuchungsrahmens und maßgeblich für den Output der Ökobilanz, da hier ein Bezug zu den Inputs definiert wird. In der DIN EN ISO 14044 wird sie als notwendige Angabe charakterisiert, da hier eine Bezugsgröße angegeben wird, um In- und Outputdaten zu normieren und so vergleichbar zu machen [DIN e. V., 2021b]. Weiter wird dazu in Punkt 5.2.2 der DIN EN ISO 14040 geschrieben „[d]ie Vergleichbarkeit der Ergebnisse von Ökobilanzen ist besonders dann kritisch zu prüfen, wenn unterschiedliche Systeme bewertet werden, damit die Durchführung derartiger Vergleiche auf einheitlicher Grundlage sichergestellt wird[.]“ [DIN e. V., 2021a].

Gerade die Vergleichbarkeit der Ökobilanzen untereinander soll im späteren Verlauf genauer analysiert werden, da sowohl die DIN EN ISO 14040 als auch 14044 keine exakte inhaltliche Beschreibung liefern, was funktionelle Einheit oder auch Systemgrenze betreffen. Um diese Unschärfe in der Berichterstattung innerhalb der vorliegenden Normen besser darzustellen, wird im Folgenden analysiert, wie andere wissenschaftlich arbeitende Autoren bei der Ökobilanzierung vorgehen, also mithilfe

welcher Merkmale innerhalb der Life Cycle Inventory's eine Ökobilanz erstellt wird. Im nächsten Schritt wird dann die Herangehensweise der Nachhaltigkeitsbewertung innerhalb der Veröffentlichungen genauer untersucht, um das praktische Vorgehen bei Lebenszyklusanalysen in wissenschaftlichen Veröffentlichungen mit dem theoretischen aus den Normen zu vergleichen.

## 3.1 Wissenschaftlicher Stand der Nachhaltigkeitsbewertung

Bevor für die Ökobilanzierung die Sachbilanz und damit verbunden die Wirkungsabschätzung erstellt werden können, werden unter anderem die funktionale Einheit sowie die Systemgrenze benötigt, um den Untersuchungsrahmen festzulegen [DIN e. V., 2021a]. Müssen die Ergebnisse diverser Nachhaltigkeitsbewertungen verglichen werden, sollte zunächst der Untersuchungsrahmen der jeweiligen Ökobilanz betrachtet werden. Wenn sich dieser schon grundlegend von anderen Untersuchungsrahmen unterscheidet, ist davon auszugehen, dass auch die Wirkungsabschätzung der analysierten Ökobilanzen grundlegend anders ausfallen kann.

Einer der ersten Punkte, der in Publikationen über Ökobilanzen beschrieben wird, ist der sogenannte „Scope“ (dt. Umfang), womit bei der Ökobilanz die betrachteten Lebensphasen eines Produktes gemeint sind [Klöppfer und Grahl, 2009]. Auch wenn die DIN EN ISO 14040 im Normalfall den Cradle-to-Grave- bzw. Cradle-to-Cradle-Ansatz verfolgt, werden im Scope bei Veröffentlichungen zu dem Thema schon erste Unterschiede gemacht. Sánchez et al. betrachten in ihrer Ökobilanzierung z.B. die Phasen der Rohstoffgewinnung, Produktion, Transport, Nutzung und End-of-Life [Sánchez et al., 2022]. Rüdénauer und Prakash verwenden in ihrer Bilanzierung nicht die Phasen des Transports und End-of-Life [Rüdénauer und Prakash, 2020]. Die Berücksichtigung einzelner Phasen wird unter anderem in verschiedenen Szenarios innerhalb einer Ökobilanz gesteuert, so betrachten Prakash et al. z.B. bei der Ökobilanzierung eines Notebooks in verschiedenen Szenarios die fünf genannten Phasen, aber teilweise Nutzung und End-of-Life als Phasen nicht [Prakash et al., 2012]. Die genannten Szenarios beschreiben ein zu analysierendes Produkt meistens mit leicht veränderlichen Rahmenbedingungen, dabei wird z.B. die Dauer der Nutzungszeit, gemachte Reparaturen und Austausche oder auch verschiedene End-of-Life-Optionen

### 3.1 Wissenschaftlicher Stand der Nachhaltigkeitsbewertung

leicht variiert, um einen anderen Zustand bzw. ein anderes Szenario zu beschreiben. Die Szenarios werden dann bis zur Wirkungsabschätzung bilanziert und besitzen so alle eine einzigartige Ökobilanz innerhalb einer wissenschaftlichen Quelle. Sánchez et al. gehen in ihren Szenarios z.B. auf eine verschieden ausgeprägte Nutzungsdauer und unterschiedliche Reparatur- und Austauschstrategien ein [Sánchez et al., 2022].

Bei einer Analyse von Arzoumanadis stellte sich heraus, dass bei vielen Lebenszyklusanalysen die funktionelle Einheit nicht detailliert beschrieben wird und so Unsicherheiten in der Ökobilanzierung entstehen [Arzoumanidis et al., 2020]. Seine Studien zeigen ebenfalls, dass die funktionelle Einheit nicht immer mit veröffentlicht wird, auch wenn die betrachtete LCA in einem gleichen oder ähnlichen Produktbereich gemacht wurde [Arzoumanidis et al., 2020]. Dies führt weiter zu Unsicherheiten in der Ökobilanzierung und außerdem zu einem mangelnden Vergleich dieser untereinander. Als Beispiel für Scope und funktionelle Einheit könnte die Herstellung eines Motors beschrieben werden. Im Scope wird definiert, welche Phasen betrachtet werden sollen, also z.B. die Rohmaterialgewinnung, Produktion und Transport. Für die funktionelle Einheit wird der Motor mit der Stückzahl eins und einem Gewicht von 200 kg definiert, um ihn später zu untersuchen.

Auch das Handbuch der ILCD bietet erweiterte Unterstützung was die Qualität der Daten und ihre Herkunft betrifft für ein erstelltes LCI. Der Inhalt wird für alle möglichen Produkte gemeinsam grob beschrieben mit einem Verweis auf Primär- und Sekundärdaten. Dabei sollten Primärdaten vorgezogen werden [European Commission, 2010]. Gerade diese Herkunft der Daten ist in vielen Arbeiten oft verschieden. So nutzen Sánchez et al. für ihre Ökobilanz z.B. das GaBi Data Set der Software „Sphera GaBi“ während Cordella et al. z.B. Daten aus ecoinvent 3.5 als Grundlage für ihre Bilanzierung nehmen [Sánchez et al., 2022, Cordella et al., 2021a]. Innerhalb der Datenbanken selber können dann je nach vorliegenden Informationen und Umfang der Datenbank verschiedenste Quellen benutzt werden. Dabei gibt es verschiedene Fälle von unterschiedlichen Datentypen, der erste ist eine komplette spezifische Komponente, also z.B. ein Motor eines gewissen Typs, der von einer speziellen Firma gebaut wird. Für diese Art von Daten werden meistens herstellerspezifische Informationen benötigt, weshalb solche eher in Ökobilanzen von Unternehmen selber oder solche, die im Auftrag für Unternehmen gemacht wurden, zu finden sind. Falls diese Informationen nicht vorliegen, können auch generische Datenquellen verwendet werden, also im zuvor angesprochenen Beispiel nur noch ein Motor mit vielleicht einer

### 3 Aktuelle Forschung

Leistungsangabe, der herstellerunabhängig als Quelle vorhanden ist. Die Quelle eines generischen Motors ist natürlich deutlich ungenauer in der Datenqualität, da die Bauweise von Motoren sich auch bei vergleichbarer Leistung grundlegend unterscheiden kann. Je nachdem welche Informationen und Möglichkeiten zur Untersuchung vorhanden sind, kann die Modellierung eines Einzelteils oder Produktes anhand seiner stofflichen Zusammensetzung und den verwendeten Fertigungsverfahren daher genauer sein. Sollten alle zuvor genannten Datenquellen nicht vorhanden oder modellierbar sein, können in vielen Datenbanken auch sogenannte „Proxies“ verwendet werden, wo dann z.B. eine Central Processing Unit (CPU) aus einem Laptop nur noch als „elektrische Komponente“ mit einem spezifischen Gewichtsanteil bilanziert wird, wie z.B. bei der Software Ansys Granta Selector vorhanden [Ansys, 2025]. Bei diesem Verfahren wird nur die ungefähre übergeordnete Produktfamilie des Produktes oder Teils ausgewählt. Bei der Ökobilanzierung kann es auch vorkommen, dass mehrere Arten dieser Datenquellen vermischt werden, so benutzen Sánchez et al. beispielsweise ganze Komponenten aus Herstellerinformationen, Modellierungen basierend auf Werkstoffanteilen und -fertigungsverfahren sowie generische Datensets [Sánchez et al., 2022]. In einer anderen Ökobilanz von Steiner et al. werden neben den zuvor genannten Datentypen auch noch Proxies benutzt, um fehlende Daten von Einzelteilen zu umschreiben [Steiner et al., 2005].

In vielen wissenschaftlichen Publikationen werden zudem noch Fertigungsstandort sowie Zielort für die Nutzungs- und ggf. End-of-Life-Phase angegeben, was wiederum in der Bilanzierung zu veränderten Ergebnissen führen kann, da dann der am jeweiligen Ort vorliegende Strommix mit seinem spezifischen CO<sub>2</sub>-Footprint als Berechnungsgrundlage herangezogen wird. Bei den Standorten werden teilweise Verallgemeinerungen angenommen, so sprechen Cordella et al. z.B. von einer Fertigung in China und einer Nutzung in ganz Europa, wobei der Strommix in Norwegen und Spanien z.B. sehr verschieden ist [Cordella et al., 2021a, Fraunhofer ISE, 2025a, Fraunhofer ISE, 2025b]. Ercan et al. gehen in ihrer Bilanzierung dazu über, den Nutzungsstandort als „global“ anzunehmen, so muss in diesem Fall der Strommix gemittelt auf der gesamten Erde angenommen werden, was eine gewisse Ungenauigkeit mit sich bringt [Ercan et al., 2016].

Bei der Betrachtung des wissenschaftlichen Stands der Nachhaltigkeitsbewertung liegt die Vermutung nahe, dass trotz der unterstützenden Richtlinien wie der DIN EN ISO 14040 und 14044, sowie dem erweiterten Rahmen der ILCD, ein nicht un-

### 3.1 Wissenschaftlicher Stand der Nachhaltigkeitsbewertung

beträchtlicher Freiraum für die Erstellung einer Ökobilanz bleibt, wodurch sowohl die Vorbetrachtung mit der funktionellen Einheit und Systemgrenze betroffen ist, als auch im Nachgang die eigentliche Wirkungsabschätzung und damit die erstellte Auswertung. Dabei gehen Autoren von wissenschaftlichen Veröffentlichungen zu Ökobilanzen auch teilweise dazu über, mehr als eine Datenbank zu verwenden und Quellen so in einen neuen, gemeinsamen Kontext zu stellen. Ercan et al. benutzen in der erstellten Ökobilanz z.B. sekundäre Daten aus „GaBi“, welche teilweise auf eigenen Datenbanken basieren sowie auf den Datenbanken von ecoinvent [Ercan et al., 2016]. Primäre Daten basierend auf jeweiligen Standorten aus Herstellerdaten, welche nicht öffentlich zugänglich sind, wurden ebenfalls verwendet [Ercan et al., 2016]. Dieses Vorgehen kann mehrfach beobachtet werden, so nutzen auch Proske et al. für ihre Ökobilanzierung eines Fairphone 3 Smartphones Daten aus verschiedenen Quellen und Datenbanken. Dabei werden - je nach Verfügbarkeit - Primärdaten von Herstellern, von Zulieferern bereitgestellte Materialzusammenstellungen einzelner Bauteile, sowie Komponenten aus GaBi und ecoinvent genutzt [Proske et al., 2020].

Betrachtet man die Nachhaltigkeitsberichtserstattung von wirtschaftlich arbeitenden Unternehmen, gibt es noch weitere Vorgehensweisen. Ein weit verbreitetes Verfahren sind die Global-Reporting-Initiative-Standards (GRI-Standards) [GRI, 2024a]. Entwickelt und veröffentlicht vom Global Sustainability Standards Board (GSSB) bieten die GRI-Standards einen Rahmen und Leitfaden, nach dem Unternehmen Kennzahlen bezogen auf die Nachhaltigkeit bilden und veröffentlichen können. Die GRI-Standards geben unter anderem beim Punkt der Vergleichbarkeit an, dass „die Methoden zur Messung und Berechnung von Daten sowie die Erläuterung der verwendeten Methoden und Annahmen einheitlich [zu] halten“ sind [GRI, 2024a]. Weiter sollen Maßeinheiten, Art und Weise der Darstellung und weitere Eigenschaften zwischen verschiedenen Analysen gleich gehalten werden, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Ein großer Unterschied zu den DIN EN ISO Normen sind die am Ende veröffentlichten Daten. Die GRI-Standards bieten für viele Themenfelder konkrete Angaben, welche Informationen durch das Unternehmen offengelegt werden müssen, um nach dem jeweiligen Standard zu berichten. So müssen im GRI-Standard 305-1 z.B. das „Bruttovolumen der direkten THG-Emissionen (Scope 1) in Tonnen CO<sub>2</sub>-Äquivalent“ veröffentlicht werden, wie auch biogene CO<sub>2</sub>-Emissionen, das Jahr der Berechnung, der Berechnungsgrundsatz sowie genutzte Zertifikate für

### 3 Aktuelle Forschung

Emissionshandel [GRI, 2024a]. Eine Art Life Cycle Inventory muss allerdings nicht veröffentlicht werden. Unter den Empfehlungen des GRI-Standards 305-1 gibt es den Hinweis, dass die Art der Quelle sowie Einrichtung mit veröffentlicht werden können, um eine Vergleichbarkeit zu ermöglichen [GRI, 2024a]. Der Standard 301-1 für eingesetztes Material und Gewicht hat als Anforderung nur das Gesamtgewicht des Materials, welches offengelegt werden muss und „zur Herstellung und Verpackung der wichtigsten Produkte [...] verwendet wurde[n]“, aufgeschlüsselt nach nicht erneuerbaren und erneuerbaren Materialien [GRI, 2024a]. Unter den Empfehlungen des 301-1 Standards wird weiter darauf hingewiesen, welche Materialarten bei der Berichterstattung mit einbezogen werden sollten, aber auch bei dieser Kennzahl gibt es kein Life Cycle Inventory, was als Berichtsgrundlage mit veröffentlicht werden müsste. So gibt das Unternehmen Bosch z.B. im Rahmen der GRI-Standards Kennzahlen zu 301-1 und 305-1 an und darüber hinaus nicht geforderte Informationen wie eine Aufschlüsselung nach Produktion und Fahrzeugflotte für die Treibhausgase, sowie beim Material eine Aufschlüsselung nach den Werkstoffen Aluminium, Kunststoff und Stahl [Wagner, 2019]. Das Unternehmen Siemens gibt in ihren Nachhaltigkeitsberichten z.B. nur die Scope 1 CO<sub>2</sub>-Emissionen ohne weitere Unterteilung oder Angaben an [Welter und Fink, 2024]. Die Berechnungsgrundlagen der präsentierten Standards werden dabei nicht offengelegt und der Leser kann die getroffenen Aussagen im Nachhaltigkeitsbericht nicht weiter überprüfen, was auch den Vergleich mit anderen Bilanzierungen nicht möglich macht.

## 3.2 Zielgrößen der Nachhaltigkeitsbewertung

Neben den im vorherigen Kapitel präsentierten Inputs, die die Grundlage einer Nachhaltigkeitsbewertung darstellen, sind die Zielgrößen, die bei den Bilanzierungen am Ende berechnet werden entscheidend, da diese am meisten präsentiert und nach außen getragen werden. In der DIN EN ISO 14044 spricht man dabei von Wirkungsindikatoren, welche aus den Sachbilanzergebnissen abgeleitet werden können [DIN e. V., 2021b]. Die Norm bietet einen umfangreichen Hintergrund für die Begrifflichkeiten und das Konzept rund um den zuvor definierten Wirkungsindikator. So werden aus den Sachbilanzergebnissen die zu betrachtende Wirkungskategorie festgelegt und die Ergebnisse zugeordnet. Mittels eines Charakterisierungsmodells

### 3.2 Zielgrößen der Nachhaltigkeitsbewertung

werden aus den Ergebnissen der Sachbilanz die Wirkungsindikatoren abgeleitet, welche dann eine Umweltrelevanz beschreiben und spezifischen Wirkungsendpunkten zugeordnet werden können, wie in Abbildung 2.7 in Kapitel 2.3.2 gezeigt [DIN e. V., 2021b].

Mithilfe aller für die DIN EN ISO 14044 gesammelten Daten aus dem Untersuchungsrahmen, der Sachbilanz sowie der Wirkungsabschätzung können dann in der Auswertung signifikante Parameter identifiziert und beurteilt werden [DIN e. V., 2021b]. Die Norm selbst gibt an dieser Stelle nur Beispiele für die Identifikation solcher signifikanten Parameter und nennt für die Wirkungskategorien z.B. den Ressourcenverbrauch und die Klimaänderung, sowie bei den Sachbilanzdaten „Energie, Emissionen, Einleitungen in Wasser, Abfall“ [DIN e. V., 2021b]. Einige wissenschaftlich arbeitende Autoren bedienen sich an den Empfehlungen aus dem ILCD-Handbuch der Europäischen Kommission, welche in Tabelle 3.1 zu sehen sind. Im ILCD-Handbuch sind die Wirkungsindikatoren als sogenannte „Midpoints“ im Prozess der Ökobilanzierung aufgeführt [European Commission, 2010].

Tabelle 3.1: Midpoints des ILCD-Handbuchs, entwickelt von [European Commission, 2010]

| Wirkungskategorien                  | Eigenschaft der Kategorie                                        | Einheitsgruppendaten<br>(mit Referenzeinheit)     |
|-------------------------------------|------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|
| Klimawandel                         | Massen-CO <sub>2</sub> -Äquivalente                              | Masseeinheiten (kg)                               |
| (Stratosphärischer) Ozonabbau       | Massen-CFC-11-Äquivalente                                        | Masseeinheiten (kg)                               |
| Humantoxizität                      | Comparative Toxic Unit for human (CTUh)                          | Gezählte Einheiten (Fälle)                        |
| Anorganische Stoffe in der Atemluft | Massen-PM2.5-Äquivalente                                         | Masseeinheiten (kg)                               |
| Ionisierende Strahlung              | Massen-U235-Äquivalente                                          | Masseeinheiten (kg)                               |
| (Bodennahes) Photochemisches Ozon   | Massen-C2H4-Äquivalente                                          | Masseeinheiten (kg)                               |
| Versauerung (Land und Wasser)       | Massen-H <sup>+</sup> -Äquivalente                               | Moleinheiten (mol)                                |
| Eutrophierung (Land und Wasser)     | Massen-N-Äquivalente                                             | Moleinheiten (mol)                                |
| Ökotoxizität                        | Comparative Toxic Unit for ecosystems<br>(CTUe) * Volumen * Zeit | Einheiten von<br>Volumen*Zeit (m <sup>3</sup> *a) |
| Landnutzung                         | Massendefizit an organischem<br>Kohlenstoff im Boden             | Masseeinheiten (kg)                               |
| Ressourcenverknappung               | Wasserverbrauch-Äquivalente                                      | Volumeneinheiten (m <sup>3</sup> )                |

Ercan et al. nutzen beispielsweise die vom ILCD empfohlenen Wirkungsindikatoren in ihrer Veröffentlichung [Ercan et al., 2016]. Proske et al. beschränken sich auf eine Auswahl daraus, den Klimawandel, Ressourcenverbrauch, Human- und Ökotoxizität [Proske et al., 2020]. Sánchez et al. nutzen die gleichen Wirkungsindikatoren wie Proske et al. was wahrscheinlich daran liegt, dass beide eine Ökobilanz im Auftrag des gleichen Unternehmens durchführen [Sánchez et al., 2022].

### 3 Aktuelle Forschung

Betrachtet man die GRI-Standards, so sind diese fortlaufend durchnummeriert und in drei große Bereiche für die Berichterstattung gegliedert. Bei den einstelligen Nummerierungen handelt es sich um universelle Standards wie z.B. Angaben über die berichtende Organisation, die immer angewendet werden sollten [GRI, 2024a]. Daneben gibt es die Branchenstandards, die zweistellig in ihrer Nummerierung sind, sowie die dreistellig numerischen Themenstandards [GRI, 2024a]. Bei den Branchen- und Themenstandards kann von den Unternehmen eine Auswahl getroffen werden, zu welchen Standards Berichte herausgegeben werden sollen. Der Aufbau und die hier verwendeten Themenstandards sind in Tabelle 3.2 zu sehen. Bei den Themenstandards gibt es wiederum 42 Unterkategorien, wie die zuvor genannten Standards 301 Materialien oder 305 Emissionen [GRI, 2024a]. Thematisch finden sich die Midpoints des ILCD in den GRI-Standards teilweise wieder, so wird im Standard 303 Wasser und Abwasser behandelt oder im Standard 306 Abwasser und Abfall [GRI, 2024a]. Dazu kommen viele Standards, die einen eher wirtschaftlichen Hintergrund haben, wie der Standard 207 Steuern, 401 Beschäftigung oder 202 Marktpräsenz [GRI, 2024a].

Tabelle 3.2: Auszug aus den GRI-Standards, nach [GRI, 2024a]

| Universelle Standards                                                                      | Branchenstandards                                 | Themenstandards               |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------|-------------------------------|
| GRI 1 - Anforderungen und Prinzipien für die Verwendung der GRI-Standards                  | GRI 11 - Öl- und Gasbranche                       | GRI 202 - Marktpräsenz        |
| GRI 2 - Angaben über die berichtende Organisation                                          | GRI 12 - Kohlebranche                             | GRI 207 - Steuern             |
| GRI 3 - Angaben und weiterführende Anleitungen zu den wesentlichen Themen der Organisation | GRI 13 - Landwirtschaft, Aquakultur und Fischerei | GRI 301 - Materialien         |
|                                                                                            |                                                   | GRI 303 - Wasser und Abwasser |
|                                                                                            |                                                   | GRI 305 - Emissionen          |
|                                                                                            |                                                   | GRI 306 - Abwasser und Abfall |
|                                                                                            |                                                   | GRI 401 - Beschäftigung       |

Wie schon im vorherigen Kapitel (Kap. 3.1) angesprochen, geben die GRI-Standards für die Themenstandards Anforderungen vor, welche Informationen offengelegt werden müssen, um nach dem jeweiligen Standard zu berichten. Sowohl die DIN EN ISO 14040 und 14044 Normen, als auch die GRI-Standards geben keinen wirklich engen

### 3.2 Zielgrößen der Nachhaltigkeitsbewertung

Rahmen vor, welche Outputs bei einer generellen Ökobilanz veröffentlicht werden sollten. Das ILCD-Handbuch bietet mehr Hinweise zu sinnvollen Wirkungsindikatoren, ist aber auch nur freiwillig anwendbar von Personen oder Organisationen, die eine Nachhaltigkeitsbewertung durchführen. Für Unternehmen hat die Europäische Union im Jahr 2022 noch die „Corporate Sustainability Reporting Directive“ (CSRD) veröffentlicht, welche die Berichtserstattung zu Nachhaltigkeitszielen von Unternehmen vereinheitlichen soll [European Union, 2022]. In der CSRD wurden wiederum die „European Sustainability Reporting Standards“ (ESRS) definiert, welche fortlaufend durch die EU aktualisiert und gepflegt werden. Bei der Erstellung der ESRS haben Autoren der GRI-Standards und ESRS zusammengearbeitet, um eine Interoperabilität beider Systeme zu gewährleisten und doppelte Arbeit zu verhindern [GRI, 2024b]. So besaß die erste Version der ESRS zwölf Standards, während das GRI System 40 Standards anbieten konnte, die durch ihre Ähnlichkeit sehr gut austauschbar sind [GRI, 2024b].

Es gibt dabei auch zentrale Größen, die sowohl im wissenschaftlichen als auch im unternehmerischen Kontext verwendet werden, um Ökobilanzierungen durchzuführen. Die größte Übereinstimmung hat dabei die Bewertung des Klimawandels, bzw. im englischen das GWP, welches in den meisten Veröffentlichungen in der Maßeinheit kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent (kg CO<sub>2</sub>-Äq) ausgedrückt wird und in allen in diesem Kapitel genannten Quellen als ein Wirkungsindikator bzw. Ergebnis der erstellten Ökobilanz genutzt wird. Dabei steht die Einheit „kg CO<sub>2</sub> eq“ für eine entsprechende, äquivalente Menge an kg CO<sub>2</sub>, welche in die Erdatmosphäre eingeleitet wird (siehe dazu Kap. 2.2), umgerechnet aus anderen Quellen. Der GRI-Standard 305-1 zu dem Thema direkte THG-Emission sagt, dass in die Berechnung für das CO<sub>2</sub>-Äquivalent „entweder CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O, FKW, PFKW, SF<sub>6</sub>, NF<sub>3</sub> oder alle“ Gase miteinbezogen werden sollen [GRI, 2024a]. Die DIN EN ISO Normen 14040 und 14044 verweisen in dem speziellen Fall des GWPs auf eine weitere Norm, die DIN EN ISO 14067, welche sich speziell mit der Messung von Treibhausgasen einzelner Produkte beschäftigt [DIN e. V., 2019]. Die DIN EN ISO 14067 sagt weiter aus, dass „alle[r] wesentlichen emittierten und entzogenen THG-Mengen im Verlauf des Produktlebenswegs oder der ausgewählten Prozesse entsprechend [...] zu berechnen [...]“ sind, geht aber nicht genauer darauf ein, ob spezifische Stoffe oder Gase betrachtet werden sollen [DIN e. V., 2019].

Eine weitere Größe, die in Standards, Normen und Veröffentlichungen zum Thema

### 3 Aktuelle Forschung

Ökobilanzierung häufig verwendet wird, ist die verbrauchte Energie. Sie wird normalerweise in der Einheit Joule (J) oder Wattstunde (Wh) angegeben und setzt sich dabei aus verschiedenen Energien innerhalb eines Produktlebenszyklus zusammen. Der GRI-Standard 302-1 behandelt den Energieverbrauch innerhalb einer Organisation. Als Anforderung steht die verbrauchte Energie zusammengefasst für den Strom-, Wärmeenergie-, Kühlenergie- und Dampfverbrauch [GRI, 2024a]. Diese Verbräuche werden als ein Gesamtwert in Joule, getrennt in erneuerbare und nicht erneuerbare Energie angegeben [GRI, 2024a]. Die DIN EN ISO 14040 und 14044 sprechen bei der Betrachtung des gesamten Lebenswegs eines Produktes auch von der Energieerzeugung und ordnen die Energieinputs allen anderen Inputs für die Ökobilanzierung zu [DIN e. V., 2021b, DIN e. V., 2021a]. Der Energieeintrag wird in der genormten Ökobilanz nur als ein weiterer Teil dieser gesehen und nicht weiter in erneuerbare und nicht erneuerbare Energien unterteilt. Eine durchgeführte Studie bei 20 großen Unternehmen wie z.B. BASF SE, Mercedes-Benz Group AG und Siemens AG kam zu dem Schluss, dass alle befragten Unternehmen Lebenszyklusanalysen durchführen, nur die Bereiche Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Äquivalent wurden bei allen Firmen in der Ökobilanz ausgegeben [Nygren und Antikainen, 2010].

Betrachtet man zu diesen beiden zentralen Größen, Energieverbrauch und CO<sub>2</sub>-Äquivalent, die schon eingangs in diesem Kapitel analysierten Veröffentlichungen, können die getroffenen Aussagen sehr gut übertragen werden. Alle in diesem Kapitel genannten Quellen, also Ercan et al., Sánchez et al., Proske et al. sowie Wagner, Welter und Fink berichten in irgendeiner Form über das Global Warming Potential mittels eines kg CO<sub>2</sub>-Äquivalents, je nach Veröffentlichung teilweise für ein Produkt oder ein gesamtes Unternehmen in einem definierten Zeitabschnitt [Ercan et al., 2016, Sánchez et al., 2022, Proske et al., 2020, Wagner, 2019, Welter und Fink, 2024]. Bei der verbrauchten Energie müssen die einzelnen Quellen, wie auch die Standards und Normen differenzierter betrachtet werden. Ercan et al. gehen bei ihrer Ökobilanzierung genauso wie die DIN EN ISO Normung nur indirekt auf die verwendete Energie ein, so werden in dieser Quelle der jeweilige Strommix vor Ort und Energieverbräuche für den jeweiligen Prozessschritt betrachtet und dann direkt in die Gesamtökobilanz eingerechnet [Ercan et al., 2016]. Proske et al. und Sánchez et al. geben in ihren veröffentlichten Daten im Scope 2 die eingekaufte Energie an, sowie auch teilweise in den Produktionsdaten von Einzelteilen, die für diesen Prozessschritt verwendete Energie [Proske et al., 2020, Sánchez et al., 2022]. Wagner

### 3.3 Ableitung der Forschungsfrage

gibt in dem Nachhaltigkeitsbericht der Bosch Gruppe die verbrauchte Energie für die gesamte Gruppe in Gigawattstunden pro Jahr an, aufgeschlüsselt in die Art der Energie und unterteilt in erneuerbare und nicht erneuerbare Energien [Wagner, 2019]. Im Nachhaltigkeitsbericht für das Unternehmen Siemens geben Welter und Fink den Energieverbrauch des Unternehmens in Gigajoule an, aufgeteilt nach Primär- und Sekundärenergie [Welter und Fink, 2024]. Anhand der beispielhaften Quellen zeigt sich, dass bei Nachhaltigkeitsberichten für Unternehmen, die den GRI-Standard anwenden, verbrauchte Energie meistens direkt angegeben wird. Bei eher wissenschaftlichen Quellen, die sich mehr an die DIN EN ISO 14040 und 14044 sowie das ILCD-Handbuch richten, wird Energie teilweise explizit und teilweise implizit angegeben.

Die beiden Größen Global Warming Potential, ausgedrückt in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent, und die verbrauchte Energie, angegeben in Joule oder Wattstunden, können in den meisten Veröffentlichungen wiedergefunden und daher als signifikant angesehen werden. Dabei hängen beide Größen maßgeblich vom Life Cycle Inventory ab, insbesondere von der funktionellen Einheit und der betrachtete Systemgrenze, die in Kap. 3.1 ausführlich beschrieben wurden. Die am Ende entstehenden Wirkungsindikatoren und daraus abgeleiteten Erkenntnisse sind vom Umfang des Betrachtungsrahmens und den bei den Eingangsgrößen getroffenen Annahmen und betrachteten Details abhängig.

### 3.3 Ableitung der Forschungsfrage

Eine Unschärfe in den für eine Ökobilanz gewählten Inputs führt zwangsläufig zu einer Unschärfe in den Outputs und somit zu einer Unschärfe in den zentralen Aussagen von Ökobilanzen. Auch wenn sich sowohl die DIN EN ISO Normen als auch die GRI-Standards in kleineren Abschnitten mit der Vergleichbarkeit der erstellten Analysen beschäftigen, gibt es keine genauen Aussagen dazu, wie eine Vergleichbarkeit über verschiedene Veröffentlichungen oder sogar verschiedene Produkte hinweg sichergestellt werden kann. Aufgrund der Erkenntnisse aus der aktuellen Forschung lässt sich folgende These annehmen:

### 3 Aktuelle Forschung

Durch die Unschärfe in Eingangs- und Ausgangsdaten ist die Aussagekraft, wie auch die Vergleichbarkeit der veröffentlichten Ergebnisse nicht signifikant.

Dieses Verhalten steht im Gegensatz zu den Bestrebungen, Endkunden durch Nachhaltigkeitssiegel oder auch wie in Frankreich durch normierte Reparaturindizes, darüber aufzuklären, wie groß die ökologische Wirkung eines gekauften Produktes wirklich ist [Halte à l'Obsolescence Programmée, 2022]. Gerade im Hinblick auf die im ersten Hauptabschnitt dieser Arbeit (Siehe Kap. 2) dargelegten Gründe für einen voranschreitenden Klimawandel und steigender CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft, sollte es im Interesse der Allgemeinheit sein, Ökobilanzierungen von Produkten und Unternehmen so transparent, vergleichbar und aussagekräftig wie möglich zu machen.

Die abgeleitete Forschungsfrage aus der postulierten These ist dann:

Wie vergleichbar sind die Ergebnisse von Ökobilanzen aufgrund der Unschärfe von Eingangs- und Ausgangsdaten?

Die hier dargelegte Forschungsfrage soll daher in dieser Arbeit auf ihre Validität untersucht werden. Dafür werden verschiedene Produktgruppen und innerhalb der Produktgruppe mehrere Quellen auf ihre Nachhaltigkeitsmerkmale hin untersucht.

## 4 Vorgehen

Die zuvor aufgestellte Forschungsfrage zur Vergleichbarkeit und Aussagefähigkeit aktuell erstellter Ökobilanzen muss weiter untersucht werden. Dafür wird zunächst ein Betrachtungsrahmen festgelegt. Dabei sollen verschiedene Produkte, im Idealfall aus verschiedenen Produktgruppen, auf ihre Nachhaltigkeitsmerkmale und Ökobilanzierungen hin untersucht werden. Für ein umfassenderes Bild und tiefere Analyse bietet es sich an, weitere Informationen zu dem jeweiligen Produkt aufzunehmen. Mit diesen Informationen können getroffene Aussagen besser validiert werden. So wird eine Vergleichbarkeit zwischen Produkten und Produktgruppen gewährleistet, bzw. Schnittstellen dargestellt, wo ein Transfer hin zu anderen Produktgruppen existiert. Die aufgestellte These muss zur Validierung mit Bezug zu einem breiten Spektrum verschiedener Produkte und Produktgruppen untersucht werden. Nur so ist eine allgemeine Aussage möglich. Die analysierten Produkte und deren Gruppen wurden daher gezielt ausgewählt und werden im Folgenden detaillierter beschrieben. Daher wird in den kommenden Kapiteln zunächst die Wahl der Produktgruppen hergeleitet, bevor für diese dann eine Datenbasis aufgebaut und erklärt wird.

### 4.1 Auswahl der Produktgruppen

Die Auswahl der Produktgruppen sollte möglichst ganzheitlich erfolgen, wobei mit ganzheitlich die Betrachtung der folgenden Merkmale gemeint ist. Dabei können einzelne Produkte wie z.B. verschiedene Smartphones einer übergeordneten Produktgruppe zugeordnet werden. Darüber hinaus lassen sich mehrere Produktgruppen zu übergeordneten Hauptgruppen zusammenfassen, wie später zu sehen sein wird. Dabei wird eine erste Relevanz ermittelt, welche Produktkategorien ein starkes Wachstum bei den Verkäufen besitzen. Ebenfalls muss das daraus generierte Abfallaufkommen betrachtet werden, da gerade nicht mehr genutzte Produkte ein Problem für die Umwelt darstellen [Forti et al., 2020]. Als sinnvoll erachtet ist eine

#### 4 Vorgehen

langlebige Produktgruppe, die im Vergleich zu einer anderen nicht stark konsumgeprägt ist, sondern nur neu angeschafft wird, weil ein vorhandenes Produkt kaputt und nicht mehr nutzbar ist. Ein Beispiel dafür könnten z.B. Kühlschränke sein, die eine lange Lebensdauer besitzen und nicht frühzeitig wie z.B. Smartphones ersetzt werden [Bakker et al., 2014a]. Dieser Gegensatz kann einen Mehrwert bieten, da solche Produkte anders in ihrem Aufbau sind, als schnelllebige und konsumgetriebene Produkte.

Ein weiterer Punkt für die Auswahl der Produktgruppen können schon vorhandene Bewertungssysteme für Nachhaltigkeit, sowie bestehende Normen und Empfehlungen sein und deren regulierte Produkte sein. Die Auswahl der Produktgruppen in diesen Bewertungssystemen und Normen sollte zumeist aus wissenschaftlich sinnvollen Argumenten erfolgt sein und kann in Teilen für die Produktauswahl in dieser Arbeit übernommen werden. Da gerade der CO<sub>2</sub>-Footprint bzw. das GWP eine maßgebliche Einheit für die Ökobilanzierung ist, muss auch in diesem Fall darauf geachtet werden, dass Produktgruppen genommen werden die generell aus einem Sektor kommen, der signifikante Mengen an CO<sub>2</sub> ausstößt. Die Kriterien für die Auswahl der Produktgruppen sind in Tabelle 4.1 zusammengefasst.

Tabelle 4.1: Betrachtete Merkmale bei der Produktauswahl  
**Gewählte Merkmale bei der Auswahl der Produktkategorien**

---

|                                                                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Wachstum in den Verkaufszahlen                                                                                     |
| Wachstum im Abfallaufkommen                                                                                        |
| Schnelllebigkeit der Produkte<br>( <i>Konsum schneller als geplante Produktlebensdauer</i> )                       |
| Langlebigkeit der Produkte<br>( <i>Neuanschaffung erst bei Lebensende des vorherigen Produktes</i> )               |
| Existierende Regulierungen und Bewertungen der Produkte<br>( <i>Bewertungssysteme für Nachhaltigkeit, Normen</i> ) |
| Signifikante Menge an ausgestoßenem CO <sub>2</sub>                                                                |

Aus den gewählten Merkmalen wird das Wachstum im Abfallvorkommen im Folgenden betrachtet. Werden die Daten der Abfallaufkommen vom Statistischen Bundesamt betrachtet, fällt bei der Betrachtung über die Zeit auf, dass Elektroaltgeräte im Vergleich zu anderen Siedlungsabfällen stark ansteigen. So verdoppelt sich das Abfallaufkommen von Elektroaltgeräten über den Zeitraum von 2006 bis 2019, während die Siedlungsabfälle global in diesem Zeitraum nur um ca. 8 % gestiegen sind

#### 4.1 Auswahl der Produktgruppen

[Statistisches Bundesamt, 2021]. Unterkategorien wie Glas, Papier und Pappe oder Verpackungen steigen im Vergleich nur moderat [Statistisches Bundesamt, 2021]. Für das Elektroschrottaufkommen existiert der „Global E-waste Monitor“ der durch ein Expertenteam Statistiken dazu in regelmäßigen Abständen veröffentlicht. Forti et al. kommen dabei zu einem ähnlichen Bild. Laut den recherchierten Daten ist der globale Elektroschrott von 2014 mit 44,4 Mt auf 53,6 Mt im Jahr 2019 angestiegen, mit einer Prognose auf 74,7 Mt im Jahr 2030 [Forti et al., 2020]. Diese Zahlen kommen auch weltweit gesehen annähernd auf eine Verdopplung des Elektroschrotts im betrachteten Zeitraum, daher sollten Produktgruppen aus dem Bereich der Elektrogeräte in die Betrachtung dieser Arbeit integriert werden. Eine Produktgruppe, die dabei ein großes Potential hat, ist die Produktgruppe der Smartphones. Smartphoneverkäufe sind weltweit seit 2009 bis 2024 um mehr als 700 % gestiegen und waren wahrscheinlich mit unter den sich am schnellsten verbreitenden Elektronikgeräten in den letzten Jahrzehnten [IDC, 2025]. Auch in Deutschland konnte in diesem Zeitraum ein starkes Verkaufswachstum von fast 400 % beobachtet werden [Bitkom, 2025]. Auf der anderen Seite stehen Smartphones stark in der Kritik, da immer mehr Seltene Erden verbaut und somit weltweit benötigt werden [Bookhagen et al., 2020].

Die Plattform iFixit bewertet die Reparierbarkeit von verschiedenen Produkten und betrachtete neben Smartphones die Gruppen der Tablets und Notebooks [iFixit, 2025]. Auch wenn der große Verkaufsboom von Notebooks mittlerweile nicht mehr vorhanden ist, sind immer noch Verkaufszahlen von mehr als 2 Millionen Stück in Deutschland im Jahr 2024 zu verzeichnen und damit deutlich mehr als bei den verkauften Desktop-PCs [gfu, 2025]. Durch das All-in-one Konzept, kombiniert mit hohen Leistungen und größeren Akkus als Smartphones, sind auch sie Treiber für die Verbräuche von Seltenen Erden [Trinh et al., 2023]. Da sie mit ihrer Tastatur, Trackpad und meistens mehr Peripherie als Tablet-Computer komplementärer zu Smartphones ausfallen, werden sie ebenfalls als Produktgruppe betrachtet. Auch unter dem Gesichtspunkt der Reparatur fallen Geräte aus der Gruppe der „Informations- und Kommunikationstechnologie“ (IKT) sowie Unterhaltungselektronik mit einer signifikanten Anzahl an Reparaturen auf. So stellte Poppe 2014 fest, dass die zuvor angesprochenen Produktkategorien im Jahr 2013 mehr als die Hälfte des Umsatzes im Reparaturmarkt für Gebrauchsgüter ausgemacht haben [Poppe, 2014].

Etwas kleiner vom Umsatz ist die Gruppe der elektrischen Haushalts- und Gartengeräte [Poppe, 2014]. Gerade große Haushaltsgeräte aus der Kategorie der Weißwa-

#### 4 Vorgehen

ren wie Kühlschränke, Wasch- oder Spülmaschinen, sind interessant zu betrachten, da sie in der Regel vom Nutzer nicht frühzeitig ersetzt, sondern bis zu ihrem Lebensende genutzt werden [Wang et al., 2013]. Diese größeren Elektrogeräte wurden in jüngster Zeit ebenfalls häufig von verschiedenen Institutionen reguliert, da sie einen vergleichsweise großen Anteil an gebundenem Material aufweisen. Der französische Reparaturindex gilt neben Smartphones, Laptops und Fernsehern in seiner ersten Fassung ebenfalls für Waschmaschinen, Rasenmäher und Spülmaschinen [Ministère de la Transition écologique, 2022]. Auch die EU hat mit einer der letzten Änderungen der Ökodesignrichtlinie, bevor sie durch die neue ESPR ersetzt wurde, ebenfalls explizit die Produktkategorien der Kühlschränke, Wasch- sowie Spülmaschinen angesprochen und eine längere und einfachere Ersatzteilverfügbarkeit rechtlich verankert [European Commission, 2019]. Laut Tiemann und Wallbott haben Waschmaschinen und Kühlschränke mit in Summe mehr als 40 % einen hohen Anteil am Elektroschrottaufkommen in Deutschland [Tiemann und Wallbott, 2021]. Alle genannten Argumente führen zu dem Schluss, dass aus der Gruppe der Weißwaren ebenfalls Produkte in dieser Arbeit betrachtet werden sollten. Aufgrund der Mehrfachnennung in verschiedenen Argumenten sollen Waschmaschinen und Kühlschränke als Produktgruppen in die Betrachtung mit aufgenommen werden.

Wenn man das letzte Merkmal aus der Tabelle 4.1 mit in die Auswahl der Produktkategorien aufnimmt, fällt relativ schnell der Transportsektor als ein großer weltweiter CO<sub>2</sub>-Treiber auf. In einer weltweiten Auswertung der CO<sub>2</sub>-Verbräuche nach Sektor landete der Transport im Jahr 2023 dabei auf dem zweiten Platz [EDGAR/JRC, 2024]. Auch die Europäische Union geht mit ihrem „Fit für 55“-Vorhaben bei den Emissionsreduktionszielen der Mitgliedsstaaten direkt im ersten Punkt auf den Straßenverkehr ein, bei dem die Treibhausgasemissionen reduziert werden sollten [Europäischer Rat, 2023]. Betrachtet man den Verkehrssektor genauer ist zu sehen, dass gerade private Personenkraftwagen (PKW) den größten Anteil am CO<sub>2</sub>-Ausstoß haben [Umweltbundesamt, 2025]. Eckart et al. vergleichen in einer Studie den Energiebedarf von PKW, Pedelecs und Fahrrädern und kommen dabei auf ein ähnliches Ergebnis [Eckart et al., 2022]. Gerade der Gegensatz von PKW und Fahrrädern, die in der Nutzungsphase nicht aktiv Energie verbrauchen, bietet viel Untersuchungspotential. Pedelecs sind wiederum eine aktuell noch stark wachsende Produktgruppe, gerade bezogen auf ihre Verkäufe, so konnten sich die Verkaufszahlen von 2009 bis 2025 um ca. 1400 % steigern [ZIV, 2025a]. Aus den zuvor genannten Argumenten

sollten daher die Produktgruppen der PKW, Pedelecs und Fahrräder mit in die geplante Betrachtung aufgenommen werden.

Tabelle 4.2: Ausgewählte Produktgruppen

| Hauptgruppen                 | Produktgruppen                 |
|------------------------------|--------------------------------|
| Smartphones<br>und Notebooks | Smartphones<br>Notebooks       |
| Weißwaren                    | Waschmaschinen<br>Kühlschränke |
| Fahrzeuge                    | PKW<br>Pedelecs<br>Fahrräder   |

Die ausgewählten Produktgruppen sind in Tabelle 4.2 zu sehen. Sie können zu drei Gruppen zusammengefasst werden, Smartphones und Notebooks stehen dabei für leicht komplementäre Produkte aus dem IKT-Sektor. Waschmaschinen und Kühlschränke sind Produktgruppen aus dem Bereich der Haushaltselektronik bzw. der Weißwaren. Der letzte Bereich mit dem Oberthema Verkehr beinhaltet dann die Produktgruppen PKW, Pedelecs und Fahrräder. Für die Auswahl der Produktgruppen wurden immer möglichst viele der aus Tab. 4.1 gewünschten Merkmale identifiziert. Die ausgewählten Produkte bieten so viele Aspekte, die sowohl Vergleiche als auch Gegenüberstellungen bestimmter Eigenschaften ermöglichen.

## 4.2 Aufbau der Datenbasis

Nachdem im vorherigen Kapitel die zu betrachtenden Produktgruppen ausgewählt wurden, muss ein Betrachtungsrahmen gewählt werden, welcher konkrete Merkmale festlegt, anhand derer die Produkte analysiert werden. Der Aufbau ist damit dann vergleichbar mit einem Life Cycle Inventory, damit sichergestellt wird, dass für alle Produkte die gleichen Merkmale mit in die Datenbasis aufgenommen werden. Die erhobenen Daten sind in ihrer Gesamtheit im Anhang zu finden. Das erste Merkmal, welches betrachtet und präsentiert werden soll, ist die stoffliche Zusammensetzung der Produkte. Die Übersicht der verwendeten Werkstoffe bildet die Basis für viele Ökobilanzierungen der Produktionsphase. Die eingesetzten Werkstoffe müssen vor der Produktion erst bereitgestellt werden, was einen Abbau von natürlichen Res-

## 4 Vorgehen

sources und eine Vorverarbeitung der Rohstoffe beinhaltet, sofern es sich hierbei um Neumaterial handelt. Dadurch haben die genutzten Rohmaterialien unterschiedliche CO<sub>2</sub>-Äquivalente [Manhart et al., 2016]. Des Weiteren gibt die stoffliche Zusammensetzung andere Anhaltspunkte, wie z.B. Informationen zu den verwendeten Seltenen Erden, welche in endlicher Menge vorhanden und teilweise schwer zu gewinnen sind [Bookhagen et al., 2020]. Als grundlegende Information können die Werkstoffe in ihre Hauptgruppen unterteilt werden wie z.B. Metalle, Kunststoffe, Gläser usw. was eine erste Selektion sinnvoll anwendbarer Herstellungsverfahren ermöglicht.

Ein weiteres zu betrachtendes Merkmal sind die Absatz- bzw. Verkaufszahlen eines Produktes, was ein eher implizites Merkmal darstellt. So können Verkaufszahlen durch ihr reines Volumen eine Information darüber geben, wie groß der Anteil der Produktgruppe an z.B. einer weltweit betrachteten Ökobilanz ist, wie beim (Privat-)Verkehr in Kap. 4.1 analysiert [Umweltbundesamt, 2025]. Neben diesem Mengenteil geben die Verkaufszahlen über die Zeit betrachtet auch eine grundlegende Tendenz der Entwicklung eines Absatzmarktes und auch damit wieder indirekte Informationen über die ökologische Aussagekraft. Als Beispiel kann hier die Produktgruppe der Pedelecs nochmals genannt werden, welche ihre Absatzzahlen in gut 15 Jahren um ca. 1400 % steigern konnte und so ein deutlich größeres Wachstum verzeichnen kann als normale Fahrräder [ZIV, 2025a].

In Teilen von den Absatz- und Verkaufszahlen abhängig, wird als weiteres Merkmal die Nutzungsdauer der Produktgruppen betrachtet. So kann die reale Nutzungsdauer teilweise maßgeblich von der als ökologisch sinnvoll ermittelten Nutzungsdauer abweichen [Bakker et al., 2014a]. Wenn die reale Nutzungsdauer mit der in LCAs angegebenen Lebensdauern verknüpft wird, kann eine wichtige Aussage über das typische Konsumverhalten innerhalb der Produktgruppe gemacht werden. Durch Marktanreize und eine geplante Obsoleszenz (siehe Kap. 2.7) können diese beiden Nutzungsdauern voneinander abweichen und so eine unnötige Ressourcenverschwendung und erhöhten CO<sub>2</sub>-Ausstoß zur Folge haben [Barros und Dimla, 2021]. Daher bietet sich die Nutzungsdauer von Produkten als ein geeignetes implizites Merkmal an.

Als zentrale explizite Merkmale sind Lebenszyklusanalysen für Produkte aus den betrachteten Gruppen herauszustellen. Dabei können die betrachteten LCAs noch genauer unterteilt werden, angefangen mit LCAs, die die einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus betrachten und bewerten. In den meisten Veröffentlichungen rich-

ten sich diese Lebenszyklusanalysen auf die Phasen Rohmaterialgewinnung, Produktion, Transport, Nutzung und End-of-Life (EOL) (dt.: Lebensende), die einzeln ausgewertet werden, wie z.B. zu sehen bei Cordella et al. [Cordella et al., 2021a]. Diese Betrachtung der Lebenszyklusanalysen nach Phasen deckt sich ebenfalls mit der Betrachtungsweise der DIN EN ISO 14040, die „den gesamten Lebensweg eines Produktes, von der Rohstoffgewinnung und -erzeugung über die Energieerzeugung und Materialherstellung bis zur Anwendung, Abfallbehandlung und endgültigen Beseitigung“ betrachtet [DIN e. V., 2021a]. Sie bildet daher das größte Merkmal innerhalb der Gruppe der Lebenszyklusanalysen in der recherchierten Datenbasis. Dabei werden die CO<sub>2</sub>-Äquivalente, der zuvor angesprochenen Phasen sowie die Gesamtsumme des kompletten Lebenszyklus, mit in die Datenbasis aufgenommen.

Für die LCAs nach Phasen sollen weiter, soweit vorhanden, die Life Cycle Inventories mit erfasst werden. Für die Beantwortung der Forschungsfrage aus Kap. 3 sollten Daten aus den LCIs relevante Informationen liefern. Dabei wird eine Mischung aus funktioneller Einheit und Systemgrenze betrachtet, für das Letztere, angefangen mit den betrachteten Phasen des Produktlebenszyklus, sowie Standorte für Produktion und Nutzung. Bei der funktionellen Einheit werden die spezifischen Szenarios des Produktes betrachtet, wozu Informationen gehören wie die geplante Lebensdauerlänge, geplante Reparaturen und Austausche, Einzelheiten der Nutzungsphase wie Energieverbrauch und auch EOL-Optionen wie z.B. Recycling, Wiederbenutzung oder Deponie. Darüber hinaus werden die Datenquellen bzw. Datenbasis für die jeweilige LCA sowie die Datentypen mit betrachtet und in welcher Software die Ökobilanz mit den jeweiligen Daten erstellt wurde, wie schon in Kap. 3.1 angesprochen. Viele Software-Anwendungen nutzen dabei eigene Datenbanken, die wiederum einen Verbund aus verschiedensten Quellen darstellen, wie z.B. zu sehen in der „Granta EduPack Materials Science and Engineering“ Datenbank (gleiche Datenbasis wie der Granta Selector) [Ashby et al., 2021]. Bei den zuvor angesprochenen Datentypen wird für die eigene Datenbasis differenziert zwischen gesamten Komponenten, Modellierung anhand von Werkstoffangaben, Nutzung von generischen Daten sowie der Nutzung von Proxies (siehe Kap. 3.1).

Neben der Betrachtung von LCAs und LCIs nach Phasen werden weitere Lebenszyklusanalysen analysiert. Dabei gibt es unter anderem LCAs, die den CO<sub>2</sub>-Footprint für einzelne Bauteile eines Produktes ausgeben, zu sehen z.B. bei einer Veröffentlichung von Prakash et al. [Prakash et al., 2016a]. Anhand dieser Daten

#### 4 Vorgehen

können Vergleiche nicht nur auf Produktebene, sondern ggf. auch auf Einzelteileebene geführt werden, wobei immer CO<sub>2</sub>-Äquivalente ausgegeben werden. Neben den Lebenszyklusanalysen nach Phasen und Bauteilen, gibt es auch einige Quellen, die eine Ökobilanzierung für die verwendeten Werkstoffe eines Produktes machen, wie z.B. zu sehen bei Deng et al. [Deng et al., 2011]. Die Betrachtung der Ökobilanzierung nach Werkstoffen kann vorteilhaft sein, wenn z.B. geschredderte und recycelte Altprodukte vorliegen oder noch keine Analyse für ein komplettes Produkt vorhanden ist, das Unternehmen aber alle Informationen zu den enthaltenen Werkstoffen besitzt. Für eine aussagekräftige LCA der vorhandenen Werkstoffe eines Produktes ist es allerdings erforderlich, Wissen über die eingesetzten Fertigungsprozesse zu haben [Deng et al., 2011]. Da nicht jede wissenschaftliche Veröffentlichung die gleichen verwendeten Werkstoffe betrachtet, wird für die eigene Datenbasis eine Maximalliste erstellt, in der alle verwendeten Werkstoffe mit ihren Ökobilanzen eingetragen und gegenübergestellt werden können.

Als letzte Phase eines Produktlebenszyklus wird das End-of-Life beschrieben, welches mit verschiedensten Strategien vollzogen werden kann. Dabei können beim Recycling einzelne Werkstoffe zurückgewonnen werden, je nachdem welche Recyclingprozesse verwendet werden [Van Eygen et al., 2016]. Durch eine Reparatur kann ein Produkt wieder zurück in die Nutzungsphase gebracht und dadurch eine veränderte Ökobilanz gezogen werden, da das Produkt für den zweiten Lebenszyklus nicht mehr produziert werden muss [Rüdenauer und Prakash, 2020]. Bei einer thermischen Verwertung des EOL-Produktes kann ein Teil der gebundenen Energie wieder freigesetzt und genutzt werden, was ebenfalls die Ökobilanzierung verändert [Bhari et al., 2021]. Da es bei den EOL-Strategien viele verschiedene Ansätze gibt, wird für die Datenbasis ebenfalls eine Maximalliste erstellt, die alle verwendeten EOL-Strategien der betrachteten Quellen beinhaltet und sofern möglich, gegenüberstellt.

Neben den Merkmalen aus der stofflichen Zusammensetzung sowie den LCAs nach Werkstoffen, werden ebenfalls die verwendeten kritischen Rohstoffe betrachtet, die teilweise aus anderen Merkmalen abgeleitet werden können. Sie sind indirekt an einer Nachhaltigkeitsbewertung oder Ökobilanzierung beteiligt. So gehören viele Seltene Erden zu den Listen der kritischen Rohstoffe, welche aufgrund der erhöhten Nachfrage elektronischer Produkte teilweise einen stark wachsenden Bedarf haben. Dabei sind diese kritischen Rohstoffe ungleich auf der Welt verteilt und führen daher zu politischen Spannungen und Konflikten [Jin et al., 2016]. Die Daten für die selbst

erstellte Datenbasis werden aus den zuvor genannten anderen Quellen abgeleitet und nach den einzelnen kritischen Rohstoffen sowie dem gesamten Anteil am Produkt aufgenommen, da sie gerade für die soziale Nachhaltigkeit der drei Säulen (siehe Kap. 2.1) eine entscheidende Komponente sind.

Tabelle 4.3: Ausgewählte Hauptmerkmale für die betrachteten Produktgruppen

| <b>Ausgewählte Hauptmerkmale</b>         |
|------------------------------------------|
| Stoffliche Zusammensetzung               |
| Absatz- Verkaufszahlen                   |
| Nutzungsdauer                            |
| LCAs nach Phasen                         |
| LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phase |
| LCAs nach Bauteilen                      |
| LCAs nach Werkstoffen                    |
| EOL-Strategien                           |
| Kritische Rohstoffe                      |
| Fehlerquellen                            |

Die ausgewählten Merkmale sind in Tab. 4.3 zusammengefasst. Sie bilden die Datenbasis mit der die Forschungsfrage beantwortet werden soll. Dabei wird jedes Hauptmerkmal anhand von Daten aus der Datenbasis dargestellt und beschrieben.

## 4.3 Datenbasis

Im folgenden Kapitel werden die einzelnen Hauptmerkmale aus Tabelle 4.3 für einzelne Produkte explizit dargestellt. Dabei wird auf bestehende Vergleichbarkeiten wie auch Differenzen näher eingegangen. Die Gesamtheit der Daten ist im Anhang dargestellt. Die definierten Hauptmerkmale werden zur besseren Lesbarkeit in kursiver Schreibweise geschrieben, damit diese schnell als Hauptmerkmal erkannt werden können.

### Stoffliche Zusammensetzung

Das erste Merkmal der Tabelle 4.3, die *stoffliche Zusammensetzung* der Produkte, wurde zunächst grob in die Hauptkategorien Metalle, Kunststoffe, Gläser und andere unterteilt. Die Autoren der einzelnen verwendeten Quellen betrachten dabei oft

#### 4 Vorgehen

unterschiedliche Werkstoffe, daher ist die Liste in der Datenbasis als Maximalliste angelegt. Bookhagen et al. analysieren in ihrer Veröffentlichung die Hauptgruppe der Metalle tiefgreifend, die Gruppe der Kunststoffe wird nur als prozentuale Massefraktion angegeben und zusammengefasst [Bookhagen et al., 2020].

Tabelle 4.4: Beispielhafte Darstellung der erfassten *stofflichen Zusammensetzung* aus zwei Quellen (Teil 1), alle Angaben in Prozent vom Gesamtgewicht

| Metall | Waschmaschinen           | Personenkraftwagen       |
|--------|--------------------------|--------------------------|
|        | [Rüdenauer et al., 2007] | [Danilecki et al., 2017] |
| Fe     | 38,2632                  | 73,5938                  |
| Si     | 0,5285                   | 0,5788                   |
| Mg     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| Al     | 6,7179                   | 8,6472                   |
| Cu     | 1,8152                   | 3,0539                   |
| Ni     | 0,0501                   | 0,0549                   |
| Cr     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| Sn     | 0,1307                   | 0,1431                   |
| Zn     | 0,0669                   | 0,0643                   |
| Sr     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| Ba     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| REE    | 0,0000                   | 0,0000                   |
| W      | 0,0000                   | 0,0000                   |
| Mn     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| Ti     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| Co     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| Ta     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| Mo     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| Zr     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| Au     | 0,0019                   | 0,0021                   |
| Ag     | 0,0083                   | 0,0091                   |
| Pd     | 0,0007                   | 0,0007                   |
| Nd     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| Pr     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| In     | 0,0000                   | 0,0000                   |
| Pb     | 0,0835                   | 0,1815                   |
| Sb     | 0,0102                   | 0,0000                   |

Aus den analysierten Quellen wurden 25 verschiedene Metalle betrachtet, darunter oft verwendete Elemente wie Eisen, Aluminium und Magnesium, aber auch anteilig seltener eingesetzte wie Gold, Silber oder Palladium. In einer Veröffentlichung von Prakash et al. werden verschiedene Kunststofftypen betrachtet, wie z.B. Polyvinylchlorid (PVC), Acrylnitril-Butadien-Styrol (ABS), Polyamide (PA) und weitere [Prakash et al., 2012]. Metalle werden in der Veröffentlichung indirekt in einzelnen Komponenten beschrieben wie z.B. Aluminiumblech, Kupferkabel oder integrierte Schaltkreise (eng.: integrated circuits) (ICs) [Prakash et al., 2012]. Einzelne Metalle wie in der Veröffentlichung von Bookhagen et al. sind nicht aufgeführt.

Tabelle 4.5: Beispielhafte Darstellung der erfassten *stofflichen Zusammensetzung* aus zwei Quellen (Teil 2), alle Angaben in Prozent vom Gesamtgewicht

| Kunststoff         | Waschmaschinen<br>[Rüdenauer et al., 2007] | Personenkraftwagen<br>[Danilecki et al., 2017] |
|--------------------|--------------------------------------------|------------------------------------------------|
| ABS                | 2,2685                                     | 2,0411                                         |
| PC                 | 0,0000                                     | 0,0000                                         |
| (LD)PE             | 0,4469                                     | 0,0000                                         |
| PP                 | 1,5129                                     | 4,7058                                         |
| PS                 | 0,0000                                     | 0,7504                                         |
| EPS                | 0,0000                                     | 0,0000                                         |
| PVC                | 0,1066                                     | 0,2868                                         |
| PA 6               | 0,0797                                     | 0,9605                                         |
| PMMA               | 0,0000                                     | 0,1801                                         |
| EPDM               | 3,6553                                     | 0,0000                                         |
| POM                | 0,0601                                     | 0,0000                                         |
| Epoxy              | 0,2131                                     | 0,2334                                         |
| Andere Kunststoffe | 3,6553                                     | 1,0506                                         |
| Andere             | 38,2548                                    | 0,0000                                         |
| Glas               | 2,0698                                     | 3,4619                                         |

Da in vielen der analysierten Quellen ICs als Komponente aufgeführt werden und nicht die genaue stoffliche Zusammensetzung, wurden für eine Übersetzung Veröffentlichungen zu Werkstoffanalysen von ICs herangezogen. Ogunniyi et al. haben in ihrer Veröffentlichung Daten über die stoffliche Zusammensetzung von ICs aus sieben weiteren Quellen herangezogen und zusammengefasst [Ogunniyi et al., 2009]. Aus den analysierten Quellen von Ogunniyi wurde der Mittelwert der verwendeten Werkstoffe errechnet und als Basis genutzt, um alle weiteren Quellen, die nur ICs angeben, umrechnen zu können. An den beiden verglichenen Quellen ist zu sehen, dass die betrachtete stoffliche Zusammensetzung sehr unterschiedlich ausfällt. Dies kann an den unterschiedlichen Fokuspunkten der einzelnen Veröffentlichungen, den verwendeten Messverfahren oder generell an den betrachteten Werkstoffen liegen. In der selbst erstellten Datenbasis werden unter dem Hauptmerkmal der *stofflichen Zusammensetzung* 27 Metalle, 13 Kunststoffe sowie Glas und andere betrachtet, jeweils in absoluten Zahlen und prozentual beschrieben. In den Tabellen Tab. 4.4 und Tab. 4.5 sind beispielhaft zwei Datensätze aus der Datenbasis in prozentualer Ausprägung dargestellt. Bei allen Werkstoffen, die mit einer null versehen sind, wurden keine Daten in der Quelle zu dem jeweiligen Werkstoff erhoben. Die vollständigen Daten inklusive aller betrachteten Werkstoffe sind im Anhang der Arbeit zu finden.

## 4 Vorgehen

### Absatzzahlen

Das nächste Hauptmerkmal aus Tab. 4.3 sind die *Absatzzahlen* der betrachteten Produktkategorien. Da bei der Untersuchung für alle Produktgruppen Zahlen für den deutschen Markt und nur teilweise globale Absatzzahlen gefunden wurden, beschränkt sich die Betrachtung der Verkaufszahlen auf Deutschland, wobei die Daten je nach Veröffentlichung vom Jahr 2005 bis 2025 reichen. Bei der Betrachtung sind Unterschiede in den absoluten Zahlen sowie auch im Wachstum von Jahr zu Jahr zu erkennen. Die Absatzzahlen der Smartphones in Deutschland waren im Jahr 2005 bei etwa 5,1 Millionen Stück, sind dann angestiegen auf ca. 26 Millionen Stück im Jahr 2015 mit einem leichtem Rückgang sowie Stabilisierung der Absatzzahlen auf ca. 20 Millionen Stück [Bitkom, 2025].

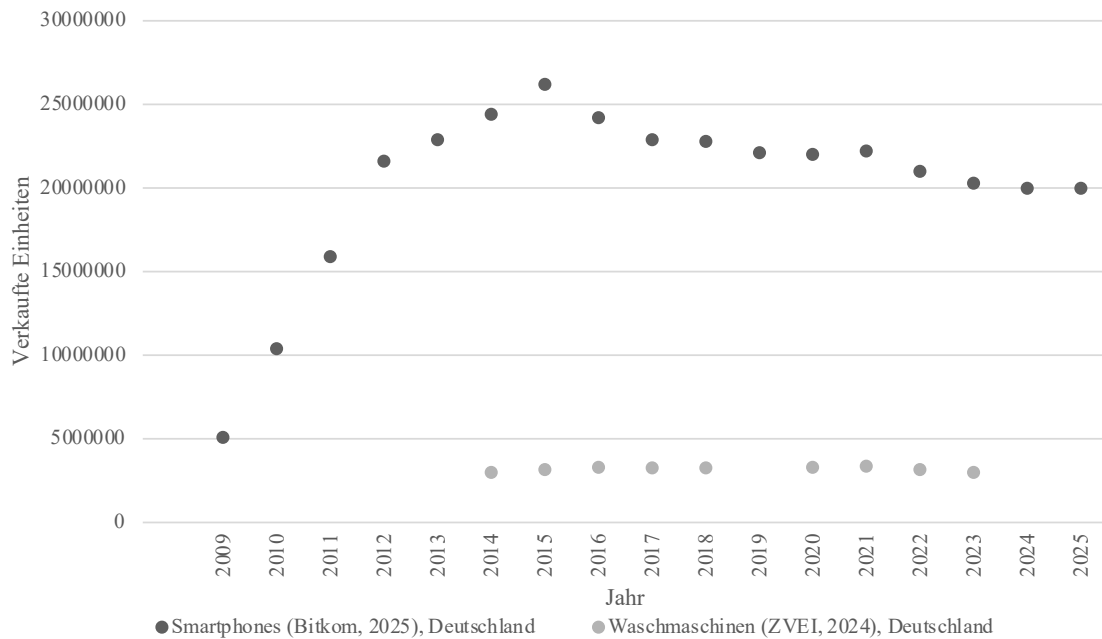


Abbildung 4.1: Verkaufte Einheiten für die Produktkategorien Smartphones und Waschmaschinen in Deutschland.

Im Vergleich dazu lagen die Absatzzahlen von Waschmaschinen in Deutschland im Jahr 2015 bei ca. 3,1 Millionen Stück und im Jahr 2023 bei ca. 3 Millionen Stück mit keiner signifikanten Änderung [ZVEI, 2024b]. Es ist zu sehen, dass die Kategorie der Smartphones über höhere Absatzzahlen verfügt als die der Waschmaschinen, gepaart mit einem Wachstum um knapp 400 % im betrachteten Zeitraum, verglichen

mit stabilen, nicht wachsenden Absatzzahlen bei den Waschmaschinen. Die Verkäufe über die Zeit sind in Abbildung 4.1 zu sehen. Das Hauptmerkmal der *Absatzzahlen* kann so als Indikator verwendet werden, ob eine Produktkategorie signifikante Auswirkungen hat im Sinne der Nachhaltigkeit und ob ein starkes Wachstum über die Zeit zu beobachten ist.

#### Nutzungsdauer

Für das Hauptmerkmal der *Nutzungsdauer* der Produkte wurde in den veröffentlichten Quellen die mittlere Nutzungsdauer analysiert, sofern diese angegeben wurde. In den Daten gibt es innerhalb einzelner Produktgruppen große Differenzen in der angenommenen mittleren Nutzungsdauer. So nehmen in der Kategorie der Kühlschränke Rüdenauer et al. eine Nutzungsdauer von 14 Jahren an [Rüdenauer et al., 2005]. Im Jahr 2011 gehen Gutiérrez et al. von einer mittleren Lebensdauer von 11 Jahren aus [Gutiérrez et al., 2011]. Ein Jahr später nehmen Huisman et al. in ihrer Veröffentlichung eine Lebensdauer von 20 Jahren für einen Kühlschrank an [Huisman et al., 2012]. In Summe kann bei der Nutzungsdauer von Kühlschränken festgestellt werden, dass diese eher langlebiger sind mit Lebensdauern von 11 bis 20 Jahren. Verglichen dazu sind z.B. Smartphones eine Produktkategorie mit kürzerer Lebensdauer. Wieser und Tröger gehen von einer mittleren Nutzungsdauer von 2,7 Jahren aus, Rüdenauer und Prakash nehmen eine Nutzungsdauer von 2,5 Jahren an [Wieser und Troeger, 2015, Rüdenauer und Prakash, 2020].

Diese Zahlen können gerade mit den zuvor beschriebenen *Absatzzahlen* Informationen über schnell- oder langlebige Produktkategorien geben. Es ist dabei zu beachten, dass die angenommenen Lebensdauern oft unterschiedlich sind zu denen, die in Lebenszyklusanalysen von Herstellern oder anderen Autoren verwendet werden. So nehmen Sánchez et al. für die Ökobilanzierung des Fairphone 4 eine mittlere Lebensdauer von fünf Jahren an [Sánchez et al., 2022]. Der Hersteller Apple geht in den erstellten Ökobilanzen von drei bzw. bei den neueren iPhone Modellen von vier Jahren aus [Apple, 2025]. Diese Zahlen sind größer als die vorgestellten in der mittleren Lebensdauer und können ein Indikator dafür sein, dass Produkte vor dem Ablauf ihrer geplanten Lebensdauer frühzeitig durch den Anwender ersetzt werden.

### Lebenszyklusanalysen nach Phasen

Das nächste zu beschreibende Hauptmerkmal sind die *LCAs nach Phasen*. Dabei konnten mehrheitlich in den untersuchten Quellen die Lebensphasen Rohmaterialerzeugung, Produktion, Transport, Nutzung und End-of-Life (Lebensende) festgestellt werden. Diese Betrachtungsweise kommt der in Kap. 2.5.3 vorgestellten Cradle-to-Cradle Betrachtungsweise am nächsten bzw. kann damit gleichgesetzt werden. Einige analysierte Quellen geben allerdings keine Informationen über die Rohmaterialerzeugung an, wie z.B. bei Sánchez et al. zu sehen. Die Rohmaterialerzeugung in der Phase der Produktion wird dabei als berücksichtigt angegeben, wie auch in der zuvor genannten Quelle. Cordella et al. geben in der von ihnen erstellten Lebenszyklusanalyse Informationen über die Rohmaterialerzeugung an, wodurch sich die Daten der einzelnen Phasen der Lebenszyklusanalysen teilweise signifikant von z.B. denen von Sánchez et al. unterscheiden [Cordella et al., 2021b]. So kommen Cordella et al. auf 48 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent in der Phase der Rohmaterialerzeugung im Gegensatz zu 0 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent in der Veröffentlichung von Sánchez et al. [Cordella et al., 2021b, Sánchez et al., 2022].

Tabelle 4.6: Vergleich von zwei Smartphone *LCAs nach Phasen*

| Quelle               | [Sánchez et al., 2022] | [Cordella et al., 2021a] |
|----------------------|------------------------|--------------------------|
| Einheit              | kg CO <sub>2</sub> Äq. | kg CO <sub>2</sub> Äq.   |
| Rohmaterialerzeugung | 0,00                   | 48,00                    |
| Produktion           | 35,05                  | 12,00                    |
| Transport            | 2,34                   | 8,70                     |
| Nutzung              | 7,48                   | 8,50                     |
| End-of-Life          | -1,87                  | -3,60                    |
| Summe                | 43,00                  | 73,60                    |

Auch die Phase der Produktion fällt in den beiden Veröffentlichungen, wie in Tab. 4.6 zu sehen, sehr unterschiedlich aus mit ca. 35 und 12 kg CO<sub>2</sub> bzw. wenn die beiden Phasen addiert werden 35 und 60 kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent. Sánchez et al. geben beim Transport ca. 2,3 kg CO<sub>2</sub> an, wobei die Berechnungen von Cordella et al. hier bei 8,7 kg CO<sub>2</sub> liegen. Die Nutzungsphase ist in beiden Veröffentlichungen vergleichbar mit ca. 7,5 und 8,5 kg CO<sub>2</sub>. Solche betrachteten Differenzen können auch in anderen Produktgruppen auftreten, gerade wenn der Aufbau des Produktes sich stark unterscheidet. So vergleichen Pero et al. z.B. in ihrer Lebenszyklusanaly-

se PKW mit Verbrenner- und Elektromotor, wie zu sehen in Tab. 4.7 [Pero et al., 2018]. Dabei fallen in der Produktionsphase beim Verbrenner ca. 16 % des gesamten ausgestoßenen CO<sub>2</sub> an und beim Elektrofahrzeug ca. 46,5 % [Pero et al., 2018]. In der Nutzungsphase verschieben sich diese Werte dann zugunsten des Elektro-PKW mit knapp 54 % Anteil am gesamten, ausgestoßenem CO<sub>2</sub> während der Verbrenner hier auf ca. 84 % kommt. Werden die absoluten Zahlen der Lebenszyklusanalyse betrachtet, liegen die analysierten PKW mit 30488 kg CO<sub>2</sub> und 19287 kg CO<sub>2</sub> deutlich auseinander, wobei das Elektrofahrzeug weniger CO<sub>2</sub> in seinem Lebenszyklus verbraucht hat. Bei anderen Fahrzeugtypen verschieben sich die prozentualen Werte der einzelnen Phasen stark in die Produktionsphase, wie z.B. zu sehen bei Fahrrädern und Pedelecs. So geben Chang et al. die Nutzungsphase eines Fahrrads noch mit etwa 7,7 % Anteil am gesamt ausgestoßenen CO<sub>2</sub> an [Chang et al., 2012]. Mottschall gibt in seiner veröffentlichten Lebenszyklusanalyse die Nutzungsphase des Fahrrads mit 0 % an [Mottschall, 2012]. Die Einteilung der Lebenszyklusanalyse in die einzelnen Lebensphasen eines Produktes bietet ein gutes Werkzeug, um verschiedene Analysen miteinander zu vergleichen, da bei dieser Methode der Aufbau und die stoffliche Zusammensetzung des Produktes irrelevant sind. Daher wird das beschriebene Merkmal als zentral für die spätere Analyse betrachtet.

Tabelle 4.7: Vergleich von drei *LCAs nach Phasen* aus der Hauptgruppe Fahrzeuge

| Quelle               | [Pero et al., 2018] |             | [Chang et al., 2012] | [Mottschall, 2012] |
|----------------------|---------------------|-------------|----------------------|--------------------|
| Fahrzeugart          | PKW                 | Elektro-PKW | Fahrrad              | Fahrrad            |
| Einheit              | Prozent             | Prozent     | Prozent              | Prozent            |
| Rohmaterialerzeugung | 0,00                | 0,00        | 0,00                 | 213,09             |
| Produktion           | 16,31               | 46,53       | 96,48                | 50,66              |
| Transport            | 0,00                | 0,00        | 0,62                 | 0,00               |
| Nutzung              | 84,00               | 53,92       | 7,68                 | 0,99               |
| End-of-Life          | -0,31               | -0,45       | -4,77                | -163,76            |
| Summe                | 100                 | 100         | 100                  | 100                |

### LCIs der Lebenszyklusanalysen

Das nächste zu betrachtende Merkmal sind die *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen*. Um eine bessere Vergleichbarkeit in den LCIs zu gewährleisten, wurde sich in der Datenbasis nur auf die genannte Art der Lebenszyklusanalyse nach Phasen beschränkt. Wie schon in Kap. 3.1 aufgezeigt, setzt sich eine LCI unter anderem

#### 4 Vorgehen

aus dem Scope und der funktionellen Einheit zusammen. In der Datenanalyse zum Scope wurde festgehalten, welche der zuvor angesprochenen Lebenszyklusphasen eines Produktes betrachtet wurden, an welchem Ort produziert, wo das Produkt genutzt wird und wie viele Produkteinheiten in einer Phase geplant verwendet werden. Diese Anzahl der Einheiten sind in den meisten Quellen mit 1 angegeben, es gibt allerdings auch Abweichungen. Cordella et al. betrachten in ihrer Lebenszyklusanalyse z.B. 2,25 Smartphoneeinheiten in einem geplanten Lebenszyklus, Prakash et al. geht von 2 Notebooks in einem Lebenszyklus als Berechnungsgrundlage aus [Cordella et al., 2021b, Prakash et al., 2016a]. Die Anzahl der Einheiten können dann in einem definierten Betrachtungszeitraum wiederum eine Aussage über die Lebensdauer des Produktes geben. Dieses gewählte Scope sieht den teilweisen bzw. kompletten Austausch eines Produktes innerhalb seines Lebenszyklus vor. Neben der Anzahl an Einheiten pro Lebenszyklus wird die geplante Lebensdauer der Produkte analysiert. Sie gehört in der erstellten Datenbasis zu einer Untergruppe, die in den Daten als „Szenarios“ aufgeführt werden. Dazu gehören unter anderem die Anzahl durchgeführter Austausche an Batterie, Display oder anderen Teilen sowie die Einstufung, ob der Austausch bzw. die Reparatur durch den Hersteller, einen Fachbetrieb oder den Anwender durchgeführt worden ist. Der jährliche Energieverbrauch des Produktes sowie die EOL-Unterscheidung, ob Produkte deponiert, wieder benutzt oder recycelt werden, gehört ebenfalls zu den Szenarios. Dies hat den Hintergrund, dass einige Autoren in ihren Lebenszyklusanalysen die zuvor angesprochenen Punkte leicht variieren und so mehrere LCAs für verschiedene Szenarios berechnen. Proske et al. geben in ihrer Lebenszyklusanalyse z.B. fünf verschiedene Szenarios an, in denen verschiedene Nutzungs- sowie Reparaturszenarios des gleichen Smartphones betrachtet werden [Proske et al., 2020].

Neben diesen Daten über Scopes und Szenarios wird die Art der Daten so wie ihre Quellen untersucht und zusammengefasst. Bei den Datenquellen wird unterschieden zwischen Primärdaten, die vom Hersteller bzw. Verfasser der Ökobilanzierung selbst erhoben wurden, Daten aus verwendeten Datenbanken wie z.B. ecoinvent, GaBi, Granta Selector oder Daten aus anderen wissenschaftlichen Quellen. Die genannten Datenbanken verwenden meist eine Mischung aus anderen wissenschaftlichen Veröffentlichungen so wie Daten von Herstellern, die ggf. anonymisiert in die Datenbank mit aufgenommen wurden [Wernet et al., 2016]. Je nach Datenbank können auch zum Teil wiederum andere Datenbanken als Quelle eingebunden werden, dies

ist z.B. bei der Granta Selector Datenbank der Fall. Neben den Datenquellen ist auch die Art der Daten, wie schon in Kap. 3.1 angesprochen, von Bedeutung. So können die benutzten Daten Primärdaten des Herstellers oder Autors sein, es kann eine Modellierung anhand von Werkstoffangaben vorgenommen werden, es können generische Datensätze verwendet werden oder es werden Proxies als Stellvertreter benutzt. Proske et al. verwenden in ihrer Berechnung z.B. generische Datensätze sowie die Modellierung anhand von Werkstoffangaben [Proske et al., 2020].

Vergleicht man einzelne Quellen zu den vorher definierten Untermerkmalen im Hauptmerkmal der *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen*, zeigen sich starke Unterschiede. Die Lebenszyklusanalyse von Proske et al. beschreibt bei einem Smartphone verschiedene Szenarios sowie weitere Accessoires des Smartphones, wie die Verpackung oder die Schutzhülle [Proske et al., 2020]. Für die Berechnung wird angegeben, dass die Datenbanken ecoinvent 3.5, ecoinvent 3.6 sowie GaBi Data, mit den zuvor angesprochenen generischen Datensets sowie der Modellierung von Komponenten anhand von Werkstoffangaben benutzt wurden [Proske et al., 2020]. Die gesamten erfassten Daten des LCIs aus der Veröffentlichung von Proske et al. sind in Tabelle 4.8 zu sehen. Betrachtet man die vom Hersteller Apple veröffentlichten Lebenszyklusanalysen, werden keine Aussagen über die verwendeten Datenquellen oder Modellierungsgrundlage der Daten gegeben [Apple, 2025]. Auch zu durchgeführten Reparaturen oder Austauschen in einem Lebenszyklus werden keine Aussagen getroffen [Apple, 2025].

In den betrachteten Szenarios sind ebenfalls Unterschiede innerhalb einer Veröffentlichung zu sehen, so geben Prakash et al. in ihrer Lebenszyklusanalyse für ein Notebook in einem kurzlebigen und einem langlebigen Szenario z.B. die doppelte Lebensdauer und verwendete Produkteinheiten im Lebenszyklus an [Prakash et al., 2016a]. Bei dem langlebigen Szenario werden zudem noch zwei Batteriewechsel sowie drei weitere Reparaturen durch einen Reparaturdienstleister vorgesehen [Prakash et al., 2016a]. Die Reparaturen werden in anderen Produktkategorien wie den PKW teilweise nicht weiter erläutert. So rechnen beispielsweise Bieker et al. und auch Kanz et al. in ihre erstellten Lebenszyklusanalysen Reparaturen in der Nutzungsphase der PKW mit ein, spezifizieren allerdings nicht weiter, welche Teile genau in dieser Phase ersetzt bzw. repariert werden und durch wen die Reparatur oder der Austausch durchgeführt wird [Bieker, 2021, Kanz et al., 2018]. Das Untermerkmal der *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen* besitzt viele einzelne

#### 4 Vorgehen

Aspekte und wird sehr unterschiedlich in den untersuchten Quellen angegeben, daher wurde eine Maximaltabelle erstellt mit möglichst vielen Informationen, die in der erstellten Datenbasis inkludiert sind.

In Tabelle 4.8 sind die für die erstellte Datenbasis erfassten Daten beispielhaft zu sehen. Alle nicht verwendeten Datenquellen wurden in dem Beispiel exkludiert und sind im Anhang zu finden. Die Untermerkmale sind unterteilt in Scope, Szenarios, Datenquellen sowie Art der Daten. Bei Scope finden Merkmale wie die einzelnen betrachteten Lebenszyklusphasen, Anzahl der Einheiten und auch Herstellungs- sowie Verwendungsort Anwendung. Unter Szenarios sind Merkmale zusammengefasst, die in den analysierten Quellen oft mehrfach für verschiedene Berechnungen verwendet werden. Dazu gehören z.B. die Lebensdauer, Aspekte für Reparaturen und Austausch sowie der Energieverbrauch und EOL-Szenarios. Die Datenquellen zeigen die genutzten Datenbanken bzw. Veröffentlichungen und „Art der Daten“ erklärt, wie modelliert und welche Software dabei verwendet wurde.

Tabelle 4.8: Life Cycle Inventory aus [Proske et al., 2020]. Zur besseren Lesbarkeit wurden nicht verwendete Quellen exkludiert.

|               | Fairphone 3                              | Accessoires |                 |            | Standardszenario |        |      | Reparaturszenario |   |  |
|---------------|------------------------------------------|-------------|-----------------|------------|------------------|--------|------|-------------------|---|--|
|               |                                          | Schutzhülle | Schraubendreher | Verpackung | Niedrig          | Mittel | Hoch | A                 | B |  |
| Scope         | Rohmaterialerzeugung                     | indirekt    | indirekt        | indirekt   |                  |        |      |                   |   |  |
|               | Produktion                               | y           | y               | y          |                  |        |      |                   |   |  |
|               | Transport                                | y           | y               | y          |                  |        |      |                   |   |  |
|               | Nutzung                                  | y           | y               | y          | 3                | 5      | 7    | 5                 | 5 |  |
|               | EOL                                      | y           | y               | y          |                  |        |      |                   |   |  |
|               | Anzahl der Einheiten                     |             |                 |            | 1                | 1      | 1    | 1                 | 1 |  |
|               | Herstellungsort                          | China       |                 |            |                  |        |      |                   |   |  |
|               | Zielort für Einsatz                      | Europe      |                 |            |                  |        |      |                   |   |  |
|               |                                          |             |                 |            |                  |        |      |                   |   |  |
| Szenarios     | Lebensdauer (Jahre)                      |             |                 |            | 3                | 5      | 7    | 5                 | 5 |  |
|               | Batterietausch / -reparatur              |             |                 |            | 1                | 2      | 3    | 1                 | 1 |  |
|               | Displaytausch / -reparatur               |             |                 |            | 0                | 0      | 0    | 1                 | 0 |  |
|               | Tausch / Reparatur andere                |             |                 |            | 0                | 0      | 0    | 0                 | 4 |  |
|               | Austausch / Reparatur Hersteller         |             |                 |            | n                | n      | n    | y                 | y |  |
|               | Austausch / Reparatur Fachbetrieb        |             |                 |            | n                | n      | n    | n                 | n |  |
|               | Austausch / Reparatur Endkunde           |             |                 |            | n                | n      | n    | n                 | n |  |
|               | Energieverbrauch (kWh) / Jahr            |             |                 |            | 7,01             | 7,01   | 7,01 | ?                 | ? |  |
|               | EOL-Route Deponie                        | n           | n               | n          |                  |        |      |                   |   |  |
|               | EOL-Route Wiederverwendung               | n           | n               | n          |                  |        |      |                   |   |  |
|               | EOL-Route Recycling                      | y           | n               | n          |                  |        |      |                   |   |  |
|               |                                          |             |                 |            |                  |        |      |                   |   |  |
|               |                                          |             |                 |            |                  |        |      |                   |   |  |
|               |                                          |             |                 |            |                  |        |      |                   |   |  |
| Datenquellen  | ecoinvent v3.6                           | y           | y               | y          |                  |        |      |                   |   |  |
|               | ecoinvent 3.5                            | y           | y               | y          |                  |        |      |                   |   |  |
|               | GaBi Data                                | y           | y               | y          |                  |        |      |                   |   |  |
|               |                                          |             |                 |            |                  |        |      |                   |   |  |
| Art der Daten | Primärdaten                              | ?           |                 |            |                  |        |      |                   |   |  |
|               | Modellierung anhand von Werkstoffangaben | y           |                 |            |                  |        |      |                   |   |  |
|               | Generische Datensets                     | y           |                 |            |                  |        |      |                   |   |  |
|               | Proxies                                  | ?           |                 |            |                  |        |      |                   |   |  |
|               | Modellierungssoftware                    | Sphera      | GaBi            |            |                  |        |      |                   |   |  |

### LCAs nach Bauteilen

Das nächste Hauptmerkmal, welches im Folgenden vorgestellt und erläutert wird sind die *LCAs nach Bauteilen*. Dabei wird ein Produkt in seine Hauptkomponenten zerlegt und jede Komponente bekommt ein ausgerechnetes kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent zugeordnet. Ein Vergleich über Produktgruppen hinweg ist je nach Aufbau der jeweiligen Produkte schwierig realisierbar, wie z.B. bei einem Vergleich eines Smartphones mit einem Fahrrad. Auch innerhalb einer Produktgruppe sind Vergleiche nur eingeschränkt möglich, wenn der Aufbau der Produkte stark voneinander abweicht. Ercan et al. zerlegen ein betrachtetes Smartphone des Herstellers Sony beispielsweise in Batterie, Mainboard, Display und andere Komponenten [Ercan et al., 2016]. In den Veröffentlichungen von Proske et al. und Sánchez et al. werden Smartphones vom Hersteller Fairphone beschrieben. Diese zeichnen sich durch eine Modulbauweise aus, daher werden in der LCA nach Bauteilen neben Batterie und Display Komponenten in Modulen gesammelt, wie dem „Core Module“, „Top Module“ oder „Bottom Module“ [Proske et al., 2020, Sánchez et al., 2022]. Werden Produkte aus zwei verschiedenen Kategorien verglichen, können meistens nur wenige Einzelteile direkt miteinander verglichen werden. In ihrer Veröffentlichung beschreiben O’Connell und Stutz ebenfalls die Einzelteile Batterie, Mainboard und Display für ein Notebook der Firma Dell wie auch Ercan et al. in ihrer Analyse für ein Smartphone [O’Connell und Stutz, 2010, Ercan et al., 2016]. Betrachtet man die prozentualen Anteile der Einzelteile am gesamten CO<sub>2</sub>-Footprint, weisen diese starke Ähnlichkeiten auf. Ercan et al. errechnen für die Batterie ca. 9,27 %, für das Mainboard ca. 13,9 % und das Display ca. 23,18 % Anteil am ausgestoßenen CO<sub>2</sub> [Ercan et al., 2016]. In der Analyse eines Notebooks kommen O’Connell und Stutz auf Anteile von ca. 6,4 % für die Batterie, ca. 47,2 % für das Mainboard und ca. 25,2 % für das Display am gesamten, ausgestoßenen CO<sub>2</sub> für den Lebenszyklus [O’Connell und Stutz, 2010]. Bis auf das Mainboard liegen die Werte relativ nahe beieinander, die Gesamtbetrachtung bei O’Connell und Stutz verschiebt sich allerdings aufgrund weiterer betrachteter Einzelteile wie dem Gehäuse, der Stromzufuhr, Festplatte, Keyboard und weiteren [O’Connell und Stutz, 2010]. Das Hauptmerkmal sollte daher nur eingeschränkt für Vergleiche von Produkten und Produktgruppen genutzt werden, sondern eher zur Identifizierung von Einzelteilen, die oft einen hohen CO<sub>2</sub>-Fußabdruck besitzen.

## LCAs nach Werkstoffen

Eine weitere Betrachtungsweise für Lebenszyklusanalysen ist neben den Phasen und Einzelteilen die nach Werkstoffen. Die Bilanzierung nach Werkstoffen bietet sich gerade retrospektiv an, wenn ein Produkt recycelt und dabei in einzelne Fraktionen zerteilt bzw. geschreddert oder eingeschmolzen wird. In den analysierten Quellen sind immer Metalle zu finden, da das Recycling über einen Schredder und anschließender Schmelze mit vergleichsweise einfachen Technologien realisiert werden kann. Teilweise werden auch andere Werkstoffe wie Kunststoffe, Gummi und Glas angegeben, die dann grob vorsortiert und aus dem Produkt ausgebaut bzw. entnommen werden müssen. Die Vergleichbarkeit für dieses Hauptmerkmal ist eingeschränkt, da je nach Verfahren und Betrachtungsweise unterschiedliche Werkstoffe in den Veröffentlichungen analysiert wurden. Deng et al. geben in ihrer LCA für die stoffliche Zusammensetzung eines Notebooks neben ABS, PC, Gummi und Glas viele Metalle an, wie z.B. Kupfer, Aluminium, Eisen, Gold, Silber, Palladium und weitere [Deng et al., 2011]. In der Veröffentlichung von Danilecki et al., die den stofflichen Anteil von verschiedenen PKW bezogen auf das gesamte CO<sub>2</sub>-Äquivalent untersuchen, werden nur die Werkstoffe bzw. Werkstoffgruppen Gummi und Kunststoffe, Aluminium, Eisen sowie Nichteisenmetalle und Andere aufgeführt [Danilecki et al., 2017]. Das Merkmal „andere Materialien“ wird dabei nicht weiter spezifiziert und führt daher zu Ungenauigkeiten in der Untersuchung.

Weil die Datenlage für die *LCAs nach Werkstoffen* nicht ideal war mit sechs gefundenen Veröffentlichungen für die betrachteten Produktgruppen, wurden mithilfe der Software Ansys Granta Selector 2020 R2 weitere Lebenszyklusanalysen selbst erstellt. Die Basis für die selbsterstellten LCAs ist mit dem Hauptmerkmal der *stofflichen Zusammensetzung* vorhanden, sodass belastbare Angaben zu Werkstoffanteilen gegeben sind. Da aus der *stofflichen Zusammensetzung* das zugrunde liegende Fertigungsverfahren nicht für jeden Werkstoff spezifiziert wird, wurden diese nach sinnvollen Annahmen ausgewählt. Dabei wurden für Metalle mit einem hohen prozentualen Anteil an den Produkten wie Eisen Walzen als Fertigungsverfahren ausgewählt und bei Aluminium und Kupfer ein Gussverfahren. Bei Metallen, die in geringen Mengen vorhanden sind wie z.B. Gold, Silber oder Chrom, wurde Verdampfung als Fertigungsverfahren ausgewählt. Für Kunststoffe wurde Polymerextrusion bzw. bei Epoxy das Polymergussverfahren ausgewählt und bei Glas das Glaspressver-

#### 4 Vorgehen

fahren. Alle durchgeführten Berechnungen wurden mit zwei Szenarios durchgeführt, einmal mit einem EOL-Szenario bei dem das komplette Produkt deponiert wird und ein EOL-Szenario bei dem ein maximal mögliches Recycling angestrebt wird. Die errechneten Ergebnisse der Lebenszyklusanalysen liegen trotz Unsicherheiten in einem ähnlichen Bereich wie zuvor ausgewertete Lebenszyklusanalysen. So kann der Mittelwert des ausgestoßenen CO<sub>2</sub>s bei den analysierten Quellen O’Connell und Stutz sowie Prakash et al. berechnet werden mit 333,76 kg CO<sub>2</sub>. Im Vergleich dazu liegt der Mittelwert der selbsterstellten LCAs für Notebooks bei 297,51 kg.

In der Produktgruppe der Pedelecs wurden für fast alle Hauptmerkmale wenig Daten gefunden, daher wurden hier verschiedene Hersteller angeschrieben und weitere Daten angefragt. Durch einen Austausch mit dem Hersteller Riese & Müller wurden weitere Daten zur Verfügung gestellt, die in dieser Arbeit genutzt werden dürfen. Auf Basis der erhaltenen *stofflichen Zusammensetzung* konnte für ein spezifisches Pedelec des Herstellers ebenfalls eine LCA nach Werkstoffen erstellt werden. Dabei kamen 693,45 kg CO<sub>2</sub> für Szenario eins und 288,79 kg CO<sub>2</sub> für Szenario zwei heraus, wobei aus Datenschutzgründen nicht alle Daten für die stoffliche Definition des Pedelecs erhalten wurden. Riese & Müller geben in der von ihnen veröffentlichten LCA 791,2 kg CO<sub>2</sub> als Summe an [Riese & Müller, 2025]. Die Lebenszyklusanalyse nach Werkstoffen gibt dabei unter anderem Auskunft über CO<sub>2</sub>-Treiber in der Rohmaterialgewinnung eines Produktes. Durch die selbsterstellten LCAs wurde für das Hauptmerkmal eine vergleichbare Datenbasis erschaffen und mit in die Untersuchung aufgenommen.

#### EOL-Strategien

Im Hauptmerkmal der *EOL-Strategien* werden verschiedene Lösungswege für das Lebensende der betrachteten Produkte erfasst. Die analysierten Quellen geben dabei verschiedene Möglichkeiten an, wie ein spezifisches Produkt an seinem Lebensende behandelt werden kann. Grob gibt es bei den *EOL-Strategien* zwei Hauptkategorien, angefangen mit der Rückgewinnung von spezifischen Werkstoffen, also ein gezielt eingesetztes Recyclingverfahren, wie z.B. zu sehen bei Van Eygen et al. [Van Eygen et al., 2016]. Neben anteiligem Verwerten bzw. Recyclen können Produkte auch weiterverwendet werden, z.B. durch einen Verkauf, eine Reparatur oder andere Wege, um ein Produkt wieder in eine Nutzungsphase zu bringen. Bhari et al. gehen

in ihrer Veröffentlichung beispielsweise auf eine Wiederverwendung von Einzelteilen und Werkstoffen von PKW ein [Bhari et al., 2021]. Die Vergleichbarkeit zwischen den analysierten Quellen ist für dieses Hauptmerkmal nicht sehr aussagekräftig, da die meisten Veröffentlichungen andere EOL-Strategien anwenden, auch wenn die gleiche Produktgruppe in der Veröffentlichung behandelt wird. So analysieren Rüdenauer und Prakash und Xiao et al. in ihren Veröffentlichungen EOL-Strategien für die Produktgruppen der Waschmaschinen und Kühlschränke, welche beide zur übergeordneten Kategorie der Weißwaren gehören. Bei den Waschmaschinen werden dabei Re-Use-Szenarios betrachtet und ausgewertet und bei den Kühlschränken das stoffliche Recycling einzelner Werkstoffgruppen [Rüdenauer und Prakash, 2020, Xiao et al., 2016]. Eine generelle Anwendung bestimmter EOL-Strategien konnte bei der Aufnahme nicht festgestellt werden. In der späteren Analyse der erfassten Daten wird eine eventuelle Übertragbarkeit solcher Strategien betrachtet.

### Kritische Rohstoffe

Aus der zuvor analysierten *stofflichen Zusammensetzung* können *kritische Rohstoffe* und Seltene Erden abgeleitet werden. Dabei werden *kritische Rohstoffe* in verschiedenen Kategorien zusammengefasst. Jin et al. betrachtet in seiner Veröffentlichung die drei Gruppen der benötigten kritischen Rohstoffe für „saubere grüne Technologie“, „nationale Sicherheit“ sowie „generelle Ökonomie“ [Jin et al., 2016]. Kritische Rohstoffe unterliegen einer geopolitischen Relevanz und können dadurch zu sozialer Ungerechtigkeit und einer schlechten Nachhaltigkeit im Sinne der Drei Säulen (siehe Kap. 2.1) führen. Dabei werden die kritischen Rohstoffe für jedes Land bzw. Region selbst festgelegt, wie z.B. auch von der Europäischen Union in einem Gesetzentwurf von 2023 [European Commission, 2023b]. Bei der Betrachtung der kritischen Rohstoffe wurde eine Auswertung auf Basis der von Jin et al. definierten aus der Gruppe „saubere grüne Technologie“ und eine auf Basis der von der EU definierten kritischen Werkstoffe durchgeführt und ihr Anteil an der *stofflichen Zusammensetzung* betrachtet. Diese beiden Betrachtungen weichen teilweise stark voneinander ab. Bei den Veröffentlichungen zu der *stofflichen Zusammensetzung* von Smartphones von Bookhagen, Manhart et al. und Kieu Trinh ist der von der EU definierte Anteil kritischer Rohstoffe immer signifikant geringer als der von Jin et al. definierte, wie zu sehen in Tab. 4.9 [Bookhagen et al., 2020, Manhart et al., 2016, Trinh

#### 4 Vorgehen

et al., 2023]. In der Veröffentlichung von Danilecki et al. sind die Unterschiede noch signifikanter, hier ist der Anteil laut Jin et al. bei ca. 85 % und der von der EU definierte Anteil an kritischen Rohstoffen liegt im Vergleich bei ca. 3 % [Danilecki et al., 2017].

Tabelle 4.9: Prozentualer Anteil kritischer Rohstoffe in verschiedenen Veröffentlichungen zu der *stofflichen Zusammensetzung* von Smartphones

|                     | [Bookhagen et al., 2020] | [Manhart et al., 2016] | [Trinh et al., 2023] |
|---------------------|--------------------------|------------------------|----------------------|
| Jin et al.          | 37,44                    | 31,99                  | 44,07                |
| Gruppe 1            |                          |                        |                      |
| European Commission | 12,17                    | 16,61                  | 7,17                 |

Die Seltenen Erden werden definiert über die Gruppe der Lanthanoide sowie Scandium und Yttrium und bilden meist teilweise oder vollständig eine Teilmenge der definierten kritischen Rohstoffe. Sie wurden in diesem Hauptmerkmal ebenfalls erfasst und sind in der Datenbasis im Anhang zu finden.

#### Fehlerquellen und Schäden

Das letzte aus der in Tab. 4.3 definierten Hauptmerkmale sind die *Fehlerquellen* und Schäden von Produkten. Zur besseren Lesbarkeit wird das Hauptmerkmal nur *Fehlerquellen* genannt. In den analysierten Daten entsteht eine vergleichbare Problematik wie bei den untersuchten *EOL-Strategien*, da sich die Fehlerquellen je nach Aufbau des Produktes und Untersuchungsrahmens der Veröffentlichung stark voneinander unterscheiden. Die Produktgruppen der Smartphones und Notebooks können in Fehlerquellen wie Display-, Gehäuse- und Akkuschaden noch miteinander verglichen werden, wobei gerade der Displayschaden in den Veröffentlichungen von Thiemann und Schneider sowie Prakash et al. mit zu den häufigsten Fehlerquellen zählt [Thiemann und Schneider, 2020, Prakash et al., 2016b]. Häufige Fehlerursachen von Notebooks wie z.B. die Festplatte, Displayabdeckung oder die Tastatur sind im Vergleich bei den Smartphones logischerweise nicht zu finden [Prakash et al., 2016b]. Da für einige Produktgruppen keinerlei Veröffentlichungen über Fehlerquellen gefunden wurden, ist die Aussagekraft dieses Merkmals auf die Produktgruppen der Smartphones, Notebooks und Waschmaschinen begrenzt. Häufige Fehlerquellen bieten das Potential, bessere konstruktive Lösungen zu finden und so die Nachhaltigkeit des jeweiligen Produktes zu steigern.

## 5 Synthese

Nachdem die erstellte Datenbasis im vorherigen Kapitel 4.3 exemplarisch gezeigt und die in Tab. 4.3 ausgewählten Hauptmerkmale in ihren Inhalten und Eigenschaften erklärt wurden, können diese nun detailliert untersucht werden. Die Analyse der Daten folgt dabei der in Kap. 3.2 formulierten Forschungsfrage, ob durch die Unschärfe in Eingangs- und Ausgangsdaten die Aussagekraft, wie auch die Vergleichbarkeit der veröffentlichten Ergebnisse nicht signifikant sind. Aus dieser Forschungsfrage werden Hypothesen für die Arbeit mit den Daten abgeleitet. Dabei werden die Hauptmerkmale auf ihre Vergleichbarkeit und ihren Beitrag zu gebildeten Life Cycle Inventors hin deskriptiv untersucht, ebenso wie die generierten Ökobilanzierungen in der Outputphase. Sollte keine deskriptive Vergleichbarkeit festgestellt werden können, werden die Daten mit geeigneten mathematischen Verfahren weiter untersucht, um eine Gruppierung bzw. Ähnlichkeit feststellen zu können. Um weiterhin zumindest in Teilen der Datenbasis eine Beantwortung der Forschungsfrage geben zu können, werden die selbsterstellten LCAs in diesem Schritt analysiert. Durch eine einheitliche Modellierung der Ökobilanzen und einer bekannten werkstofflichen Basis können diese generierten Daten einen Beitrag zu der Fragestellung bieten. Die zuvor definierten Produktgruppen aus Tab. 4.2 bilden bei der Analyse den Rahmen. Dabei werden erste Vergleiche innerhalb der drei gebildeten Kategorien Unterhaltungselektronik, Weißwaren und Fahrzeuge gemacht und im Anschluss werden Analysen über diese Kategorien hinweg erstellt. Die vollständige Datenbasis sowie die erzeugten Lebenszyklusanalysen sind im Anhang hinterlegt und werden referenziert.

### 5.1 Qualität der Datenbasis

Bevor die Daten analysiert werden, wurden diese auf ihre wissenschaftliche Qualität untersucht. Hildebrand et al. sprechen in dem Kontext von Informationsqualitätsdimensionen (IQ-Dimensionen) und beschreiben damit die Brauchbarkeit der vorlie-

## 5 Synthese

genden Informationen [Hildebrand et al., 2025]. Sie definieren dabei 15 IQ-Dimensionen, wie in Tab. 5.1 zu sehen, auf die im Folgenden eingegangen wird.

Tabelle 5.1: 15 IQ-Dimensionen, nach [Hildebrand et al., 2025]

|                          |                              |
|--------------------------|------------------------------|
| Zugänglichkeit           | (accessibility)              |
| Angemessener Umfang      | (appropriate amount of data) |
| Glaubwürdigkeit          | (believability)              |
| Vollständigkeit          | (completeness)               |
| Übersichtlichkeit        | (concise representation)     |
| Einheitliche Darstellung | (consistent representation)  |
| Bearbeitbarkeit          | (ease of manipulation)       |
| Fehlerfreiheit           | (free of error)              |
| Eindeutige Auslegbarkeit | (interpretability)           |
| Objektivität             | (objectivity)                |
| Relevanz                 | (relevancy)                  |
| Hohes Ansehen            | (reputation)                 |
| Aktualität               | (timeliness)                 |
| Verständlichkeit         | (understandability)          |
| Wertschöpfung            | (value-added)                |

Bei der IQ-Dimension der **Zugänglichkeit** wurden bis auf einen Datensatz, der aus einem Interview stammt, alle weiteren Daten aus öffentlich zugänglichen Quellen bezogen. Die Nutzung des nicht öffentlichen Datensatzes für diese Veröffentlichung wurde dabei schriftlich bestätigt, daher sind diese mit in dieser Arbeit inkludiert. Dem **angemessenen Umfang** wurde nach Möglichkeiten Sorge getragen, dabei gibt es allerdings bei manchen Produktgruppen sowie Hauptmerkmalen Lücken in den Daten, da hierzu keine öffentlich zugänglichen Daten existieren. Bei Produktgruppen, wie denen der Fahrräder und in manchen Merkmalen der Pedelecs wurden Hersteller angeschrieben, dabei konnten bis auf eine weitere Quelle keine anderen Daten bezogen werden. Für das Hauptmerkmal der *LCAs nach Werkstoffen* wurden mithilfe der Veröffentlichungen für die *stoffliche Zusammensetzung* selbst Datensätze generiert, um den Umfang der vorliegenden Daten zu verbessern.

In der Dimension der **Glaubwürdigkeit** wurden bei der Auswahl der Veröffentlichungen wissenschaftliche Quellen klar präferiert. So stammen die meisten der Quellen aus Tagungsbänden, Journal-Veröffentlichungen oder Büchern, die für die berechneten und benutzten Daten jeweils die zugrundeliegende Basis veröffentlicht oder referenziert haben. Sofern Daten von Herstellern bezogen wurden, handelt es

sich bei diesen um größere Unternehmen, die meistens auch gleichzeitig jährliche Nachhaltigkeitsberichte veröffentlichen, um so ihre Transparenz zu erhöhen. Da für diese Daten aber oftmals keine Basis bzw. Referenzen herausgegeben werden, können diese Daten in ihrer Glaubwürdigkeit als leicht eingeschränkt angesehen werden. Für das Merkmal der **Vollständigkeit** wurde in der Gesamtheit dieser Arbeit darauf geachtet, dass verschiedene Produkte in mehreren Gruppen analysiert wurden, um ein umfassendes Bild geben zu können. Auch die betrachteten Hauptmerkmale aus Tab. 4.3 wurden so gewählt, dass sie mit teilweise indirekten Merkmalen ein vielschichtiges Bild für die Nachhaltigkeitsbewertung mithilfe der ermittelten Merkmale aus Tab. 4.1 bieten. Was die beiden nächsten IQ-Dimensionen **Übersichtlichkeit** und **einheitliche Darstellung** angeht, so wurden alle Daten in einer Tabelle zusammengetragen, welche im Anhang dieser Arbeit zu finden ist. Diese ist nach den ausgewählten Hauptmerkmalen sortiert, sowie innerhalb der Hauptmerkmale wieder nach den einzelnen Produktgruppen für eine gute Übersichtlichkeit. Für die einheitliche Darstellung wurden alle gesammelten absoluten Datenwerte umgerechnet in prozentuale Werte, um eine einfachere und einheitlichere Vergleichbarkeit zu gewährleisten. Es wurde auf gleiche Einheiten bei den erfassten Daten innerhalb der einzelnen Hauptmerkmale geachtet. Für eine **einheitlichere Darstellung** der Daten der *stofflichen Zusammensetzung* wurden bspw. weitere Veröffentlichungen genutzt, um die in den analysierten Quellen aufgeführten Halbleiterkomponenten in einzelne, vergleichbare Werkstoffe zu übersetzen.

Da die verwendete Datenbasis im Anhang zu finden ist, ist die IQ-Dimension der **Bearbeitbarkeit** als positiv zu beantworten. Der Punkt der **Fehlerfreiheit** hängt indirekt mit der Glaubwürdigkeit und Vollständigkeit der Daten zusammen, die schon zuvor besprochen wurden. Wenn es in die Analyse der gesammelten Daten geht, werden gebräuchliche mathematische Verfahren angewendet für die Gewährleistung der Fehlerfreiheit. Für die nächste IQ-Dimension der **eindeutigen Auslegbarkeit** schreiben Hildebrand et al., dass „Informationen [...] in gleicher, fachlich korrekter Art und Weise begriffen werden“ sollen [Hildebrand et al., 2025]. Die in dieser Analyse entstehenden Informationen sollen daher in möglichst gleichbleibender Art vorgestellt werden, um dieser IQ-Dimension Rechnung zu tragen. Die **Objektivität** der gesammelten Daten stellt eine Grundvoraussetzung für wissenschaftliche Veröffentlichungen dar und wird daher in den untersuchten Quellen als gegeben angenommen. Das Verwenden verschiedener wissenschaftlich anerkannter Verfahren

für die Datenanalyse, inklusive der Anwendung der 15 IQ-Dimensionen sichert bei den Ergebnissen die Objektivität. Für den Punkt der **Relevanz** können ebenfalls wieder die recherchierten Veröffentlichungen genannt werden. So sind die meisten der erfassten Quellen wissenschaftlicher Natur mit einem starken Bezug zum Fachgebiet der Nachhaltigkeit. Betrachtete Quellen von Unternehmen haben ebenfalls einen stärkeren Hintergrund in der Nachhaltigkeit. Die verwendeten Informationen können daher als relevant angesehen werden. Die IQ-Dimension „**hohes Ansehen**“ nach Hildebrand et al. kann aus zuvor genannten Gründen auch positiv beantwortet werden [Hildebrand et al., 2025]. Viele der verwendeten Veröffentlichungen stammen von renommierten Institutionen wie bspw. dem Fraunhofer Institut (vgl. Sánchez et al. und weitere), dem Umweltbundesamt (vgl. Prakash et al., und weitere) dem Journal of Cleaner Production (vgl. Danilecki et al. und weitere) sowie anderen [Sánchez et al., 2022, Prakash et al., 2016b, Danilecki et al., 2017].

Der IQ-Dimension der **Aktualität** wird gefolgt, da Veröffentlichungen innerhalb der letzten zehn Jahre genutzt werden. Nur in Einzelfällen wurde darüber hinaus recherchiert. Zum Zeitpunkt des Verfassens dieser Arbeit entsprechen die verwendeten Quellen daher dem Zeitgeist und können als aktuell angesehen werden. Die letzten beiden IQ-Dimensionen **Verständlichkeit** und **Wertschöpfung** liegen im Kern dieser Arbeit, so soll diese einen Beitrag zu der Verbesserung von Nachhaltigkeitsbewertung schaffen und einen verständlichen Zugang zu dem Thema bieten. Die erfassten Daten wurden ebenfalls nach diesen beiden IQ-Dimensionen ausgewählt.

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass für die Erfassung der Datenbasis für den Analyseteil dieser Arbeit den von Hildebrand et al. verfassten 15 IQ-Dimensionen gefolgt wurde und die Daten eine geeignete Informationsqualität für die weitere Verarbeitung besitzen [Hildebrand et al., 2025].

## 5.2 Forschungsfrage und Hypothesen

Nachdem die Güte der Datenbasis mithilfe der IQ-Dimensionen bewertet wurde, werden zunächst aus der in Kap. 3.2 definierten Forschungsfrage konkrete Hypothesen abgeleitet, nach denen die gesammelten Daten im Folgenden analysiert werden.

Ausgehend von der formulierten Forschungsfrage, wie vergleichbar die Ergebnisse von Ökobilanzen aufgrund der Unschärfe von Eingangs- und Ausgangsdaten sind,

lassen sich verschiedene konkrete Hypothesen ableiten. Die Forschungsfrage sowie die drei Hypothesen sind in Abb. 5.1 zu sehen.

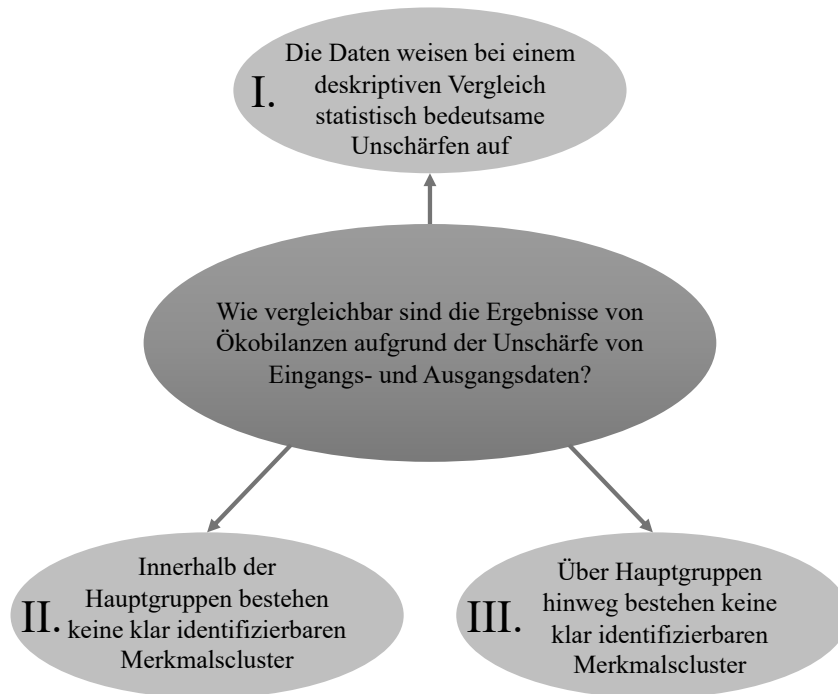


Abbildung 5.1: Forschungsfrage und daraus abgeleitete Hypothesen

Die postulierte Unschärfe der Ein- und Ausgangsdaten kann dabei in eine einzelne Hypothese gebracht werden. **Die erste Hypothese** besagt daher, dass die Daten bei einem deskriptiven Vergleich statistisch bedeutsame Unschärfen aufweisen. Weiter muss für eine Vergleichbarkeit der veröffentlichten Ergebnisse eine gemeinsame Basis gegeben sein, die diese Vergleichbarkeit ermöglicht. Diese gemeinsame Basis kann also als Gruppe von gleichen Varianten, gleichen Merkmalen oder anderen gleichen Eigenschaften verstanden werden.

**Die zweite Hypothese**, die abgeleitet aus der Forschungsfrage gestellt wird, ist die, dass innerhalb der Hauptgruppen keine klar identifizierbaren Merkmalscluster bestehen. Die Hypothese der Vergleichbarkeit bzw. der Gruppierung wird dabei allerdings weiter spezifiziert und unterteilt, gerade im Hinblick auf die gebildete Datenbasis. So validiert die zweite abgeleitete Hypothese zu dieser Thematik, ob es eine Gruppierung innerhalb der in Tab. 4.2 ausgewählten drei Hauptgruppen gibt, da diese ja von sich aus schon eine höhere Ähnlichkeit in einzelnen Aspekten bieten.

## 5 Synthese

Darüber hinaus wird mit **der dritten Hypothese** überprüft, ob über Hauptgruppen hinweg keine klar identifizierbaren Merkmalscluster existieren. So können also aus der eingangs gestellten Forschungsfrage drei konkrete Hypothesen abgeleitet werden, die sich weit genug voneinander distanzieren, um jeweils eine eigene Fragestellung zu bilden, aber dennoch alle der Validierung der aufgestellten Forschungsfrage dienen.

Abgeleitet von den drei Hypothesen soll mit einer explorativen Studie anhand der gesammelten Daten begonnen werden. Diese dient „der genauen Erkundung und Beschreibung eines Sachverhaltes mit dem Ziel, wissenschaftliche Forschungsfragen, Hypothesen und Theorien zu entwickeln“ [Döring, 2023]. Bei diesem Vorgehen werden anhand der ersten entwickelten Hypothese, die erfassten Daten deskriptiv verglichen, um die Forschungsfrage ggf. zu validieren. Für die Beantwortung der Forschungsfrage und die aufgestellten Hypothesen zwei und drei geht die Analyse eher in eine explanative Studie über. Für diesen Teil der Analyse soll mithilfe der Datenbasis eine Cluster-Analyse durchgeführt werden für die Datensätze, die den meisten Umfang haben. Als Ergebnis können dann die Hypothesen zwei und drei beantwortet werden, ob es eine Vergleichbarkeit bzw. Gruppierung einzelner Eigenschaften innerhalb der Gruppen und über die Gruppen hinweg gibt. Die Cluster-Analyse gilt an dieser Stelle als explorative multivariate Auswertungstechnik und wirkt dabei „datenreduzierend bzw. datenstrukturierend“ [Döring, 2023]. Sie bildet dabei die Brücke vom explorativen Teil hin zum explanativen, um auch erste Antworten zu den Zusammenhängen zu geben.

Als ersten Schritt werden in der Datenbasis Mittelwerte  $\bar{x}$  gebildet, innerhalb der drei Hauptgruppen und über alle Produktgruppen hinweg. Bis auf die Hauptmerkmale der *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen* sowie den *Fehlerquellen* sind alle ermittelten Daten metrisch skaliert und daher für die Bildung von Mittelwerten und Standardabweichungen geeignet. Die Mittelwerte berechnen sich dabei nach

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{n} \quad (5.1)$$

und sind „die Summe aller Werte [x] durch die Anzahl [n] der Werte dividiert [...]“ [Bortz und Schuster, 2010]. Dabei wurde der Mittelwert und nicht der Median ausgewählt, da die Daten eher ungleich verteilt sind und nicht nur sehr wenige Ausreißer haben sondern generell sehr unterschiedlich verteilt sind. Um die Variabilität

innerhalb der gefundenen Daten auszudrücken werden Varianz  $s^2$  und damit verbunden die Standardabweichung  $s$  benötigt. Für die Berechnung von Varianz und darauffolgend Standardabweichung werden Daten mit Intervall- bzw. Verhältnisskala vorausgesetzt, daher können mit diesen Verfahren nicht die gefundenen Daten mit Nominal- bzw. Ordinalskala beschrieben werden [Bortz und Schuster, 2010]. Für die validen Daten berechnet sich die Varianz dann nach

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \quad (5.2)$$

und steht dabei für „die Summe der quadrierten Abweichungen aller Messwerte  $[x]$  vom arithmetischen Mittel, dividiert durch  $n - 1$ “ [Bortz und Schuster, 2010]. Durch die Quadrierung der Messwerte ist eine Interpretation der Ergebnisse schwierig, deshalb wird anstelle der Varianz die Standardabweichung ausgerechnet, welche die Quadrierung wieder rückgängig macht [Bortz und Schuster, 2010]. Diese lässt sich dann berechnen mit

$$s = \sqrt{s^2} \quad (5.3)$$

und wird als Standardabweichung bzw. manchmal auch als „Streuung“ bezeichnet, wobei dieser Begriff eine gewisse Doppeldeutigkeit mit sich bringt [Bortz und Schuster, 2010].

## 5.3 Deskriptiver Vergleich

Für den deskriptiven Vergleich wird der Variationskoeffizient  $[v]$  als Basis benutzt. Dieser ist ein dimensionsloses Streuungsmaß und das Verhältnis zwischen Standardabweichung und Mittelwert [Bankhofer und Vogel, 2008]. Die Formel dafür ist

$$v = \frac{s}{\bar{x}} * 100 \quad (5.4)$$

und wird in Prozent angegeben [Bankhofer und Vogel, 2008]. Bankhofer und Vogel schreiben dazu, „[d]er Variationskoeffizient macht besonders Sinn, wenn man die Streuungen verschiedener, auf unterschiedlichen Skalen gemessener Merkmale miteinander vergleichen will“ [Bankhofer und Vogel, 2008]. Bei einem Wert von  $v = 100\%$  wird eine maximale Variation erreicht, wohingegen eine minimale Varia-

## 5 Synthese

tion vorliegt, wenn  $v$  gegen null tendiert. Da in der Literatur keine Schwellwerte für  $v$  vorgegeben werden, wird gerade die Hälfte als geeignet betrachtet, da hier weder eine sehr kleine noch eine sehr große Variation vorliegt, sondern eher ein Normalfall. Aus dem Variationskoeffizienten und der Annahme von  $v = 50\%$  wird ein Kriterium definiert. Das definierte Kriterium sagt aus, dass die Standardabweichung nur maximal die Hälfte des zugehörigen Mittelwerts betragen sollte oder weniger. Dies kann beschrieben werden als

$$s \leq \frac{1}{2}\bar{x} \quad (5.5)$$

und gilt für die weitere Analyse als Annahme für eine Vergleichbarkeit der Daten innerhalb der Gruppen. Das in dieser Arbeit definierte und untersuchte Kriterium gilt daher als erfüllt, wenn der Variationskoeffizient kleiner als 0,5 ist. In dieser Arbeit wird es mit  $k$  aufgeführt und kann „j“ annehmen, wenn das Kriterium erfüllt wurde und „n“ wenn es nicht erfüllt wurde.

### Stoffliche Zusammensetzung

Der deskriptive Vergleich der Daten wird mit dem Hauptmerkmal der *stofflichen Zusammensetzung* begonnen. Da bei dieser spezifischen Datenbasis nicht jede betrachtete Veröffentlichung dieselben Werkstoffe untersucht hat, wird an dieser Stelle nur auf die vergleichbaren Werte eingegangen. Die vollständige Analyse ist dabei im Anhang zu finden. In der ersten Produktgruppe aus Tab. 4.2 werden Smartphones und Notebooks miteinander verglichen. Gut zu vergleichende Werkstoffe bzw. Elemente sind Eisen, Magnesium, Aluminium, Kupfer, Zinn, Gold, Silber, Palladium und bei den Kunststoffen ABS, der Wert „andere Kunststoffe“ sowie Glas. Die zusammengefassten Mittelwerte und Standardabweichungen aller untersuchten Quellen sind in Tabelle 5.2 für die Hauptgruppe Smartphones und Notebooks zu sehen. Das ausgewählte Kriterium nach Gl. 5.5 wird von keinem der betrachteten Werkstoffe bzw. Elementen erreicht.

In der Gruppe der Weißwaren können aufgrund der Datenbasis nur Eisen und „andere Kunststoffe“ verglichen werden, wobei Eisen mit einem Mittelwert von 45,76 % und einer Standardabweichung von 18,4 % das Kriterium nach Gl. 5.5 nicht verletzt. Beim Merkmal „andere Kunststoffe“ wird dieses verletzt mit  $\bar{x} = 23,25\%$  und  $s = 37,15\%$ . Auch in der Hauptgruppe der Fahrzeuge ist Eisen das einzige Merk-

Tabelle 5.2: Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent der *stofflichen Zusammensetzung* ausgewählter Werkstoffe aller Produkte der Hauptgruppe Smartphones und Notebooks

|                    | $\bar{x}$ | s     | k |
|--------------------|-----------|-------|---|
| Fe                 | 12,15     | 11,40 | n |
| Mg                 | 3,13      | 3,07  | n |
| Al                 | 7,18      | 6,33  | n |
| Cu                 | 5,57      | 3,49  | n |
| Sn                 | 0,44      | 0,31  | n |
| Au                 | 0,014     | 0,01  | n |
| Ag                 | 0,09      | 0,10  | n |
| Pd                 | 0,00      | 0,00  | n |
| ABS                | 3,29      | 4,65  | n |
| andere Kunststoffe | 6,62      | 7,51  | n |
| Glas               | 11,76     | 14,26 | n |

mal, welches das Kriterium nach Gl. 5.5 erfüllt mit  $\bar{x} = 53,4\%$  und  $s = 23,74\%$ , alle anderen Werkstoffe bzw. Elemente liegen mit ihrer Standardabweichung in einem größeren Bereich und sind im Anhang zu finden. Werden die Mittelwerte und Standardabweichungen über die drei übergeordneten Produktgruppen hinweg betrachtet, gibt es keinen Werkstoff bzw. kein Element, welches unter dem definierten Kriterium (Gl. 5.5) bleibt. Die errechneten Werte für Mittelwerte und Standardabweichungen der Hauptgruppe der Fahrzeuge sind in Tab. 5.3 zu sehen.

### Absatzzahlen

Als nächstes Hauptmerkmal werden die *Absatzzahlen* im deskriptiven Vergleich betrachtet. Bei der Betrachtung wurden nur die Jahre ausgewählt, für die bei allen Produkten Verkaufszahlen vorlagen. Wie schon in der Datenbasis (siehe Kap. 4.3) erwähnt, werden in der Analyse nur Verkaufszahlen für Deutschland betrachtet. Die errechneten Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tab. 5.4 zu sehen. In der ersten Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks ist die Standardabweichung im betrachteten Zeitraum immer annähernd so groß, wie die errechneten Mittelwerte, was an deutlich geringeren Absatzzahlen in der Produktgruppe der Notebooks liegt. Bei den Hauptgruppen der Weißwaren wie auch der Fahrzeuge liegt die Standardabweichung meist deutlich unter den errechneten Mittelwerten und erfüllt dabei

Tabelle 5.3: Mittelwerte und Standardabweichung in Prozent der *stofflichen Zusammensetzung* ausgewählter Werkstoffe aller Produkte der Hauptgruppe Fahrzeuge

| Werkstoff          | $\bar{x}$ | s     | k |
|--------------------|-----------|-------|---|
| Fe                 | 53,40     | 23,74 | j |
| Si                 | 1,17      | 1,44  | n |
| Al                 | 20,66     | 17,59 | n |
| Cu                 | 2,72      | 2,19  | n |
| Ni                 | 0,11      | 0,14  | n |
| Sn                 | 0,29      | 0,36  | n |
| Zn                 | 0,13      | 0,16  | n |
| Au                 | 0,00      | 0,01  | n |
| Ag                 | 0,02      | 0,02  | n |
| Pd                 | 0,00      | 0,00  | n |
| Pb                 | 0,22      | 0,22  | n |
| ABS                | 0,85      | 1,09  | n |
| PC                 | 0,00      | 0,00  | n |
| (LD)PE             | 1,08      | 1,25  | n |
| PP                 | 2,25      | 2,14  | n |
| PS                 | 0,27      | 0,35  | n |
| PVC                | 0,28      | 0,28  | n |
| PA 6               | 0,38      | 0,49  | n |
| PMMA               | 0,04      | 0,07  | n |
| Epoxy              | 0,44      | 0,60  | n |
| Andere Kunststoffe | 14,16     | 12,45 | n |
| Glas               | 1,53      | 1,92  | n |

das definierte Kriterium Gl. 5.5. In der Hauptgruppe der Fahrzeuge können sinkende Absatzzahlen bei den PKW ermittelt werden, wohingegen Verkäufe bei den Pedelecs im Verlauf stark ansteigen auf zuletzt ca. 2,1 Millionen Pedelecs pro Jahr, verglichen mit 2,8 Millionen PKW pro Jahr. Der Absatz von Fahrrädern ist relativ stabil, nur in den letzten Jahren leicht rückläufig mit ca. 4 Millionen Fahrrädern pro Jahr und damit immer noch deutlich größer als die Verkäufe von PKW und Pedelecs. Werden die Mittelwerte über alle Hauptgruppen verglichen, ist zu sehen, dass die Verkäufe von Smartphones und Notebooks mit ca. 11,6 Millionen Stück pro Jahr zwar auch leicht zurück gehen, allerdings noch deutlich größer als die der Weißwaren mit etwa 3,1 Millionen Stück pro Jahr oder den Fahrzeugen mit 2,95 Millionen pro Jahr. Dabei entwickeln sich alle Mittelwerte in den letzten Jahren leicht rückläufig, wie in

Tab. 5.4 zu sehen.

Tabelle 5.4: Auszug der Mittelwerte und Standardabweichungen aller Produkte des Hauptmerkmals *Absatzzahlen* in absoluten verkauften Einheiten

|      | Smartphones + Notebooks |          |   | Weißwaren |        |   | Fahrzeuge |         |   |
|------|-------------------------|----------|---|-----------|--------|---|-----------|---------|---|
|      | $\bar{x}$               | s        | k | $\bar{x}$ | s      | k | $\bar{x}$ | s       | k |
| 2014 | 14918000                | 13409573 | n | 3125000   | 176777 | j | 2540000   | 1861075 | n |
| 2015 | 15677500                | 14881062 | n | 3300000   | 212132 | j | 2703333   | 1959753 | n |
| 2016 | 14478000                | 13748984 | n | 3375000   | 106066 | j | 2673333   | 1821821 | n |
| 2017 | 13565500                | 13200976 | n | 3325000   | 106066 | j | 2670000   | 1701147 | n |
| 2018 | 13381000                | 13320478 | n | 3350000   | 141421 | j | 2866667   | 1675271 | n |
| 2020 | 13443500                | 12100718 | n | 3475000   | 247487 | j | 3303333   | 1580264 | j |
| 2021 | 13243000                | 12667111 | n | 3600000   | 353553 | j | 2985533   | 1179880 | j |
| 2022 | 12451000                | 12090112 | n | 3400000   | 353553 | j | 3037839   | 1065493 | j |
| 2023 | 11599500                | 12304365 | n | 3150000   | 212132 | j | 2946152   | 784888  | j |

## Nutzungsdauer

Im Folgenden werden die Daten zur *Nutzungsdauer* der einzelnen Produktgruppen und Hauptkategorien analysiert. In diesem Merkmal wurde nur die mittlere Nutzungsdauer (eng.: average useage time) der betrachteten Produkte ausgewertet, da diese das meistverwendete Merkmal in den analysierten Quellen ist. Für die Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks wurde ein Mittelwert von 3,7 Jahren mit einer Standardabweichung von ca. 0,94 errechnet. Dabei sind die angegebenen mittleren Nutzungsdauern von Smartphones etwas kürzer mit ca. 2,6 Jahren und die der Notebooks mit 4,4 Jahren im Vergleich länger. Die Werte der Hauptgruppe der Weißwaren wurden errechnet mit  $\bar{x} = 14,7$  und  $s = 3,28$  Jahren. Auch hier wurde das zuvor definierte Kriterium (Gl. 5.5) erfüllt, da die Standardabweichung deutlich geringer als der Mittelwert ist. Die Mittelwerte der beiden Produktgruppen Waschmaschinen und Kühlschränke unterscheiden sich dabei auch nur wenig mit 14,25 und 15 Jahren mittlerer Nutzungsdauer. Die letzte betrachtete Hauptgruppe der Fahrzeuge kommt in der mittleren Nutzungsdauer auf  $\bar{x} = 7,66$  und  $s = 2,65$  Jahre und besitzt damit im Vergleich auch eine eher kleine Standardabweichung. Dabei werden PKW im Mittel 9,12 Jahre genutzt und Pedelecs 7,17 Jahre. Für Fahrräder wurde keine mittlere Nutzungsdauer als Wert gefunden sondern nur eine Abstufung nach „mehr als X Jahre“ oder „weniger als X Monate“. Daher können diese Daten nicht mit den anderen ermittelten verglichen werden.

### LCAs nach Phasen

Das Hauptmerkmal der *LCAs nach Phasen* kann unterteilt werden in die fünf Untermerkmale und einzelnen Phasen Rohmaterialbeschaffung, Produktion, Transport, Nutzung und End-of-Life.

Tabelle 5.5: Errechnete Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent aller Produkte für das Hauptmerkmal *LCAs nach Phasen*

| Phase                     |           | Rohmaterialbeschaffung | Produktion | Transport | Nutzung | EOL    |
|---------------------------|-----------|------------------------|------------|-----------|---------|--------|
| Smartphones und Notebooks | $\bar{x}$ | 3,12                   | 56,81      | 8,97      | 27,63   | -1,31  |
|                           | s         | 13,89                  | 26,07      | 17,44     | 17,43   | 3,40   |
|                           | k         | n                      | j          | n         | n       | n      |
| Weißwaren                 | $\bar{x}$ | 11,05                  | 12,76      | 0,37      | 76,61   | -0,79  |
|                           | s         | 12,11                  | 13,28      | 0,57      | 7,43    | 2,40   |
|                           | k         | n                      | n          | n         | j       | n      |
| Fahrzeuge                 | $\bar{x}$ | 20,18                  | 35,92      | 0,76      | 61,57   | -18,43 |
|                           | s         | 54,54                  | 24,45      | 2,30      | 32,29   | 39,60  |
|                           | k         | n                      | n          | n         | n       | n      |

Die dabei errechneten Mittelwerte und Standardabweichungen für die einzelnen Phasen und die jeweiligen Hauptgruppen sind in Tabelle 5.5 zu sehen. Bei den prozentual dargestellten Werten fällt in der Gruppe der Smartphones und Notebooks auf, dass die Phase der Produktion am größten ausfällt mit  $\bar{x} = 56,8\%$  gefolgt mit der Nutzungsphase die bei  $\bar{x} = 27,63\%$  des emittierten  $\text{CO}_2$ s liegt. Dieses Verhältnis zwischen Produktions- und Nutzungsphase kehrt sich für die Hauptgruppen Weißwaren und auch bei den Fahrzeugen um. Bei den Weißwaren ist die Nutzungsphase die größte mit ca. 76,61 % und die Phase der Produktion liegt mit 12,76 % deutlich darunter. Bei den Fahrzeugen fällt die Nutzungsphase mit ca. 61,57 % aus und die der Produktion liegt bei 35,92 %. Wird die Standardabweichung betrachtet, so ist diese in Bezug auf das anfangs definierte Kriterium Gl. 5.5 sehr unterschiedlich ausgeprägt. In der Phase der Rohmaterialbeschaffung wird das Kriterium nicht erfüllt, bei der Produktion nur von der Hauptkategorie der Smartphones und Notebooks. In der Nutzungsphase erfüllen die Weißwaren das Kriterium, alle anderen ermittelten Standardabweichungen sind größer als der halbe Mittelwert. In der Hauptgruppe der Fahrzeuge ist der Mittelwert der Rohmaterialbeschaffung verglichen mit den anderen mit 20,18 % am höchsten und der EOL-Anteil mit  $-18,43\%$  am geringsten. Die Phase des Transports fällt bei allen betrachteten Gruppen mit Werten zwischen 0,37 % und 8,97 % gering aus. Die gesammelten Daten dieses Hauptmerkmals werden

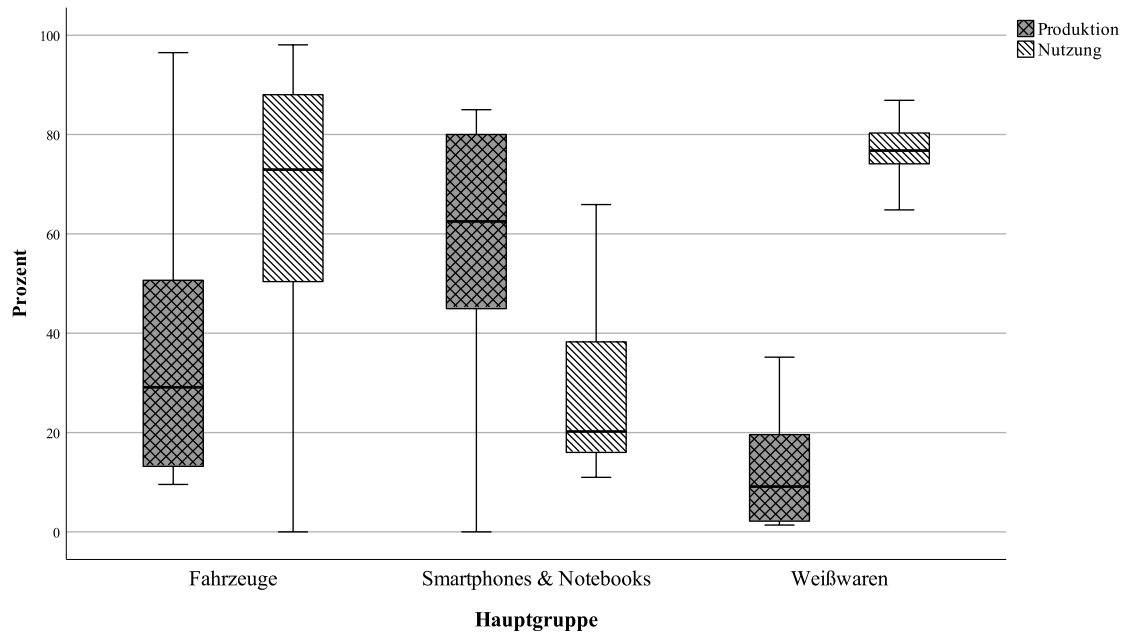


Abbildung 5.2: Boxplots der analysierten Daten für die Phasen der Produktion und Nutzung des Hauptmerkmals *LCAs nach Phasen*

später noch für Analysen und die Beantwortung der zweiten und dritten Hypothese (siehe Anfang Kap. 5.1) eingesetzt.

Aufgrund der Datenbasis wurde sich bei diesem Merkmal zur weiteren Beschreibung für die Erzeugung von Boxplots entschieden, da diese durch ihre Box zum einen die zentrale Tendenz zeigt, mithilfe der Whisker aber trotzdem eine gute Einschätzung der Variabilität der Daten liefern [Bortz und Schuster, 2010]. Die Boxplots wurden mit der Software SPSS von IBM in der Version 31 erstellt. Mithilfe der erzeugten Boxplots werden die beiden Phasen der Produktion und Nutzung im Folgenden noch einmal gezeigt und genauer erläutert.

In Abbildung 5.2 sind die Boxplots der jeweiligen Hauptgruppen für die Phase der Produktion zu sehen. Bei den Fahrzeugen ist dabei gut zu sehen, dass der obere Whisker sehr weit vom Median und auch der eigentlichen Box aufspannt. Die Box selber geht mit ihrem unteren und oberen Quartil von ca. 16 % bis ca. 52 % und spannt damit auch einen eher großen Bereich auf, in dem die Hälfte der Datenpunkte liegen. Für die Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks baut sich das ganze umgekehrt zu der Hauptgruppe der Fahrzeuge auf. Hier streckt sich der

## 5 Synthese

untere Whisker weit von der eigentlichen Box und vom Median der bei ca. 64 % liegt. Die Box selber spannt sich von ca. 47 % bis 80 % auf. In der Hauptgruppe der Weißwaren liegen die Daten enger zusammen, hier spannen sich sowohl die Whisker, als auch das ober und untere Quartil der Box enger auf. Die Box reicht dabei von ca. 5 % bis knapp 20 %.

Die Boxplots der Nutzungsphase für die einzelnen Hauptgruppen sind in Abbildung 5.2 zu sehen. Anhand der errechneten Daten ist gut zu sehen, dass sich im Vergleich mit der Produktionsphase die prozentualen Anteile immer in die entgegengesetzte Richtung verschieben. So reichen die Quartile des Boxplots der Fahrzeuge von etwa 50 % bis knapp 90 % mit einem sehr langen unteren Whisker der bis auf 0% geht. Die Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks spannt einen geringeren Bereich auf von ca. 15 % bis knapp 40 %, wobei hier der obere Whisker bis ca. 70 % reicht. Die Weißwaren liegen auch in der Nutzungsphase sehr dicht zusammen mit einer vergleichsweise kleinen Box von ca. 75 % bis 80 % und kleinen Whiskern, die von 65 % bis knapp 90 % reichen.

### LCIs der Lebenszyklusanalysen

Die Analyse der Life Cycle Inventory Daten der *LCAs nach Phasen* muss zunächst feiner gegliedert werden, bevor damit begonnen werden kann. Wie schon in Kapitel 4.3 erklärt, können die ermittelten Datensätzen in die LCIs der Produkte selbst, sowie in verschiedene Szenarios unterteilt werden. Dabei stellen die Szenarios verschiedene Betrachtungsweisen auf den gesamten Lebenszyklus eines Produktes dar. Was die Art der Daten angeht, müssen ebenfalls weitere Unterscheidungen getroffen werden. Innerhalb des Hauptmerkmals *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen* wurden sowohl metrisch als auch nominal skalierte Daten ermittelt. Dabei können nur die metrisch skalierten Daten in Bezug auf Verhältnisse weiter deskriptiv analysiert werden [Bortz und Schuster, 2010]. Die nominal Skalierten werden in diesem Schritt nur auf eine mögliche Gleichheit oder Verschiedenheit hin betrachtet und später noch tiefgreifender analysiert. Für die metrisch skalierten Daten eignen sich die Untermerkmale „Anzahl Einheiten“, „Lebensdauer“ sowie „Energieverbrauch in kWh/Jahr“ besonders für einen deskriptiven Vergleich.

Die ausgewählten und errechneten Daten sind in Tabelle 5.6 zu sehen. Bis auf den Energieverbrauch in kWh pro Jahr erfüllen die anderen Untermerkmale das de-

Tabelle 5.6: Errechnete Mittelwerte und Standardabweichungen aller Produkte für das Hauptmerkmal *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen*

|                           |           | Anzahl Einheiten | Lebensdauer (Jahre) | Energieverbrauch kWh/Jahr |
|---------------------------|-----------|------------------|---------------------|---------------------------|
| Smartphones und Notebooks | $\bar{x}$ | 1,20             | 4,79                | 27,60                     |
|                           | $s$       | 0,54             | 2,03                | 68,72                     |
|                           | $\bar{k}$ | j                | j                   | n                         |
| Weißwaren                 | $\bar{x}$ | 1,31             | 17,38               | 59,12                     |
|                           | $s$       | 0,79             | 4,29                | 56,74                     |
|                           | $\bar{k}$ | n                | j                   | n                         |
| Fahrzeuge                 | $\bar{x}$ | 1,00             | 8,80                | 18,00                     |
|                           | $s$       | 0,00             | 4,07                | 16,43                     |
|                           | $\bar{k}$ | j                | j                   | n                         |

finierte Kriterium Gl. 5.5, da die Standardabweichung deutlich kleiner ist als die errechneten Mittelwerte. Die absoluten Daten zeigen für die Fahrzeuge, dass die benutzte Referenzmenge an verwendeten Einheiten im Mittel eins ist. Bei den Weißwaren sowie den Smartphones und Notebooks wurden etwas mehr als eine Einheit für einen Lebenszyklus als Berechnungsgrundlage berechnet. Die Lebensdauer fällt in den Annahmen sehr unterschiedlich aus, wobei sich die hier angenommene Lebensdauer nochmals von den Angaben zu denen im Hauptmerkmal *Nutzungsdauer* gemachten unterscheidet. Die Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks kommen dabei auf  $\bar{x} = 4,79$  Jahre, die Weißwaren auf  $\bar{x} = 17,38$  Jahre und die Fahrzeuge auf  $\bar{x} = 8,8$  Jahre. Bei den Daten der Fahrzeuge ist in diesem Kontext zu beachten, dass in der erstellten Datenbasis keine Daten für verschiedene PKW-Szenarios gefunden wurden und diese daher kein Teil von Tab. 5.6 sind. Das erklärt die errechnete Lebensdauer und den geringen Energieverbrauch pro Jahr. Werden die Boxplots der gesammelten Daten betrachtet, können viele Ausreißer betrachtet werden.

In Abbildung 5.3 können in den Hauptgruppen Smartphones und Notebooks sowie Weißwaren viele Ausreißer aus dem Boxplot beobachtet werden, wobei die Zahlen an den Ausreißern für den jeweiligen Datensatz in der Berechnung stehen. Bei den berechneten Boxplots für die Lebensdauer ergibt sich ein ähnliches Bild, zu sehen in Abb. 5.4, mit gerade in der Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks vielen Ausreißern. Die errechneten Boxen der Boxplots sind im Vergleich zu denen aus dem Hauptmerkmal *LCAs nach Phasen* eher klein mit keinen oder kleinen Whiskern.

Werden die nominal skalierten Daten aus dem Hauptmerkmal betrachtet, fällt gerade bei den betrachteten Lebenszyklusphasen auf, dass diese in den meisten Quellen als Annahme für das jeweilige Life Cycle Inventory alle Phasen inkludiert haben. Bei

## 5 Synthese

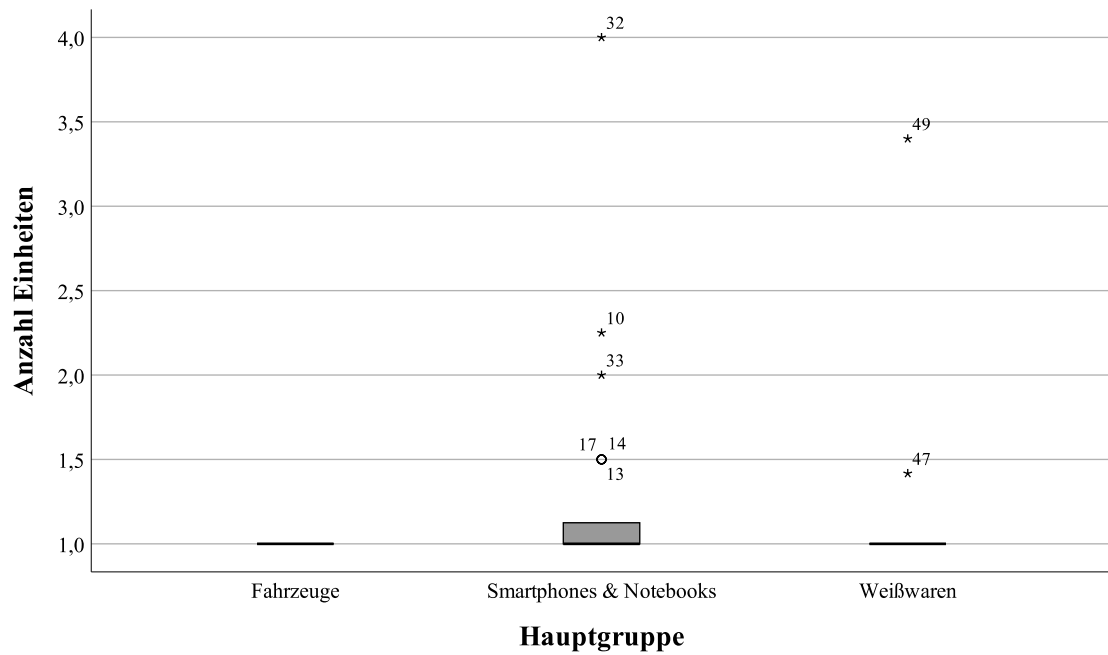


Abbildung 5.3: Boxplots der analysierten Daten für die Phase der Nutzung des Hauptmerkmals *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen*

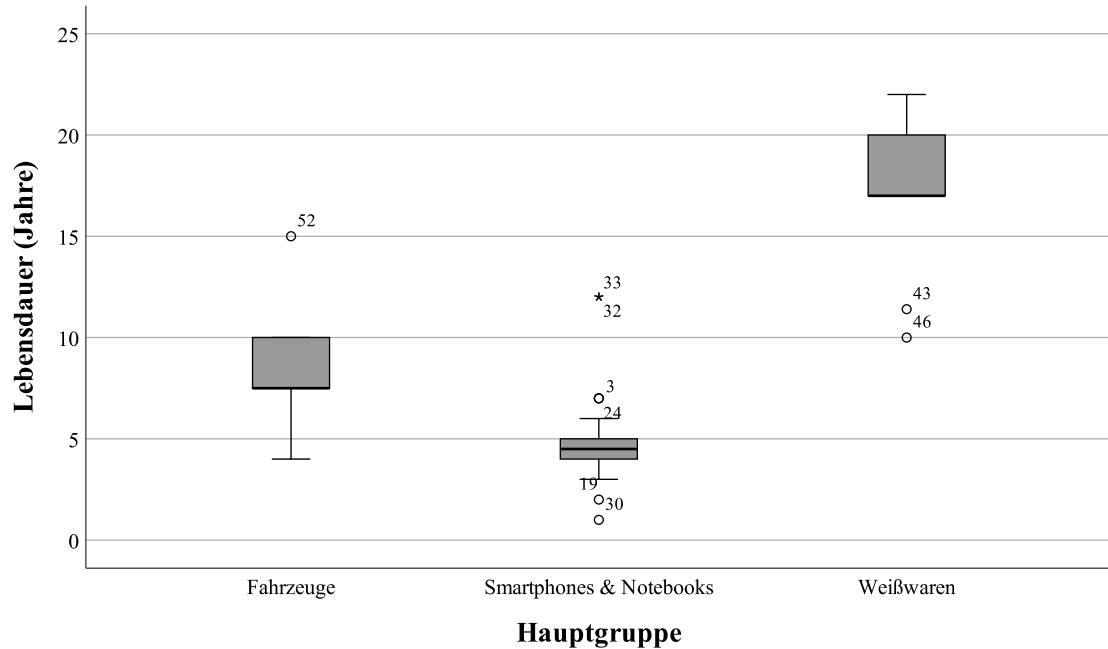


Abbildung 5.4: Boxplots der analysierten Daten für die Phase der Nutzung des Hauptmerkmals *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen*

den benutzten Datenquellen sowie der Art der Daten sind auf den ersten Blick keine größeren Übereinstimmungen zu sehen. Bei den Produktions- und Nutzungsstandorten wurden als mögliche Ziele China, Deutschland, global sowie Europa ermittelt, die alle in verschiedenen Konstellationen bei den untersuchten Veröffentlichungen gefunden wurden. Um die Daten nicht nur deskriptiv zu beschreiben, werden diese in einer Analyse im nächsten Kapitel tiefergehend betrachtet und ausgewertet.

### LCAs nach Bauteilen

Das Hauptmerkmal *LCAs nach Bauteilen* wird im Folgenden auszugsweise analysiert. Wie schon in der Datenbasis (siehe Kap. 4.3) aufgeführt, sind die angegebenen Bauteile je nach Produkt sehr unterschiedlich und nur wenig vergleichbar. Aufgrund der Datenbasis können daher oft keine Mittelwerte oder Standardabweichungen gebildet werden, außer für die Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks. Der Auszug der Daten ist in Tab. 5.7 zu sehen.

Tabelle 5.7: Auszug der Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent des Hauptmerkmals *LCAs nach Bauteilen* für alle Produkte der Hauptgruppe Smartphones und Notebooks

|                     | $\bar{x}$ | s     | k |
|---------------------|-----------|-------|---|
| Batterie            | 3,70      | 3,27  | n |
| Mainboard           | 15,78     | 18,12 | n |
| Display             | 11,02     | 8,74  | n |
| CPU                 | 6,56      | 10,89 | n |
| Andere Teile        | 3,16      | 6,25  | n |
| Diverse Aktivitäten | 8,10      | 12,10 | n |
| Transport           | 2,53      | 7,01  | n |

Bei den präsentierten Daten ist zu sehen, dass die Standardabweichungen immer ähnlich groß oder größer als die errechneten Mittelwerte sind. Das Kriterium (Gl. 5.5) ist daher von keinem der Einzelteile erfüllt. Wie schon zuvor erwähnt, sind die Gründe dafür der sehr unterschiedliche Aufbau der einzelnen Produkte, welche am Ende zu einer schlechten Vergleichbarkeit für dieses Hauptmerkmal führen. Wenn die Daten analysiert werden, fällt auf, dass Halbleitertechnologien, wie z.B. das Mainboard oder auch RAM-Speicher, einen größeren Anteil am gesamten CO<sub>2</sub>-Äquivalent des Produktes haben mit ca. 20 % bei Mainboards und ca. 22 % für

## 5 Synthese

RAM-Speicher. Der CO<sub>2</sub>-Anteil beim Bauteil Batterie liegt in der Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks bei knapp 5 %, verglichen mit ca. 24 % (siehe Anhang) bei den Pedelecs, was nicht zuletzt der Größe bzw. dem Massevolumen im jeweiligen Produkt geschuldet ist. Als auffällig bei den Fahrrädern ist die Rahmenbaugruppe herauszustellen mit knapp 40 % Anteil im Schnitt am gesamten, ausgestoßenen CO<sub>2</sub>. Diese Eigenschaft ist auf ähnliche Gründe zurückzuführen, was Größe und Gewicht angeht.

### LCAs nach Werkstoffen

Die Analyse des Hauptmerkmals *LCAs nach Werkstoffen* kann bei den gefundenen Quellen zunächst, ähnlich wie bei den *LCAs nach Bauteilen*, nur auszugsweise analysiert werden. Da für die Datenbasis in diesem Merkmal nicht ausreichend relevante Veröffentlichungen gefunden wurden, wurden zusätzlich mit der Software Granta Selector eigene Lebenszyklusanalysen für die einzelnen Werkstoffe erstellt. Dabei bildet das Hauptmerkmal *Stoffliche Zusammensetzung* die Grundlage für die selbst erstellten Ökobilanzen. Bei den analysierten Werkstoffen können aus der gefundenen Datenbasis noch die Werkstoffe Kupfer, Aluminium, Eisen sowie „Kunststoffe und Gummi“ herausgestellt werden, bei denen in den Produktgruppen Notebooks, Kühlschränke und PKW Datensätze ermittelt werden konnten. Aluminium und Eisen haben in den Veröffentlichungen einen höheren Anteil am gesamten, ausgestoßenen CO<sub>2</sub> mit knapp 16 % und ca. 51 %. Kunststoffe und Gummi liegen bei ca. 8 % und Kupfer bei ca. 11 % am gesamten ausgestoßenen CO<sub>2</sub>.

Um das Hauptmerkmal besser analysieren zu können, wurden für alle Veröffentlichungen mit *stofflichen Zusammensetzungen* von Produkten Lebenszyklusanalysen mit Hilfe dieser erstellt. Dabei wurden immer zwei verschiedene Szenarios erstellt, ein Szenario mit keinem Recyclinganteil und ein weiteres mit einem in der Software Granta Selector maximal möglichen Recyclinganteil für die jeweiligen verwendeten Werkstoffe. Wie schon in Kapitel 4.3 erklärt, wurden dabei für die Fertigungsverfahren der verschiedenen Werkstoffe möglichst sinnvolle Annahmen getroffen, die für alle Produkte gleichbleibend sind, um eine bessere Vergleichbarkeit zu gewährleisten. In Tab. 5.8 und Tab. 5.9 sind die ermittelten Mittelwerte und Standardabweichungen für die Hauptgruppe Smartphones und Notebooks in den zwei betrachteten Szenarios zu sehen.

Tabelle 5.8: Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent für die selbsterstellten *LCAs nach Werkstoffen* der Hauptgruppe Smartphones und Notebooks (Teil 1)

| Metall | $\bar{x}$ | s       | k       | $\bar{x}$ | s         | k         |
|--------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
|        | Deponie   | Deponie | Deponie | Recycling | Recycling | Recycling |
| Fe     | 1,24      | 2,20    | n       | 1,62      | 3,41      | n         |
| Si     | 0,08      | 0,14    | n       | 0,08      | 0,14      | n         |
| Mg     | 37,24     | 35,98   | n       | 41,23     | 39,67     | n         |
| Al     | 4,00      | 7,09    | n       | 3,51      | 7,31      | n         |
| Cu     | 1,19      | 1,79    | n       | 0,96      | 1,90      | n         |
| Ni     | 4,17      | 7,44    | n       | 5,47      | 7,58      | n         |
| Cr     | 2,52      | 5,64    | n       | 2,55      | 5,70      | n         |
| Sn     | 1,60      | 1,48    | n       | 3,94      | 6,36      | n         |
| Zn     | 0,42      | 0,65    | n       | 0,49      | 0,64      | n         |
| W      | 0,61      | 0,90    | n       | 0,68      | 1,03      | n         |
| Mn     | 0,22      | 0,49    | n       | 0,23      | 0,50      | n         |
| Ti     | 0,20      | 0,44    | n       | 0,20      | 0,44      | n         |
| Co     | 20,63     | 31,29   | n       | 26,67     | 41,79     | n         |
| Ta     | 0,07      | 0,10    | n       | 0,05      | 0,07      | n         |
| Mo     | 0,05      | 0,11    | n       | 0,05      | 0,11      | n         |
| Zr     | 0,02      | 0,04    | n       | 0,02      | 0,04      | n         |
| Au     | 17,88     | 19,63   | n       | 0,70      | 0,80      | n         |
| Ag     | 1,47      | 1,36    | n       | 1,42      | 1,73      | n         |
| Pd     | 0,58      | 0,52    | n       | 0,16      | 0,22      | n         |
| Nd     | 0,04      | 0,06    | n       | 0,06      | 0,08      | n         |
| Pr     | 0,01      | 0,02    | n       | 0,02      | 0,02      | n         |
| In     | 1,70      | 3,79    | n       | 0,86      | 1,92      | n         |
| Pb     | 0,23      | 0,43    | n       | 0,82      | 1,74      | n         |
| Sb     | 0,03      | 0,06    | n       | 0,03      | 0,07      | n         |

Die Daten wurden auch hier auf eine prozentuale Aufteilung umgerechnet, alle Werkstoffe bei denen keine Informationen vorlagen wurden aus der Tabelle entfernt. Bei den Daten sind häufig größere Standardabweichungen im Vergleich zu den errechneten Mittelwerten zu beobachten. Werden die Werte weiter betrachtet ist zu sehen, dass ein relativ großer CO<sub>2</sub>-Anteil auf den Werkstoff Magnesium entfällt mit ca. 37,24 % und 41,23 % in den jeweiligen Szenarios. Kobalt hat ebenfalls einen größeren Anteil am gesamten CO<sub>2</sub> mit 20,63 % und 26,67 %. Gold bildet in den Daten eher eine Ausnahme, da im Deponieszenario ein CO<sub>2</sub>-Anteil von 17,88 % errechnet wurde, im Recyclingszenario hingegen nur 0,7 %, was sehr gute Recyclingstrategien für den Werkstoff impliziert. Die Elemente Eisen und Aluminium, die mengenmäßig in der *stofflichen Zusammensetzung* einen großen Teil ausmachen, kommen in den durchgeführten Lebenszyklusanalysen nur auf einen eher geringen Anteil mit knapp 1,24 % und 1,62 % für Eisen und ca. 4 % bzw. 3,5 % für Aluminium am gesam-

## 5 Synthese

Tabelle 5.9: Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent für die selbsterstellten *LCAs nach Werkstoffen* der Hauptgruppe Smartphones und Notebooks (Teil 2)

| Kunststoff | $\bar{x}$ | s       | k       | $\bar{x}$ | s         | k         |
|------------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
|            | Deponie   | Deponie | Deponie | Recycling | Recycling | Recycling |
| ABS        | 0,76      | 1,52    | n       | 1,21      | 2,62      | n         |
| PC         | 1,33      | 2,48    | n       | 2,24      | 4,73      | n         |
| (LD)PE     | 0,02      | 0,04    | n       | 0,01      | 0,03      | n         |
| PP         | 0,01      | 0,01    | n       | 0,00      | 0,01      | n         |
| PS         | 0,00      | 0,00    | n       | 0,00      | 0,00      | n         |
| EPS        | 0,02      | 0,04    | n       | 0,02      | 0,04      | n         |
| PVC        | 0,01      | 0,02    | n       | 0,01      | 0,01      | n         |
| PA 6       | 0,28      | 0,63    | n       | 0,13      | 0,30      | n         |
| PMMA       | 0,03      | 0,06    | n       | 0,01      | 0,03      | n         |
| Epoxy      | 0,86      | 1,89    | n       | 3,42      | 7,62      | n         |
| Glas       | 0,51      | 0,61    | n       | 1,13      | 2,03      | n         |

ten, ausgestoßenen CO<sub>2</sub>. Generell fällt der größte Anteil auf die Gruppe der Metalle. Kunststoffe und andere Werkstoffe wie Epoxy oder Glas haben einen vergleichsweise geringen Anteil an der CO<sub>2</sub>-Bilanz.

Die anderen Hauptgruppen der Produkte wurden in der Analyse ebenfalls betrachtet. Insgesamt zeigt sich in Bezug auf das Verhältnis zwischen Mittelwert und Standardabweichung ein ähnliches Bild. So wird das definierte Kriterium (Gl. 5.5) in der Gruppe der Weißwaren nicht erfüllt, da die Standardabweichung meistens ähnlich groß wie der zugehörige Mittelwert ist. Beim prozentualen Anteil am ausgestoßenen CO<sub>2</sub> liegt in der Hauptgruppe der Weißwaren Eisen deutlich höher, mit Anteilen von ca. 55,74 % und 51,68 % in den beiden Szenarios Deponie und Recycling. Auch Aluminium hat in dieser Hauptgruppe verglichen mit der vorher betrachteten einen höheren Anteil am gesamten CO<sub>2</sub> mit ca. 12,76 % und ca. 7,78 %. Diese Werte korrespondieren mit der prozentualen Aufteilung der *stofflichen Zusammensetzung* bei den Weißwaren, da in dieser Gruppe deutlich mehr Eisen und Aluminium eingesetzt werden. In den anderen analysierten Werkstoffgruppen ist der Anteil an Polystyrol (PS) ebenfalls höher als die restlichen verwendeten Werkstoffe mit ca. 6,8 % und 9,54 % Anteil am CO<sub>2</sub>-Fußabdruck. Polystyrol kann dabei in vielfältigen Anwendungen zum Einsatz kommen, wie normale oder hochfeste Einzelteile oder auch Schäume und Isolierungen [VDI, 2022].

Innerhalb der Hauptgruppe der Fahrzeuge ist die Standardabweichung im Vergleich zum jeweiligen Mittelwert etwas kleiner, erfüllt das aufgestellte Kriterium Gl.

### 5.3 Deskriptiver Vergleich

Tabelle 5.10: Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent für die *LCAs nach Werkstoffen* der Produktgruppen Fahrzeuge (Teil 1)

| Metall | $\bar{x}$ | $s$     | $k$     | $\bar{x}$ | $s$       | $k$       |
|--------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
|        | Deponie   | Deponie | Deponie | Recycling | Recycling | Recycling |
| Fe     | 19,54     | 16,42   | n       | 20,03     | 18,08     | n         |
| Si     | 0,44      | 0,32    | n       | 1,09      | 0,78      | n         |
| Al     | 35,57     | 27,12   | n       | 27,72     | 27,96     | n         |
| Cu     | 1,88      | 1,42    | n       | 1,11      | 0,89      | n         |
| Ni     | 7,80      | 5,69    | n       | 19,21     | 13,75     | n         |
| Sn     | 4,34      | 3,18    | n       | 10,35     | 7,43      | n         |
| Zn     | 3,26      | 2,36    | n       | 8,08      | 5,74      | n         |
| Au     | 19,47     | 14,06   | n       | 0,30      | 0,30      | n         |
| Ag     | 0,95      | 0,85    | n       | 1,02      | 0,91      | n         |
| Pd     | 0,78      | 0,72    | n       | 0,24      | 0,21      | n         |
| Pb     | 1,33      | 0,87    | n       | 3,27      | 2,15      | n         |
| Sb     | 0,13      | 0,38    | n       | 0,32      | 0,89      | n         |

Tabelle 5.11: Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent für die *LCAs nach Werkstoffen* der Produktgruppen Fahrzeuge (Teil 2)

| Kunststoff | $\bar{x}$ | $s$     | $k$     | $\bar{x}$ | $s$       | $k$       |
|------------|-----------|---------|---------|-----------|-----------|-----------|
|            | Deponie   | Deponie | Deponie | Recycling | Recycling | Recycling |
| ABS        | 0,40      | 0,60    | n       | 0,43      | 0,64      | n         |
| PC         | 0,00      | 0,00    | n       | 0,00      | 0,00      | n         |
| (LD)PE     | 0,22      | 0,23    | n       | 0,34      | 0,34      | n         |
| PP         | 1,46      | 1,57    | n       | 1,66      | 1,76      | n         |
| PS         | 0,13      | 0,18    | n       | 0,18      | 0,25      | n         |
| PVC        | 1,03      | 2,71    | n       | 2,34      | 6,36      | n         |
| PA 6       | 0,53      | 0,63    | n       | 0,54      | 0,65      | n         |
| PMMA       | 0,03      | 0,07    | n       | 0,03      | 0,07      | n         |
| Epoxy      | 0,24      | 0,22    | n       | 0,58      | 0,53      | n         |
| Glas       | 0,48      | 0,66    | n       | 1,15      | 1,64      | n         |

5.5 allerdings trotzdem nicht. Was den prozentualen Anteil der einzelnen Werkstoffe am gesamten, ausgestoßenen CO<sub>2</sub> angeht, liegen hier Eisen, Aluminium und Gold in einem höheren Bereich, wie in den Tabellen 5.10 und Tab. 5.11 zu sehen. Aluminium hat dabei den höchsten Anteil mit ca. 35,57 % im Deponie- und 27,72 % im Recyclingszenario, gefolgt von Eisen mit 19,54 % und 20,03 % sowie Gold mit 19,47% und dann stark abfallend 0,3%. Die Anteile von Nickel am ausgestoßenen CO<sub>2</sub> sind hier noch herauszustellen mit 7,8 % und 18,21 % für die Szenarios Deponie und Recycling, wobei der Recyclingteil an dieser Stelle deutlich größer ausfällt als der des Deponieszenarios.

Über alle Produktgruppen hinweg ist festzustellen, dass bei größeren Produkten, die auch mit ihrer Masse mehr ins Gewicht fallen als z.B. Smartphones oder

## 5 Synthese

Notebooks, der prozentuale Anteil am gesamten CO<sub>2</sub> für die Elemente Eisen und Aluminium größer ist als für alle anderen analysierten Werkstoffe. Generell fallen die Werkstoffgruppen der Kunststoffe sowie andere Werkstoffe wie Epoxy oder Glas deutlich hinter den Metallen ab, was ihren Anteil am CO<sub>2</sub>-Äquivalent angeht.

### EOL-Strategien

Das Hauptmerkmal *EOL-Strategien* kann, ähnlich wie das Hauptmerkmal *LCAs nach Bauteilen*, nur auszugsweise analysiert werden. Die analysierten Veröffentlichungen haben in den jeweiligen betrachteten Hauptgruppen nur eine geringe Vergleichbarkeit, was die Anwendung spezifischer EOL-Strategien angeht, daher werden in diesem Merkmal kein Mittelwert und Standardabweichung gebildet. Generell können die einzelnen *EOL-Strategien* in verschiedene Verfahren kategorisiert werden. Welfens geht in seiner Veröffentlichung auf verschiedene EOL-Routen ein, wie z.B. die Rückgabe an den Verkäufer, der Weiterverkauf, die Schenkung oder die Entsorgung über den Hausmüll [Welfens, 2013]. Andere Quellen wie z.B. Van Eygen et al., Xiao et al. oder Soo et al. gehen auf das Recycling als EOL-Strategie ein und machen Angaben darüber, wie viel Eisen, Aluminium, Kupfer oder Seltene Erden aus den analysierten Produkten zurückgewonnen werden können [Van Eygen et al., 2016, Xiao et al., 2016, Soo et al., 2017]. Soo et al. gehen dabei noch weiter auf Recyclingquoten einzelner Kunststoffe wie PP, PE, ABS und andere ein [Soo et al., 2017]. Durch die sehr unterschiedlichen und teilweise produktabhängigen EOL-Strategien dient dieses Hauptmerkmal in der Diskussion mehr dazu, verschiedene Möglichkeiten am Lebensende eines Produktes darzustellen.

### Kritische Rohstoffe

Das Hauptmerkmal der *kritischen Rohstoffe* kann, wie schon in der Datenbasis erklärt, in mehrere Untermerkmale zerlegt werden. Dabei wird der Anteil der *kritischen Rohstoffe* nach der Definition von Jin et al. analysiert, sowie nach der Definition der EU [Jin et al., 2016, European Commission, 2023b]. Als drittes Merkmal wurden Seltene Erden, sofern in den Veröffentlichungen genannt, analysiert. Die Zusammenfassung der drei Merkmale sowie die errechneten Mittelwerte und Standardabweichungen sind in Tabelle 5.12 zu sehen.

Bei der Analyse ist zu sehen, dass die von Jin et al. definierten *kritischen Rohstoffe*

Tabelle 5.12: Errechnete Mittelwerte und Standardabweichungen aller Produkte für das Hauptmerkmal *Kritische Rohstoffe*

|                                 | Smartphones und Notebooks |       |   | Weißwaren |       |   | Fahrzeuge |      |   |
|---------------------------------|---------------------------|-------|---|-----------|-------|---|-----------|------|---|
|                                 | $\bar{x}$                 | s     | k | $\bar{x}$ | s     | k | $\bar{x}$ | s    | k |
| % Anteil kritischer Rohstoffe   | 20,62                     | 19,70 | n | 60,80     | 18,68 | j | 78,50     | 7,35 | j |
| % Anteil kritische Rohstoffe EU | 7,06                      | 5,82  | n | 2,30      | 0,60  | j | 2,84      | 2,31 | n |
| % Anteil Seltene Erden          | 0,22                      | 0,28  | n | 0,00      | 0,00  | n | 0,00      | 0,00 | n |

einen vergleichsweise hohen Anteil an den jeweiligen Produktgruppen besitzen, mit 20,62 % für Smartphones und Notebooks, 60,8 % bei den Weißwaren und 78,5 % in der Hauptgruppe der Fahrzeuge. Dies liegt an den unterschiedlichen Definitionen, welche Rohstoffe als kritisch erachtet werden. Das anfangs definierte Kriterium Gl. 5.5 für das Verhältnis zwischen Mittelwert und Standardabweichung ist dabei für die Werte der Hauptgruppen Weißwaren und für die Definition nach Jin et al. für Fahrzeuge erfüllt. Der anders definierte EU-Anteil an *kritischen Rohstoffen* ist im Vergleich zu dem von Jin et al. deutlich geringer [European Commission, 2023b, Jin et al., 2016]. Die Mittelwerte liegen hier bei ca. 7,06 % für Smartphones und Notebooks, bei ca. 2,3 % für die Hauptgruppe der Weißwaren und bei 2,84 % für die betrachteten Fahrzeuge. Das letzte Merkmal der Seltenen Erden wird in vielen Veröffentlichungen nicht explizit betrachtet und daher in den Daten als null aufgeführt. Nur in der Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks gibt es errechnete Werte, mit einem Mittelwert von ca. 0,22 % Anteil Seltener Erden am gesamten Anteil. Generell ist in den Daten zu sehen, dass der kritische Anteil stark von der jeweiligen Quelle und Betrachtungsweise dieser abhängt.

### Fehlerquellen und Schäden

Das Hauptmerkmal *Fehlerquellen* ist, ähnlich wie das Hauptmerkmal *EOL-Strategien* sehr divers aufgebaut, da je nach Produkt und dessen Baustruktur verschiedene Teile zu Fehlern der Produkte führen können. Generell konnten nur wenige Veröffentlichungen zu dem Thema Fehlerquellen für die betrachteten Produktgruppen gefunden werden. Die ermittelten Daten sind dabei teilweise metrisch und teilweise nominal skaliert. Daher werden hier nur die metrisch skalierten Daten mit den jeweiligen errechneten Mittelwerten verglichen. In den analysierten Daten für die Produktgruppe der Smartphones ist zu sehen, dass Displayschäden und Akkus Schäden zu den häufigsten Fehlerquellen gehören mit im Mittel 64,8 % und 42,8 %. Viele

## 5 Synthese

der betrachteten Merkmale erfüllen das Kriterium Gl. 5.5 einer im Vergleich geringeren Standardabweichung wie z.B. Displayschaden, Akkuscha den, Kameraschaden und andere. Bei der Produktgruppe der Waschmaschinen, sind die betrachteten Fehler bis auf fehlerhafte Taster gänzlich andere. So zählt hier die Wasserzirkulation mit einem Mittelwert von 24,3 % zu den häufigsten Fehlerquellen. Andere Fehlerquellen mit geringerem Anteil sind z.B. der Motor, die Wascheinheit oder die Tür. Das Hauptmerkmal kann nur über die Fehlerquelle „Tasten / Schalter defekt“ über die beiden Produktgruppen hinweg verglichen werden, wobei beide mit Mittelwerten von 9,35 % und 6 % eine eher kleinere Fehlerquelle darstellen.

Die erste aufgestellte Hypothese, dass die untersuchten Daten bei einem mathematischen deskriptiven Vergleich eine statistisch bedeutsame Unschärfe aufweisen, kann jetzt validiert werden. In den verglichenen Daten, gerade mit dem eingangs aufgestellten Kriterium 5.5, ist zu sehen, dass dieses bei dem Großteil der untersuchten Daten nicht erfüllt wird. Bei 329 Untermerkmalen wurde das Kriterium für 295 davon nicht erreicht, was 89,67 % entspricht. Dies sowie der generelle deskriptive Vergleich zeigen, dass die Datensätze größtenteils schlecht vergleichbar sind. Große Unterschiede in den untersuchten Daten für die jeweilige Hauptgruppe und das jeweilige Hauptmerkmal deuten ebenfalls auf die zuvor postulierte Unschärfe hin. Um die Hypothesen zwei und drei weiter zu untersuchen und Hinweise auf Gruppierungen innerhalb der Produktgruppen bzw. auch übergreifend zu finden, wird die Studie ab diesem Punkt explanativ geführt. Die Datenbasis wird dafür mittels einer Clusteranalyse untersucht, um die Hypothesen zu überprüfen und zu beantworten (siehe Abb. 5.1).

### 5.4 Clusteranalyse der Datenbasis

Für die Beantwortung der Hypothesen zwei und drei, ob es eine Vergleichbarkeit bzw. Gruppierung einzelner Eigenschaften innerhalb, sowie über die Hauptgruppen hinweg gibt, werden die gesammelten Daten mit einem geeigneten mathematischen Verfahren untersucht.

Bei der Auswahl des Verfahrens können die analytischen mathematischen Verfahren in drei verschiedene Analysen unterteilt werden. Die Verfahren werden dabei in Dependenz- und Interdependenzanalyse unterschieden [Universität Zürich, 2025].

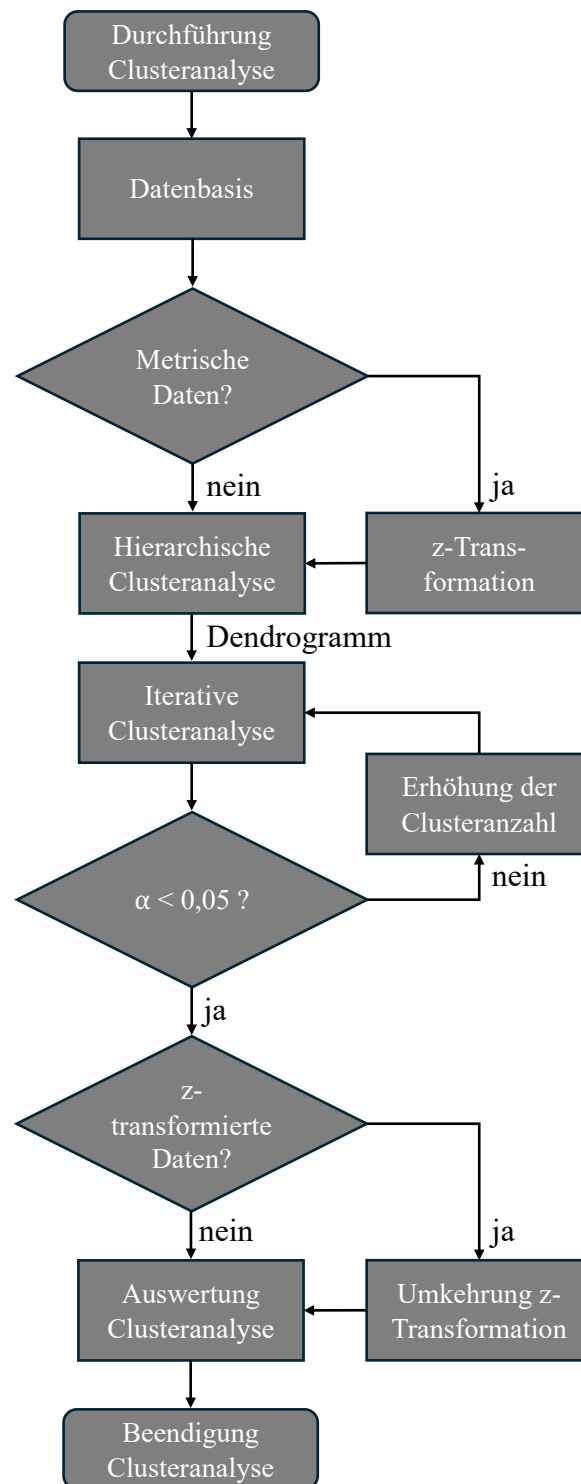


Abbildung 5.5: Schematischer Ablauf der in dieser Arbeit durchgeführten Clusteranalysen

## 5 Synthese

Bei der Dependenzanalyse wird weiter unterteilt in die Suche nach Zusammenhängen oder Unterschieden [Universität Zürich, 2025]. Bei den Zusammenhangsanalysen können Verfahren wie die bivariate Korrelation, die Partialkorrelation oder auch Regressionen wie die logistische Regression oder die Mehrebenenregression angewendet werden [Döring, 2023]. Bei der Analyse der Unterschiede können Verfahren wie die Varianzanalyse oder der t-Test angewandt werden [Universität Zürich, 2025]. Auf der Seite der Interdependenzanalyse kann die Clusteranalyse zur Gruppierung von Objekten angewandt werden, bei der versucht wird „die Untersuchungsobjekte anhand ihrer Merkmalsausprägungen in homogene Gruppen (Cluster)“ einzuteilen [Döring, 2023]. Die meisten der vorgestellten Verfahren können dabei oft nur zwei Variablen unterscheiden bzw. Zusammenhänge dieser aufzeigen. Die multiple Regression kann auch mehrere Variablen im Hinblick auf ihre Zusammenhänge untersuchen. Eine Einschränkung dabei ist allerdings, dass hier nur mit intervallskalierten Variablen gearbeitet werden kann [Universität Zürich, 2025]. Die Clusteranalyse kann ebenfalls für mehr als zwei Variablen eingesetzt werden und bietet den Vorteil, dass hier sowohl nominal- als auch ordinal- und intervallskalierte Daten verwendet werden können. Aufgrund der zuvor definierten Hypothesen und der ermittelten Datenbasis, die aus intervall- wie auch nominalskalierten Daten besteht, wurde die Clusteranalyse als geeignetes Werkzeug zur Beantwortung der Forschungsfrage ausgewählt. Die Teilschritte der Analysen sind in Abb. 5.5 schematisch dargestellt. Im Folgenden werden die einzelnen Schritte detailliert erläutert.

Laut Bortz und Schuster werden mit Clusteranalysen „die untersuchten Objekte so gruppiert, dass die Unterschiede zwischen den Objekten einer Gruppe bzw. eines „Clusters“ möglichst gering und die Unterschiede zwischen den Clustern möglichst groß sind“ [Bortz und Schuster, 2010]. Bei einer Clusteranalyse ist zu beachten, dass diese nur durchführbar ist, „wenn alle Variablen auf demselben Skalenniveau operationalisiert sind“ [Döring, 2023]. Neben dem gleichen Skalenniveau kann die Vergleichbarkeit von Daten über verschiedene Quellen hinweg ebenfalls zu Fehlern führen. Da die zu vergleichenden Daten unterschiedliche Mittelwerte und Streuungen besitzen, die den korrekten Vergleich verhindern, können diese durch eine z-Transformation in eine Standardnormalverteilung überführt werden [Döring, 2023]. Die z-Transformation ist dabei durchzuführen „indem man die Abweichung vom Mittel  $[\bar{x}]$  an der Standardabweichung  $[s]$  relativiert [Bortz und Schuster, 2010]. Dies

erreicht man durch

$$z = \frac{x - \bar{x}}{s}. \quad (5.6)$$

Die z-transformierten Werte besitzen dann „einen Mittelwert von null und eine Standardabweichung von eins“ und sind somit miteinander uneingeschränkt vergleichbar [Bortz und Schuster, 2010]. Die errechneten z-Werte sind dimensionslos. Um die Ergebnisse nach der Analyse mit einem mathematischen Verfahren wieder interpretierbar zu machen, müssen diese zurückgerechnet werden mit

$$x = \bar{x} + z * s. \quad (5.7)$$

Die z-Transformation ist dabei ausschließlich auf metrische Variablen anwendbar, welche intervall- oder verhältnisskaliert sind [Paul, 2020]. Alle nominalskalierten Daten werden daher in ihrer ursprünglichen Form in der Clusteranalyse verwendet.

Für die Durchführung der Clusteranalyse wird die Software SPSS der Firma IBM in der Version 31 verwendet. Bei der Auswahl vom verwendeten Clusteranalysealgorithmus wurde die gängige Praxis der Fachliteratur genutzt und die Ward-Methode ausgewählt [Bortz und Schuster, 2010]. Die Ward-Methode wird „in der Literatur auch unter den Bezeichnungen Minimum-Varianz-Methode, Fehler-Quadratsummen-Methode oder HGROUP-100-Methode“ benannt [Bortz und Schuster, 2010]. Bei der Ward-Methode werden immer die Elemente geclustert, bei denen „die geringste Erhöhung der gesamten Fehlerquadratsumme“ auftritt [Bortz und Schuster, 2010]. Neben dem verwendeten Analysealgorithmus muss vor der Durchführung der Clusteranalyse eine Anzahl an Clustern gewählt werden, die gebildet werden sollen. Hierfür wird eine hierarchische Clusteranalyse durchgeführt. Wichtig ist die Unterscheidung zwischen der hierarchischen Clusteranalyse, bei der ein Dendrogramm erzeugt wird, und der eigentlichen Clusteranalyse, die auf die Einordnung der Datensätze abzielt. Für die Ermittlung der geeigneten Anzahl an Clustern sind sogenannte Dendrogramme hilfreich. Sie sind als Werkzeug zu verstehen, die die Clusteranalyse beschleunigen, ohne ein eigenes Ergebnis darzustellen.

Im Folgenden ist ein beispielhaftes Dendrogramm schematisch dargestellt (siehe Abb. 5.6). Dendrogramme sind in der Regel von links nach rechts zu lesen. Die Grunanzahl kleinster Cluster ist auf y-Achse abgebildet und entspricht der maximalen Homogenität innerhalb eines einzelnen Clusters [Wiedenbeck und Züll, 2001]. Auf

## 5 Synthese

der rechten Seite, mit der größten Distanz ist der größte gemeinsame Cluster gezeigt. Er steht für die maximale Heterogenität innerhalb dieses einen Clusters [Wiedenbeck und Züll, 2001]. Beim Verlauf der Eingruppierung in die Cluster, verlieren die einzelnen Datenpunkte also Stück für Stück ihre Homogenität. Die Distanzen der im Dendrogramm erfolgten Gruppierungen sind also ein Maß für den Zuwachs an Heterogenität. In Abb. 5.6 ist eine solche Distanz exemplarisch mit der Variablen „a“ gezeigt. Ist diese besonders groß, ist auch der Zuwachs an Heterogenität besonders groß. „Da die Gruppen möglichst homogen sein sollen, wenn sie als Cluster gelten sollen, wird man als Lösung des Clusterproblems die Gruppen auf der Stufe unmittelbar vor dem „großen Sprung“ ansehen“ [Wiedenbeck und Züll, 2001].

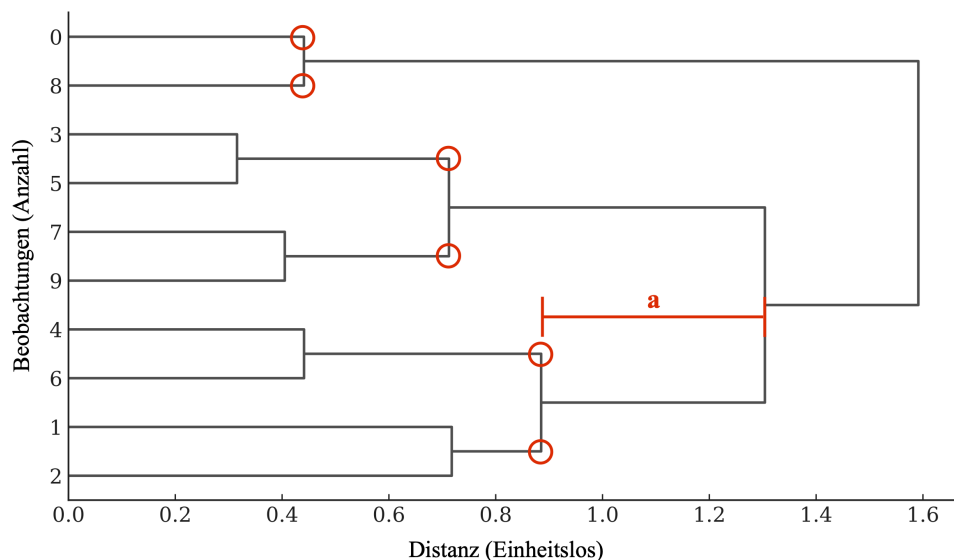


Abbildung 5.6: Beispielhaftes Dendrogramm (Eigene Darstellung)

Der größte Zuwachs an Heterogenität ist ein Indikator dafür, wie viele Cluster in der Clusteranalyse verwendet werden sollten. Die ideale Anzahl befindet sich dabei „links“ von dem größten Heterogenitätszuwachs „a“ bzw. dem größten Sprung nach Wiedenbeck und Züll. Links davon liegen die optimalen sechs Cluster, in Abb. 5.6 als rote Kreise gekennzeichnet. Mit den teilweise z-transformierten Daten wurde zunächst eine hierarchische Clusteranalyse in SPSS durchgeführt. Mittels des erstellten Dendrogramms wird dann die optimale Anzahl an Clustern definiert. Anschließend wird eine Clusteranalyse der Daten durchgeführt, um die einzelnen Clusterzentren zu berechnen. Die Berechnung erfolgt dabei iterativ in mehreren Schritten. Die Inter-

pretation der Ergebnisse aus der Clusteranalyse wird unterstützt durch eine Varianzanalyse (ANOVA - Analysis of Variance) und der Betrachtung des Signifikanzniveaus von  $\alpha = 0,05$  [Bortz und Schuster, 2010]. Sollte mit der im Dendrogramm ermittelten Clusteranzahl der Signifikanztest nicht bestanden werden, wird die Clusteranzahl langsam weiter erhöht und erneut geprüft. Die Ergebnisse der Clusteranalyse sowie die des vorher erfolgten deskriptiven Vergleichs werden dann in späteren Kapiteln interpretiert. Für eine verbesserte Lesbarkeit, werden alle berechneten Cluster im Folgenden mit römischen Zahlen benannt.

### LCAs nach Phasen

Aus den ermittelten Daten wurden die Hauptmerkmale *LCAs nach Phasen*, *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen* sowie die selbsterstellten LCAs im Hauptmerkmal *LCAs nach Werkstoffen* analysiert und geclustert. Begonnen wird mit den Daten der *LCAs nach Phasen*. Aus diesem Merkmal werden die fünf Untermerkmale Rohmaterialbeschaffung, Produktion, Transport, Nutzung und EOL betrachtet. Da diese intervallskaliert sind, wurden sie zunächst z-transformiert. In SPSS wurde dann eine hierarchische Clusteranalyse mittels Ward-Methode durchgeführt, um ein Dendrogramm zu berechnen. Das erzeugte Dendrogramm ist in Abbildung A.1 im Anhang zu sehen. Der größte Zuwachs an Heterogenität zwischen den einzelnen Sprüngen innerhalb der Clusteranzahl ist zwischen sechs und fünf Gruppen zu finden. Die Clusteranalyse der Daten aus dem Hauptmerkmal *LCAs nach Phasen* wurde daher mit sechs Clustern und der zuvor beschriebenen Ward-Methode durchgeführt. Das bedeutet, dass alle vorliegenden Daten in sechs Cluster eingeteilt werden.

Bei der Berechnung der sechs Cluster wurden drei Iterationen benötigt, bis keine Änderung innerhalb der Clusterzentren mehr erfolgt ist. Aus 49 betrachteten Fällen wurde ein Großteil den Clustern V und VI zugeordnet. Dabei können Cluster V 23 Fälle und Cluster VI 19 Fälle zugeordnet werden. Die Cluster I, III und IV besitzen jeweils nur einen Fall. Der Cluster II kommt auf vier Fälle. Da laut ANOVA-Tabelle die Signifikanz bei allen fünf Untermerkmalen bei  $\alpha < 0,001$  liegt, kann von signifikanten Unterschieden zwischen den Untermerkmalen und einer verwertbaren Clusteranalyse ausgegangen werden. Die sechs errechneten Clusterzentren liegen als Ergebnis noch als transformierte z-Werte vor und müssen zunächst zurückgerechnet

## 5 Synthese

werden. Die errechneten sechs Clusterzentren sind in Abbildung 5.7 wieder in prozentualer Darstellung zu sehen. Die Gesamtheit aller untersuchten Produkte wird dabei in die sechs Clusterzentren eingeteilt. Die Einteilung erfolgt nach Ähnlichkeiten innerhalb der betrachteten Phasen der LCAs. Die in Abb. 5.7 aufgetragenen Daten zeigen jeweils den Mittelwert innerhalb der einzelnen Cluster. Das bedeutet, alle Produkte in Cluster VI emittieren im Mittel 72 % kg CO<sub>2</sub>-Äquivalent in der Phase der Produktion. Innerhalb eines Clusters addieren sich die Anteile der verschiedenen Phasen immer zu 100 %.

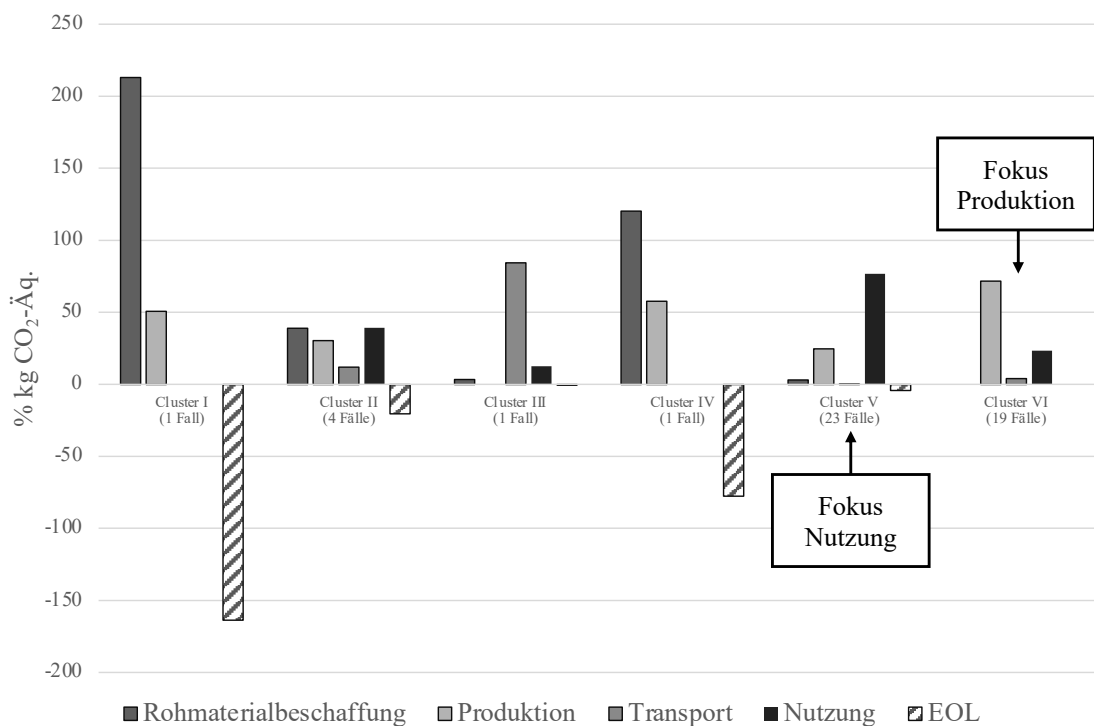


Abbildung 5.7: Berechnete Cluster für das Hauptmerkmal *LCAs nach Phasen*

Dabei sind wie zuvor beschrieben die Cluster V und VI bezogen auf ihre inkludierten Fälle mit Abstand am größten. Diese Cluster zeigen große Unterschiede in den Phasen der Nutzung und der Produktion und können insgesamt als zwei verschiedene Szenarios beschrieben werden. Cluster V steht dabei für einen hohen Anteil am gesamten CO<sub>2</sub> in der Nutzungsphase und einen deutlich geringeren Anteil in der Produktionsphase. Cluster VI steht für einen hohen Anteil am gesamten CO<sub>2</sub> in der Produktionsphase und einen deutlich geringeren in der Nutzungsphase. Alle anderen

Phasen sind bei den Clustern V und VI vernachlässigbar gering. Der Cluster II ist mit vier Fällen zwar deutlich geringer als die Cluster V und VI, steht aber trotzdem für eine kleine Gruppe und nicht für einzelne Fälle, wie die anderen Cluster. Cluster II kann dabei beschrieben werden mit einem hohen Gesamtanteil des verbrauchten CO<sub>2</sub>s in der Phase der Rohmaterialbeschaffung mit 38,89 % und der Nutzung mit 39,39 %. Die Produktionsphase hat einen Anteil von 30,26 %, der Transport 11,8 % und die EOL-Phase -20,34 %. Neben hohen Anteilen in der Rohmaterialbeschaffung und Nutzung gibt es in Cluster II eine leicht geringere Produktionsphase und kleinere Transportphase.

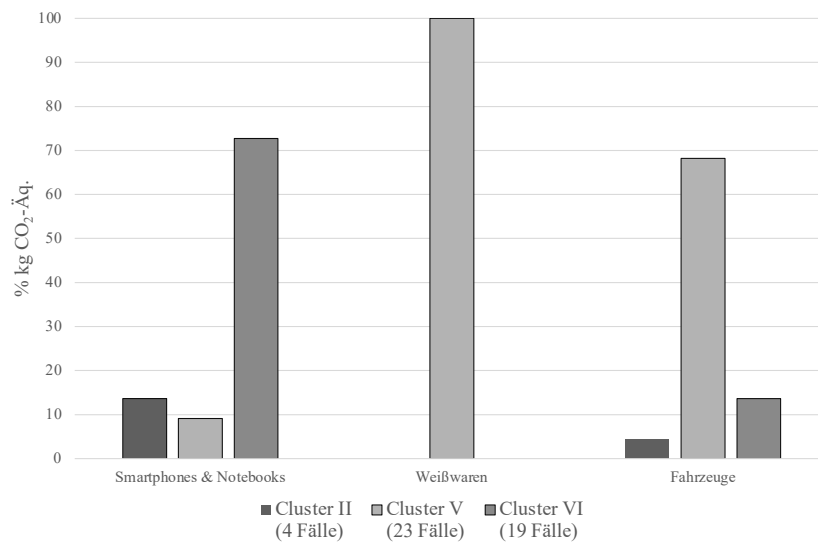


Abbildung 5.8: Zuordnung der drei Hauptgruppen zu den umfangreichsten Clustern in der Clusteranalyse der *LCAs nach Phasen*

Den betrachteten Fällen wurden die errechneten Cluster zugeordnet, so kann jede Quelle bzw. jedes Produkt zugeordnet werden. Für die umfangreichsten Cluster ist diese Zuordnung der Hauptgruppen in Abb. 5.8 zu sehen. In der Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks entfallen dabei ca. 73 % der Datensätze auf Cluster VI, knapp 14 % auf Cluster II und ca. 9 % auf Cluster V. Bei den Weißwaren können 100 % der Datensätze Cluster V zugeordnet werden. In der Gruppe der Fahrzeuge ist der Anteil für Cluster V bei ca. 68 %, der von Cluster VI liegt bei ca. 14 % und Cluster II hat den geringsten Anteil mit knapp 5 %. Anhand der Zuordnung zwischen den errechneten Clustern und den definierten Hauptgruppen

## 5 Synthese

ist zu sehen, dass ein Zusammenhang besteht zwischen der Aufteilung des gesamten, verbrauchten  $\text{CO}_2\text{s}$  innerhalb der einzelnen Lebenszyklusphasen und den jeweiligen Produkten. Dieser Zusammenhang wird im nächsten Kapitel weiter diskutiert. Da gerade die Phasen der Produktion und Nutzung für die Cluster V und VI bedeutend sind, wurden diese noch in einem Punktdiagramm mit den jeweiligen z-Werten für die errechneten Cluster aufgetragen, zu sehen in Abbildung 5.9.

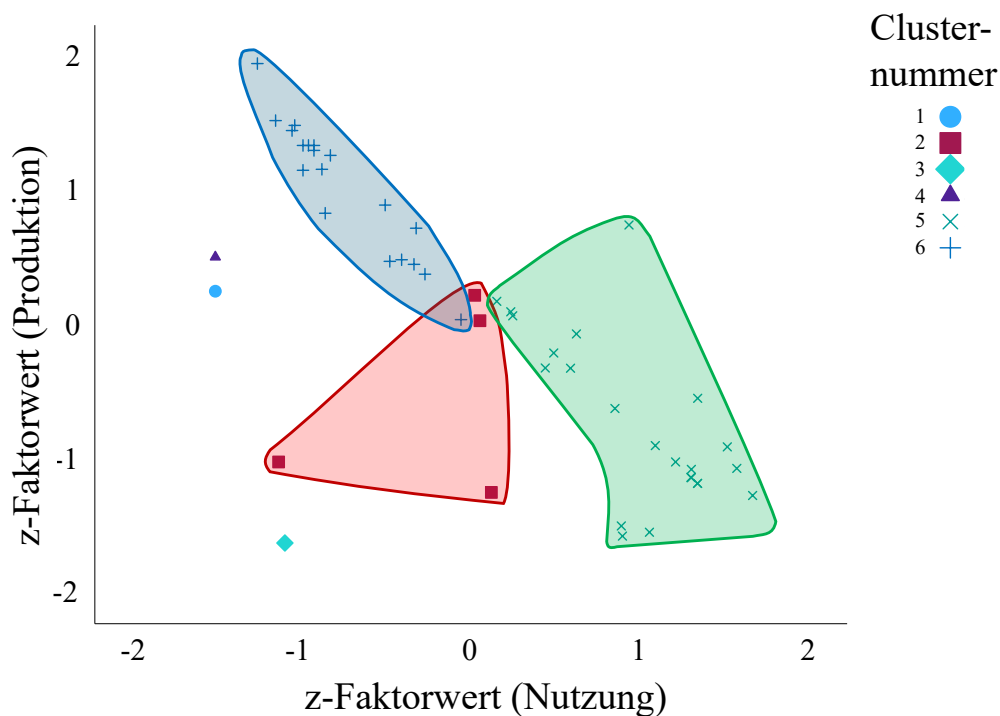


Abbildung 5.9: Abhängigkeit der z-transformierten Werte der Produktions- und Nutzungsphase voneinander des Hauptmerkmals *LCAs nach Phasen*

In der Abbildung ist gut zu sehen, dass die einzelnen Fälle aus Cluster VI nur geringfügig von der Mittellinie des Clusters abweichen. Bei Cluster V ist ebenfalls noch eine Linearität anhand der Datenpunkte erkennbar. Cluster I bis IV sind eher zufällig verteilt. Anhand der hier präsentierten Ergebnisse ist zu erkennen, dass die Clusteranalyse ein geeignetes Mittel ist, um Zusammenhänge zwischen den Lebenszyklusphasen und den einzelnen Produktgruppen aufzuzeigen, sie wird daher weiter angewendet für die *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen* und die selbsterstellten *LCAs nach Werkstoffen*.

### LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen

Das nächste Hauptmerkmal, welches mit Hilfe einer Clusteranalyse weiter ausgewertet wird, sind die *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen*. Bei dem Merkmal ist zu beachten, dass die vorliegenden Daten teilweise nominal- und intervallskaliert sind. Die Datensätze müssen daher zunächst in zwei kleinere aufgeteilt werden, entsprechend des Datentyps. Dabei können die Daten wie schon in Kap. 4.3 beschrieben, in Szenarios und Untermerkmale des jeweiligen, betrachteten Produktes unterteilt werden. Die Datentypen, unabhängig davon ob nominal- oder intervallskaliert, teilen sich stark zwischen den Szenarios und den Untermerkmalen auf. Daher kann diese Gruppierung auch für die folgende Clusteranalyse verwendet werden.

Angefangen wird mit den intervallskalierten Daten der Szenarios. Innerhalb der Szenarios werden für die Clusteranalyse folgende Untermerkmale betrachtet: Anzahl Einheiten, Lebensdauer, Anzahl Reparaturen an Akku, Display und anderen, Anzahl durchgeführter Reparaturen durch Hersteller, Fachbetrieb oder Endkunden, Energieverbrauch in kWh pro Jahr, siehe auch Tab. 4.8. Für die Vergleichbarkeit der einzelnen Datensätze wurden vorher alle Daten z-transformiert. Um abschätzen zu können, wie viele Cluster für die Clusteranalyse benötigt werden, wurde zunächst mithilfe der hierarchischen Clusteranalyse mit der Ward-Methode ein Dendrogramm erstellt für die Bewertung des Heterogenitätszuwachses.

In Abbildung A.2 im Anhang ist das mit SPSS erzeugte Dendrogramm zu sehen. Dabei ist der größte Sprung im Heterogenitätszuwachs zwischen zehn und acht Clustern zu beobachten. Die Clusteranalyse wird daher mit zehn Clustern durchgeführt. Bei der Berechnung wurden vier Iterationen benötigt, bis keine Änderung mehr innerhalb der Clusterzentren erfolgt ist. Mittels der berechneten ANOVA-Tabelle wurden die Signifikanzniveaus der einzelnen Untermerkmale überprüft, wobei für das Merkmal der Lebensdauer der Schwellwert von  $\alpha = 0,05$  deutlich überschritten wird mit  $\alpha = 0,772$ . Da der Signifikanztest fehlgeschlagen ist, wird schrittweise die Anzahl der Cluster erhöht, bis für alle Untermerkmale das Signifikanzniveau unter  $\alpha = 0,05$  liegt. Dies ist der Fall bei 13 Clustern. Hier liegen für alle betrachteten Merkmale die Signifikanzniveaus bei  $\alpha < 0,001$  und der Signifikanztest ist somit bestanden. Bei den gebildeten Clustern sticht Cluster X heraus. Mit 26 Fällen im Cluster ist dieser mit Abstand der größte gebildete. Danach folgen Cluster II mit sechs Fällen und die Cluster VII und XI mit jeweils vier Fällen innerhalb der Clus-

## 5 Synthese

ter. Um die Werte interpretieren zu können, werden diese zunächst wieder aus den z-transformierten Werten umgerechnet. Die dabei in absoluten Zahlenwerten dargestellten Cluster sind in Tabelle 5.13 zu sehen.

Tabelle 5.13: Errechnete Clusterzentren in absoluten Werten für die metrisch skalierten Daten des Hauptmerkmals *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen*. Zu jedem Cluster ist in runden Klammern die jeweils enthaltene Fallanzahl angegeben.

|                  | Anzahl<br>Einheiten | Lebensdauer<br>in Jahren | Reparaturen an<br>(Anzahl) |         |        | Reparaturen durchgeführt durch<br>(Anzahl) |             |          | Energieverbrauch<br>kWh / Jahr |
|------------------|---------------------|--------------------------|----------------------------|---------|--------|--------------------------------------------|-------------|----------|--------------------------------|
|                  |                     |                          | Batterie                   | Display | Andere | Hersteller                                 | Fachbetrieb | Endkunde |                                |
| Cluster I (1)    | 1,00                | 5,00                     | 1,00                       | 0,00    | 4,00   | 1,00                                       | 0,00        | 0,00     | 7,01                           |
| Cluster II (6)   | 1,07                | 19,67                    | 0,00                       | 0,00    | 0,50   | 0,00                                       | 0,00        | 0,00     | 71,94                          |
| Cluster III (2)  | 3,70                | 14,50                    | 0,00                       | 0,00    | 0,00   | 0,00                                       | 0,00        | 0,00     | 51,10                          |
| Cluster IV (2)   | 1,00                | 5,00                     | 0,00                       | 0,00    | 0,00   | 1,00                                       | 0,00        | 0,00     | 4,23                           |
| Cluster V (1)    | 1,50                | 4,50                     | 1,00                       | 0,00    | 0,00   | 0,00                                       | 1,00        | 0,00     | 4,00                           |
| Cluster VI (3)   | 1,21                | 4,67                     | 0,67                       | 0,00    | 0,00   | 0,00                                       | 0,00        | 1,00     | 4,08                           |
| Cluster VII (4)  | 1,00                | 8,50                     | 2,25                       | 0,00    | 0,00   | 0,00                                       | 0,00        | 0,00     | 12,68                          |
| Cluster VIII (1) | 1,00                | 5,00                     | 1,00                       | 1,00    | 0,00   | 1,00                                       | 0,00        | 0,00     | 7,01                           |
| Cluster IX (2)   | 1,31                | 4,50                     | 0,00                       | 1,00    | 0,00   | 0,00                                       | 0,00        | 1,00     | 4,00                           |
| Cluster X (26)   | 1,07                | 4,88                     | 0,15                       | 0,00    | 0,04   | 0,00                                       | 0,00        | 0,00     | 6,34                           |
| Cluster XI (4)   | 1,00                | 5,00                     | 0,00                       | 0,00    | 0,00   | 0,00                                       | 0,00        | 0,00     | 231,00                         |
| Cluster XII (1)  | 1,50                | 4,50                     | 0,00                       | 1,00    | 0,00   | 0,00                                       | 1,00        | 0,00     | 4,00                           |
| Cluster XIII (1) | 2,00                | 12,00                    | 2,00                       | 0,00    | 3,00   | 0,00                                       | 1,00        | 0,00     | 1,80                           |

Aufgrund der Fallanzahl sind die Cluster X, II, VII und XI besonders zu betrachten in der Analyse. Cluster X hat die mit Abstand größte Fallanzahl und kann als Szenario beschrieben werden mit ca. einer Einheit und einer angenommenen Lebensdauer von 4,88 Jahren für den betrachteten Lebenszyklus. Im betrachteten Szenario fallen im Schnitt 0,15 Reparaturen an der Batterie und 0,04 Reparaturen an anderen Teilen an, die im Mittel von keiner Person durchgeführt werden. Das Ergebnis „keine Person“ ist in diesem Fall auf mathematisches Runden zurückzuführen. Der Anteil der Reparaturen, die durch eine Person durchgeführt werden, sind sehr gering. Der Energieverbrauch von Cluster X beträgt errechnet 6,34 kWh pro Jahr. Der nächst größere Cluster II mit sechs Fällen weicht in den Merkmalen Lebensdauer und Energieverbrauch deutlich von Cluster X ab. Cluster II beschreibt dabei ein langlebiges Szenario, mit ebenfalls ca. einer Einheit, aber einer Lebensdauer von 19,67 Jahren und einem Energieverbrauch von 71,94 kWh pro Jahr. Bei den Reparaturen wird im Mittel nur eine halbe Reparatur an anderen Bauteilen betrachtet. Cluster VII beschreibt eine Art „High-Use“ Szenario mit einer Lebensdauer von 8,5 Jahren und 2,25 Reparaturen am Akku in dieser Zeit. Cluster XI sticht durch den vergleichsweise hohen Energieverbrauch von 231 kWh pro Jahr aus den anderen gebildeten

Clustern heraus.

Werden die Daten über alle Cluster hinweg betrachtet, wurden bis auf vier Cluster in allen Clustern annähernd eine Einheit pro Lebenszyklus in den benutzten Veröffentlichungen angenommen. Die Lebensdauer streut in einem Raum von 4,5 bis knapp 20 Jahren und fällt sehr unterschiedlich aus. Bei den Reparaturen und den Energieverbräuchen entstehen keine auffälligen Zusammenhänge. Um Zusammenhänge zwischen den vier größten Clustern und den Produktgruppen aufzuzeigen, werden die Hauptgruppen und die errechneten Cluster verknüpft. In Abb. 5.10 ist eine grafische Darstellung dieser Verknüpfung gezeigt.

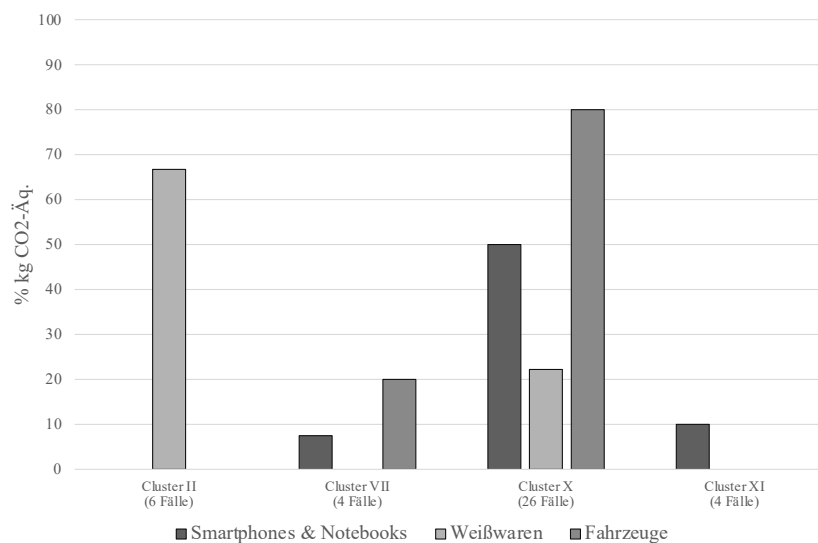


Abbildung 5.10: Zuordnung der drei Hauptgruppen zu den umfangreichsten Clustern in der Clusteranalyse der *LCIs der Lebenszyklusanalyse nach Phasen*

In der Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks fallen die Hälfte der analysierten Daten in Cluster X. Für die anderen Cluster sind es ca. 7 % für Cluster VII und 10 % für Cluster XI. Bei den Weißwaren können 67 % aller untersuchten Daten dem Cluster II zugeordnet werden und ca. 22 % Cluster X. In der Hauptgruppe der Fahrzeuge werden 80 % Cluster X zugeordnet und die restlichen 20 % Cluster VII. Anhand der Zugehörigkeiten ist zu sehen, dass es Präferenzen gibt, welche Hauptgruppe welchem Cluster zugeordnet werden kann. Die Zuordnung ist im Fall der intervallskalierten Daten der *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen* nicht mehr so eindeutig wie bei den zuvor betrachteten Daten der *LCAs nach Phasen*.

## 5 Synthese

Im nächsten Schritt werden die nominal skalierten Daten des Merkmals analysiert. Dabei werden die folgenden Untermerkmale betrachtet:

- Betrachtete Phase: Produktion, Transport, Nutzung, EOL
- EOL-Strategie: Deponie, Re-Use, Recycle
- Datenbasis: Primärdaten, ecoinvent, GaBi Data, Idemat Datenbank, Umberto 4.2 Mix, Öko-APC Kapitel 4, ProBas, EuP Los3, UBA-FuE Vorhaben, Fritsche et al. 2003, Boyano et al. 2017, Prakash et al. 2016, Rüdenauer et al. 2020, Mottschall et al. 2012, Stratmann et al. 2019, Merida 2012, GEMIS-Daten, SMARD-Daten, Statistisches Bundesamt, Granta Selector Data
- Verwendete Datensets: Ganze Komponente, Modellierung anhand von Werkstoffangaben, Generische Datensets, Proxies benutzt
- Modellierungssoftware
- geog. Gegebenheiten: Produktionsort, Nutzungsort

Um die Vielfalt der Untermerkmale zu begrenzen, wurde bei den verschiedenen Versionen von ecoinvent nur ein Merkmal betrachtet, ob Daten aus irgendeiner Version von ecoinvent verwendet wurden oder nicht. Mit der gewählten Unschärfe können bei der Clusteranalyse unter Umständen mehr Zusammenhänge aufgedeckt werden. In Bezug auf die Nominalskalierung können bis auf die Merkmale Modellierungssoftware und Zielorte die Werte „Ja, Nein, Unbekannt, Teilweise“ erreicht werden. Da die nominal skalierten Daten nicht transformiert werden dürfen, kann an dieser Stelle sofort mit der hierarchischen Clusteranalyse begonnen werden, um das Dendrogramm zu erzeugen. Dieses ist in Abbildung A.3 im Anhang zu sehen.

Der größte Heterogenitätszuwachs im Dendrogramm ist zwischen vier und zwei Clustern zu sehen, daher wird die Clusteranalyse mit vier Clustern durchgeführt. Bei der Betrachtung der ANOVA-Tabelle für die Clusteranalyse mit vier Clustern ist zu sehen, dass der Signifikanztest für einige Merkmale nicht bestanden ist. Daher wird damit begonnen, die Anzahl der Cluster schrittweise zu erhöhen, bis das Signifikanzniveau bei allen Merkmalen unter  $\alpha = 0,05$  liegt. Dies ist bei den nominalskalierten Daten der *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen* erst bei 30 Clustern der Fall. Da in diesem Datensatz nur eine Fallanzahl von 33 Fällen vorliegt, kann an dieser

Stelle nicht mehr von einer wirklichen Clusterbildung gesprochen werden, da die größten gemeinsamen errechneten Cluster eine Fallanzahl von zwei aufweisen. Eine Vergleichbarkeit der nominalskalierten Datensätze innerhalb des Hauptmerkmals ist daher nicht gegeben.

### LCAs nach Werkstoffen

Auf Basis der *stofflichen Zusammensetzung* der untersuchten Veröffentlichungen, wurden *LCAs nach Werkstoffen* erstellt. Auch diese wurden mittels einer Clusteranalyse betrachtet. Da die Lebenszyklusanalysen selbst mit der Software Granta Selector erstellt wurden, ist hier von einer möglichen Vergleichbarkeit bzw. Gruppierbarkeit der Datensätze auszugehen. Der vorliegende Datensatz wird dabei grundlegend Unterschieden in Berechnungen mit nur der Deponie als EOL-Strategie und in einen möglichst großen Recyclinganteil als EOL-Strategie. Die absoluten Zahlenwerte wurden dabei in relative Werte umgerechnet und dann z-transformiert. Die Untermerkmale sind die gleichen, wie die bei der *stofflichen Zusammensetzung*, beispielhaft in den Tabellen 4.4 und Tab. 4.5 zu sehen. Falls für alle Quellen der Anteil eines Werkstoffs bei null lag, wurde dieser aus den Berechnungen entfernt, da er dann in keiner der Veröffentlichungen untersucht worden ist.

Begonnen wird mit den erzeugten Daten, die nur die Deponie als EOL-Strategie aufweisen. Nach der z-Transformation wurde mit einer hierarchischen Clusteranalyse mittels Ward-Methode ein Dendrogramm erstellt, um die ideale Anzahl an Clustern zu bestimmen.

Das berechnete Dendrogramm ist in Abbildung A.4 im Anhang zu sehen. Der größte Heterogenitätszuwachs ist dabei zwischen fünf und vier Clustern zu erkennen, daher wird die Clusteranalyse mit fünf Clustern durchgeführt. In der errechneten ANOVA-Tabelle wird der Signifikanztest für viele der untersuchten Merkmale nicht bestanden, daher wird die Clusteranalyse mit steigender Clusteranzahl durchgeführt, bis das Signifikanzniveau aller betrachteten Merkmale unter  $\alpha = 0,05$  liegt. Dies ist allerdings erst bei sechzehn Clustern der Fall, was zugleich auch der betrachteten Anzahl an Fällen entspricht. Somit kann für den Teil der betrachteten Daten aus dem Hauptmerkmal der *LCAs nach Werkstoffen* keine Vergleichbarkeit oder Gruppierbarkeit festgestellt werden.

Das Vorgehen wird für die errechneten Daten mit möglichst großem Recyclingan-

## 5 Synthese

teil wiederholt. Aus den z-transformierten Werten wird auch hier ein Dendrogramm erstellt, welches in Abbildung A.5 im Anhang zu sehen ist.

Aufgrund des größten Heterogenitätszuwachses wird die Clusteranalyse mit vier Clustern begonnen. Der Signifikanztest wird an dieser Stelle noch nicht bestanden, weshalb auch hier schrittweise die Anzahl der Cluster erhöht wird. Analog wie zu den Daten mit reinem Deponieanteil wird auch bei den Daten mit möglichst großem Recyclinganteil erst bei 16 Clustern der Signifikanztest bestanden. Daher kann auch für diesen Datenteil keine Vergleichbarkeit bzw. Gruppierbarkeit mathematisch ermittelt werden. Das Hauptmerkmal der selbsterstellten *LCAs nach Werkstoffen* zeigt also insgesamt keine Vergleichbarkeit der Daten. Alle anderen Hauptmerkmale bieten eine zu geringe Datenbasis, um diese in einer Clusteranalyse belastbar miteinander zu vergleichen.

## 6 Diskussion

Der voranschreitende Klimawandel, ob in den Dimensionen von Rockström et al. bemessen oder in ähnlicher Form in den Abschlussberichten des IPCCs, stellt ein großes Problem der heutigen Zeit dar (vgl. Kap. 2.2) [Rockström et al., 2009, Team et al., 2023]. Dabei ist die Weltbevölkerung, gerade in urbanen Gebieten, und die industrielle Produktion von Produkten sehr stark gewachsen und führt zu neuen Herausforderungen, wie eine nachhaltige Gesellschaft realisiert werden kann [McNeill, 2000]. Wenn die Nachhaltigkeit nicht nur im Sinne von Umwelt und Wirtschaft verstanden werden soll, sondern auch die Gesellschaft mit einbezieht, spricht man vom Drei-Säulen-Modell (vgl. Kap. 2.1) [Balderjahn, 2013]. Mit der Erweiterung des Drei-Säulen-Modells um den technologischen Aspekt wurde das Design Circular begründet, welches besonders die Kreislauffähigkeit von Produkten betont [Münger, 2021]. Die Fähigkeit und das Verständnis darüber, Produkte kreislauffähig entwickeln, produzieren und verwenden zu lassen, stellt ein zentrales Problem in den aktuellen Bestrebungen zu einer nachhaltigeren Wirtschaft dar, da aktuell die Linearwirtschaft immer noch die traditionell angewandte ist (vgl. Kap. 2.5.1) [Kortmann und Piller, 2016]. Aus diesen grundlegenden Gedanken und Problemen im Bereich von nachhaltigen Produkten wurden in dieser Arbeit eine Forschungsfrage (vgl. Kap. 3.2) entwickelt und im folgenden drei Hypothesen abgeleitet (siehe Abb. 5.1).

Die Bestrebungen aus dem aktuellen wissenschaftlichen Stand der Forschung im Bereich der Nachhaltigkeitsbewertung von Produkten werfen viele Fragen auf (vgl. Kap. 3.1). Die aufgestellte Forschungsfrage, dass durch die Unschärfe in Eingangs- und Ausgangsdaten die Aussagekraft, wie auch die Vergleichbarkeit der veröffentlichten Ergebnisse nicht signifikant sind, liegt bei genauerer Betrachtung des aktuellen Stands von Nachhaltigkeitsbewertungen nahe. Obwohl aktuelle Normen und Standardisierungen das Ziel haben, Ökobilanzierungen vergleichbar zu machen und einen regelbasierten Rahmen für das Vorgehen zu schaffen (siehe Kap. 3), sind diese Vor-

gaben noch nicht weitreichend genug, um diese Vergleichbarkeit herzustellen [DIN e. V., 2021a]. So existieren viele verschiedene Bewertungssysteme, wie z.B. die DIN EN ISO 14040 und 14044, die Erweiterungen dazu aus dem ILCD oder auch die GRI-Standards, die alle das Ziel verfolgen, Nachhaltigkeitsbewertungen zu standardisieren (vgl. Kap. 2.3.2 und 3.1) [DIN e. V., 2021a, DIN e. V., 2021b, European Commission, 2010, GRI, 2024a]. Diese weichen in ihren Vorgehen alle leicht voneinander ab, was generierte Outputs und auch die Verwendung von Datensätzen in den Eingangsdaten für die jeweiligen Berechnungen betrifft.

Die analysierten Datensätze von Ökobilanzierungen können dabei meistens direkt unterteilt werden in wissenschaftlichen Quellen, die sich mehr an die Normen der DIN EN ISO 14040 und 14044 sowie den Erweiterungen aus dem ILCD-Handbuch orientieren, wie z.B. die Veröffentlichungen von Prakash et al., Sánchez et al., Ercan et al. und vielen weiteren [Prakash et al., 2012, Ercan et al., 2016, Sánchez et al., 2022]. Auf der anderen Seite sind Veröffentlichungen von Unternehmen zu sehen, die häufig auf den GRI-Standard setzen, wie im Deutschen Nachhaltigkeitskodex zu sehen [Bundesregierung, 2020, Schaffeld und Ruppach, 2023, Wagner, 2019]. Bei genauerer Analyse fallen dabei große Unterschiede in den Betrachtungsweisen der Scopes, so wie in den Life Cycle Inventories auf. Bei den einzelnen Lebenszyklusphasen der betrachteten Produktgruppen wird beispielsweise oft die Phase der Rohmaterialbeschaffung nicht betrachtet und führt daher in der Datenanalyse zu hohen Standardabweichungen, wie in Tabelle 5.5 zu sehen. Ebenfalls auffällig dabei ist die Diskrepanz zwischen errechneten und angenommenen Werten, bzw. zwischen den Daten, die eher wissenschaftlicher Natur sind und denen, die von Unternehmen herausgegeben werden.

Wird die Lebensdauer von Smartphones betrachtet, kommen z.B. Wieser und Tröger auf 2,7 Jahre oder Rüdenauer und Prakash auf 2,5 Jahre [Wieser und Troeger, 2015, Rüdenauer und Prakash, 2020]. Im Vergleich werden in den LCIs für Smartphones z.B. von Sánchez et al. im Mittel 5 Jahre angenommen, bei Cordella et al. 4,5 Jahre und beim Hersteller Apple 3 oder 4 Jahre. Hier ist eine große Diskrepanz zwischen ermittelten und angenommenen Lebensdauern von Produkten zu beobachten, was im Sinne der Obsoleszenz nicht nur an physischen Defekten des Produktes liegt, sondern auch an qualitativer und psychologischer Obsoleszenz (vgl. Kap. 2.7) [Packard, 1960]. Gerade diese beispielhaft gezeigten Diskrepanzen in den Lebensdauern von Produkten haben zu mehr Regulierungen von neuen Produkten geführt,

wie im Französischen das „Halte à l’Obsolescence Programmée“, welches eine Regulierung der Reparierbarkeit von Produkten zufolge hatte [Halte à l’Obsolescence Programmée, 2022]. Auch die Neufassung der europäischen Ökodesignrichtlinie in die ESPR entspricht diesem aktuellen Zeitgeist (vgl. Kap. 2.3.1) [European Commission, 2022]. Um die Linearwirtschaft zu beenden, wurden von der EU erste Produktgruppen reguliert, um deren Lebensdauer und Nachhaltigkeit zu verbessern (vgl. Kap. 2.5.1) [European Commission, 2019].

Diese Denkweise in Produktgruppen ist ein zentrales Element für diese Arbeit und die aufgestellte Forschungsfrage, da gerade innerhalb von Produktgruppen eine hohe Vergleichbarkeit der Daten gegeben sein sollte. Mit den Erkenntnissen aus den aktuellen Regulierungen sowie weiteren Faktoren ökologischer und ökonomischer Natur wurden sieben Produktgruppen identifiziert und ausgewählt, die wiederum in drei Hauptgruppen unterteilt werden können, um die Forschungsfrage zu untersuchen (vgl. Kap. 4.1). Diese Produktgruppen sowie Hauptgruppen sind in Tabelle 4.2 gezeigt. Auf Basis der Produktgruppen wurde eine Literaturrecherche durchgeführt und mit den analysierten Daten zehn Hauptmerkmale identifiziert (vgl. Tab. 4.3), die Informationen über die Nachhaltigkeit von Produkten beinhalten und eine Bewertung dieser ermöglichen.

Bei der Recherche für die zu verwendende Datenbasis wurde darauf geachtet, wissenschaftlichen Standards zu entsprechen, wie z.B. den 15 IQ-Dimensionen von Hildebrand et al. [Hildebrand et al., 2025]. Für die weitere Ergänzung der Datenbasis wurden mit Hilfe der Software Ansys Granta Selector und den ermittelten Daten aus der *stofflichen Zusammensetzung* weitere Lebenszyklusanalysen erstellt, um Lücken in dieser sinnvoll auszufüllen. Mit der umfassenden Datenbasis, welche aus den ausgewählten Produktgruppen sowie Hauptmerkmalen und deren Untermerkmalen besteht, wurde ein deskriptiver Vergleich sowie eine anschließende Analyse durchgeführt, um die aus der Forschungsfrage abgeleiteten Hypothesen beantworten zu können (siehe Abb. 5.1).

## 6.1 Deskriptiver Vergleich

Für eine erste Einschätzung innerhalb des deskriptiven Vergleichs und der errechneten Mittelwerte und Standardabweichungen wurde das Kriterium nach Gl. 5.5

## 6 Diskussion

formuliert. Eine geringe Standardabweichung in Relation zu den berechneten Mittelwert kann dabei ein erster Indikator sein, ob eine gewisse Datenhomogenität vorliegt.

### Stoffliche Zusammensetzung

Das Kriterium nach Gl. 5.5 wurde beim deskriptiven Vergleich des Hauptmerkmals der *stofflichen Zusammensetzung* in fast allen Untermerkmalen nicht erreicht (siehe Kap. 5.3). Dabei ist neben der festgestellten Unschärfe der betrachteten Daten ebenfalls nur eine sehr geringe Vergleichbarkeit gegeben, da die untersuchten Veröffentlichungen häufig sehr unterschiedliche Werkstoffe betrachten wie z.B. bei Bookhagen et al., Buchert oder Mottschall zu sehen [Bookhagen et al., 2020, Buchert, 2012, Mottschall, 2012].

Bookhagen geht bei seiner Analyse dabei stark auf Metalle wie Eisen, Magnesium, Aluminium, Kupfer, Chrom und weitere ein [Bookhagen et al., 2020]. Manhart et al. betrachten im Gegensatz dazu sehr stark Edelmetalle und Seltene Erden wie Gold, Silber, Palladium, Neodym, Praseodym und Indium [Buchert, 2012]. Auch die Normen wie z.B. die DIN EN ISO 14040 oder der GRI-Standard geben an dieser Stelle keine Informationen darüber, welche Werkstoffe bei einer Ökobilanz betrachtet werden sollten (siehe Kap. 3.2). Eine Vergleichbarkeit innerhalb sowie über Hauptgruppen hinweg ist daher meist nur für Werkstoffe möglich, die in großen Anteilen verwendet werden, wie z.B. Eisen oder Aluminium (siehe Kap. 5.1).

### Absatzzahlen und Nutzungsdauer

Bei den Daten aus den *Absatzzahlen* lassen sich, bezogen auf die Standardabweichung in Relation zum Mittelwert, weniger Unschärfen feststellen. Die Absatzzahlen zeigen zudem eine gute Vergleichbarkeit innerhalb der Hauptgruppen, einzig die Pedelecs stechen an dieser Stelle heraus, mit stark wachsenden Absatzzahlen im Betrachtungszeitraum. Im Vergleich über die Hauptgruppen hinweg sind die Verkäufe der Weißwaren auf einem deutlich geringeren Niveau, als die der anderen Hauptgruppen.

Die Absatzzahlen beschreiben in Kombination mit der ermittelten mittleren Nutzungsdauer von 14,7 Jahren ein Langlebigkeit der Weißwaren. Innerhalb des Hauptmerkmals der *Nutzungsdauer* gibt es nur geringe Ungenauigkeiten im deskriptiven Vergleich. Der Vergleich der Lebensdauer aus den wissenschaftlichen Veröffentli-

chungen mit den Annahmen der LCIs für Ökobilanzen von Herstellern zeigt dabei deutliche Diskrepanzen. So gibt z.B. Apple mittlerweile wieder 5 Jahre Lebensdauer für Smartphones an, im Vergleich mit den errechneten 3,7 Jahren im Mittel [Apple, 2025]. Auch der Pedelec-Hersteller Riese & Müller liegt mit seiner Angabe von 12,6 Jahren weit über dem errechneten Mittelwert von 7,3 Jahren [Riese & Müller, 2025].

Diese Diskrepanzen zeigen eine Form frühzeitiger Obsoleszenz von Produkten (siehe Kap. 2.7), die in funktioneller, qualitativer oder psychologischer Form auftreten kann [Packard, 1960]. Bei den Pedelecs kann mit den ermittelten stark steigenden Absatzzahlen ein Überkonsum sowie eine vergleichsweise junge und stark wachsende Produktgruppe festgestellt werden.

### LCAs nach Phasen

Die Ergebnisse des deskriptiven Vergleichs des Hauptmerkmals *LCAs nach Phasen* zeigen größtenteils eine Verletzung des Kriteriums 5.5 und somit eine Unschärfe in den analysierten Daten.

Weiter zeigt sich eine Besonderheit in der Aufteilung der einzelnen Phasen. So konnte für die Hauptgruppen der Weißwaren sowie der Fahrzeuge ein geringer Anteil der Produktion und ein großer Anteil der Nutzungsphase am emittierten CO<sub>2</sub> beobachtet werden. Xiao et al. geben für einen haushaltsüblichen Kühlschrank ca. 14,8 % ausgestoßenes CO<sub>2</sub> in der Produktionsphase an und im Kontrast dazu ca. 87 % CO<sub>2</sub> in der Nutzungsphase [Xiao et al., 2015].

Für die Hauptgruppen der Smartphones und Notebooks dreht sich dieses Verhältnis um, mit einem großen Produktionsanteil und kleinem Nutzungsanteil, was eine Zuordnung in kurz- und langlebige Produkte erlaubt. Der Hersteller Apple gibt beispielsweise für ein iPhone 16 die Emissionen in der Produktionsphase mit 80 % des emittierten CO<sub>2</sub>s an, aber nur 10 % in der Nutzungsphase [Apple, 2025]. Einzig dieses Verhältnis zwischen Produktions- und Nutzungsphase lässt sich sowohl innerhalb wie auch über Hauptgruppen hinweg für dieses Hauptmerkmal vergleichen.

Der gesamte Energieverbrauch innerhalb der Nutzungsphase für die Produktgruppe der Smartphones übersteigt niemals die gebundene Energie der Produktion [Cordella et al., 2021b]. Dieses Verhalten ist gerade bei einer vorliegenden Linearwirtschaft nachteilig (siehe Kap. 2.5.1) und kann nur mit höherwertigen R-Strategien als dem Recycling überwunden werden (siehe Kap. 2.6). Für die Produktgruppe

der Notebooks ist dieses Verhältnis nicht so klar herauszustellen, was die mangelnde Vergleichbarkeit innerhalb der Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks erneut aufzeigt.

### LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen

Bei den Life Cycle Inventories muss der deskriptive Vergleich beschränkt werden auf die vorliegenden metrisch skalierten Daten, da nur für diese Mittelwerte und Standardabweichungen errechnet werden können. Die Datenherkunft für die durchgeführten Berechnungen variiert sehr stark und nur wenige der analysierten Veröffentlichungen zeigen übereinstimmende Quellen für deren Datenherkunft. Bei den verwendeten Datensets, also der Datenmodellierung (vgl. Kap. 4.3), werden in den gefunden Quellen oft keine Angaben gemacht, wie z.B. bei Prakash et al., Apple, Bieker et al., Riese & Müller und weiteren [Prakash et al., 2012, Apple, 2025, Bieker, 2021, Riese & Müller, 2025].

So geben beispielsweise die Hersteller Apple sowie Riese & Müller keinerlei Informationen über die verwendeten LCIs und präsentieren nur das Ergebnis der Ökobilanzierung [Apple, 2025, Riese & Müller, 2025]. Prakash et al. geben in ihrem veröffentlichten LCI für ein Notebook beispielsweise die verwendeten Datenbanken ecoinvent 2.2, ProBas sowie UBA-FuE Vorhaben an [Prakash et al., 2012]. In der Quelle wird zudem offengelegt, dass generische Datensets für die Modellierung verwendet wurden [Prakash et al., 2012]. Auch wenn diese Datenquellen angegeben werden, können sie nicht bewertet werden. Da sie nicht öffentlich einsehbar sind, ist ein detaillierter Vergleich der Scopes und auch Teile der LCIs, wie angenommene Lebensdauer und Produktionsort (vgl. Kap. 3.1), nicht möglich.

Gerade dieses Zusammenspiel aus Datenbanken, darin vorhandenen Datensets sowie die dann ausgewählte Art der Modellierung ist entscheidend für das Ergebnis der Ökobilanzierung, gleichzeitig aber stark abhängig von den zuvor ausgewählten Faktoren (vgl. Kap. 4.2) [Ashby et al., 2021]. Diese Varianz der Modellierung ist bspw. gut erkennbar in den erzeugten Boxplots (zu sehen in Abb. 5.3 und Abb. 5.4).

Die dargestellte Analyse der metrisch skalierten Daten weist auch hier ausschließlich die Unterscheidung in Kurz- und Langlebigkeit auf. Darüber hinaus ist eine weitere Vergleichbarkeit anderer Faktoren der *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen* innerhalb der Hauptgruppen und darüber hinweg nicht gegeben (siehe Kap.

5.3.

### LCAs nach Bauteilen

Bei der Analyse des Hauptmerkmals *LCAs nach Bauteilen* ist eine hohe Unschärfe beim deskriptiven Vergleich zu beobachten. Dies liegt zum einen am jeweiligen internen Aufbau der verschiedenen betrachteten Produkte, zum anderen aber auch an den grundlegend unterschiedlichen Betrachtungsweisen der untersuchten Veröffentlichungen. Durch diesen unterschiedlichen Aufbau ist die Vergleichbarkeit innerhalb sowie über Produktgruppen hinweg nur für wenige Bauteile gegeben.

In der Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks werden Komponenten wie Batterie, Mainboard, Display oder die CPU analysiert (zu sehen in Tab. 5.7). In den untersuchten Quellen für die Produktgruppen der Waschmaschinen, Kühlschränke und PKW ist aber z.B. das Mainboard nicht zu finden, obwohl es ein Bestandteil der Produkte ist (siehe Kap. 5.3) [Xiao et al., 2015, Pero et al., 2018]. Der Fokus wird dabei oft auf Haupt-CO<sub>2</sub>-Treiber gelenkt bzw. auf problematische Einzelteile eines Produktes im Sinne der Nachhaltigkeit und nicht auf alle Bauteile. Beim Kühlschrank können dies z.B. der Kompressor oder die Isolationsschäume in Tür und den Wänden sein [Xiao et al., 2015]. Bei den PKW werden große Gruppen von Einzelteilen, wie z.B. Antriebsstrang, Elektronik oder Chassis betrachtet [Pero et al., 2018]. Eine Überdeckung ist bei den Pedelecs und den Smartphones und Notebooks zu finden, hier liegt die Betrachtung auf Einzelteilen wie Akku oder Display [Winograd, 2022].

### LCAs nach Werkstoffen

Der Betrachtungsrahmen der untersuchten Werkstoffe unterscheidet sich stark zwischen den einzelnen Veröffentlichungen, ähnlich wie bei den *LCAs nach Bauteilen*. Auch hier wird das zuvor aufgestellte Kriterium nach Gl. 5.5 zur Relation zwischen Mittelwert und Standardabweichung größtenteils nicht erfüllt, weshalb eine hohe Unschärfe innerhalb der Daten gezeigt wird. Die errechneten Werte haben durch die unterschiedlichen Betrachtungen der einzelnen Quellen, in denen fast immer andere Werkstoffe analysiert werden, vergleichsweise hohe Standardabweichungen und damit eine breite Streuung (siehe Kap. 5.3).

Für dieses Hauptmerkmal wurden daher Lebenszyklusanalysen mithilfe der Software Granta Selector erstellt auf Basis der *stofflichen Zusammensetzung* (siehe Tab. 4.4 und 4.5). Mit den selbsterstellten LCAs konnte die Relation zwischen Mittelwert und Standardabweichung leicht verbessert werden. Das Kriterium nach Gl. 5.5 ist dabei im Regelfall immer noch nicht erfüllt.

Bei der Analyse der Daten werden kritische Rohstoffe wie Magnesium, Cobalt, Gold oder Nickel als potentielle CO<sub>2</sub> Treiber identifiziert, sowie Eisen und Aluminium sofern diese in großen Mengen eingesetzt werden. Die Werkstoffgruppe der Kunststoffe hat in fast allen analysierten Veröffentlichungen nur einen geringen Anteil am gesamten ausgestoßenen CO<sub>2</sub>, da die Ressourcenbeschaffung wie auch die Fertigungsprozesse nicht so energieintensiv sind, wie bei den Metallen [Gutowski et al., 2009].

### EOL-Strategien

Beim Hauptmerkmal der *EOL-Strategien* ist aufgrund der Varianz innerhalb der analysierten Daten kein deskriptiver Vergleich möglich. Die einzelnen gewählten EOL-Strategien unterscheiden sich stark zwischen den betrachteten Veröffentlichungen und bieten keinen Vergleich innerhalb oder über Hauptgruppen hinweg. Neben den betrachteten Strategien wie bspw. der Reparatur oder dem Re-Use (vgl. Kap. 2.6) betrachten viele Veröffentlichungen das Recycling als End-of-Life-Strategie. In den analysierten Quellen wird das Recycling allerdings sehr häufig als einzige EOL Strategie genutzt, wie z.B. bei Van Eygen et al., Xiao et al. oder auch Bhari et al. [Van Eygen et al., 2016, Xiao et al., 2016, Bhari et al., 2021]. Dabei sollte das Recycling aus den dargestellten R-Strategien die letzte Methode sein, um Teile eines Produktes in einem Kreislauf zu nutzen [Potting et al., 2017]. Der Vergleich verschiedener Recyclingrouten ist ebenfalls nicht möglich, da in Abhängigkeit des Betrachtungsrahmens andere Werkstoffe recycelt werden [Van Eygen et al., 2016, Bhari et al., 2021].

Wird bspw. Gold betrachtet, dass im Produkt enthalten ist, kann trotz eines hohen primären CO<sub>2</sub>-Ausstoßes mit der richtigen Recyclingstrategie fast alles wieder eingespart werden, um einen Kreislauf zu erreichen (siehe Kap. 2.5.2). Nach Gunn et al. ist die Beschaffung von primärem Gold im Vergleich zu vielen anderen Metallen sehr kostenintensiv, weshalb eine große Motivation für Recycling vorhanden ist

[Gunn, 2014].

### Kritische Rohstoffe

Bei dem deskriptiven Vergleich der kritischen Rohstoffe wird für den Anteil kritischer Rohstoffe nach Jin et al. wie auch der EU für die Gruppe der Weißwaren das Kriterium nach Gl. 5.5 erfüllt (siehe Tab. 5.12) [Jin et al., 2016, European Commission, 2023b]. Bei der Produktgruppe der Fahrzeuge zeigen die kritischen Rohstoffe nach Jin et al. ein erfülltes Kriterium nach Gl. 5.5. Für die weiteren Daten ist das Kriterium nicht erfüllt.

Eine Vergleichbarkeit ist daher in Teilen für die zuvor genannten Produktgruppen gegeben. Zwischen den verschiedenen Listen der kritischen Rohstoffe ist keine Vergleichbarkeit gegeben. Für die Weißwaren errechnet sich beispielsweise der Anteil kritischer Rohstoffe nach Jin et al. zu 60,8 % und der der EU zu 2,3 % (siehe Kap. 5.3). Dieses Verhalten ist auch für die anderen Produktgruppen zu beobachten. Ursächlich dafür sind die betrachteten Werkstoffe innerhalb der verschiedenen Listen. Das Element Eisen kommt z.B. in der Liste von Jin et al. vor und in der der EU nicht. Auch in der aktuellen Normung wie z.B. DIN EN ISO 14040 oder den GRI-Standards werden *kritische Rohstoffe* nicht betrachtet (siehe Kap. 2.3.2).

### Fehlerquellen und Schäden

Da die Fehlerquellen abhängig sind von der Baustruktur des Produktes und dessen Einzelteilen und Funktionen ist für das Hauptmerkmal der *Fehlerquellen* kein deskriptiver Vergleich möglich. Eine Vergleichbarkeit ist somit nur in ähnlich aufgebauten Produkten möglich, wie z.B. Smartphones und Notebooks.

In den analysierten Quellen geht es dabei meistens um die prozentuale Ausfallwahrscheinlichkeit eines Einzelteils, wenn ein Defekt gemessen wurde, wie zu sehen bei z.B. Thiemann und Schneider, Prakash et al. oder Bracquene et al. [Thiemann und Schneider, 2020, Prakash et al., 2016a, Bracquené et al., 2018]. Die Daten der *Fehlerquellen* stammen dabei alle aus Befragungen von Endkunden oder Reparaturbetrieben, die Produkte von Endkunden reparieren. Auf der Herstellerseite wurden keine Veröffentlichungen zu möglichen Fehlerquellen oder Ausfallwahrscheinlichkeiten gefunden. Obwohl Hersteller durch neuere Gesetze verpflichtet sind, bestimmte Ersatzteile mit einer hohen Ausfallwahrscheinlichkeit anbieten zu müssen (siehe

Kap. 2.3.1), werden die zugrunde liegenden Daten nicht offengelegt. Dieses Verhalten verstärkt vorliegende Linearwirtschaften (siehe Kap. 2.5.1) durch intransparente Produktinformationen.

Der deskriptive Vergleich aller Hauptmerkmale zeigt meistens (in 89,7 % der Fälle) eine hohe Unschärfe, was die Standardabweichungen in Relation zu den errechneten Mittelwerten betrifft und bestätigt dadurch die erste Hypothese. Sowohl innerhalb der Produktgruppen, wie auch produktgruppenübergreifend können keine weiteren Gemeinsamkeiten ermittelt werden, außer die Unterscheidung in kurzlebige und langlebige Produkte.

## 6.2 Clusteranalyse

Für die Beantwortung der Hypothesen zwei und drei (siehe Abb. 5.1) wurden Clusteranalysen für verschiedene Hauptmerkmale durchgeführt. Damit ist es möglich, objektiv Gemeinsamkeiten in den Daten zu ermitteln, ohne eine subjektive Einteilung durchführen zu müssen [Bortz und Schuster, 2010]. Die Analysen wurden für die *LCAs nach Phasen*, die *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen* sowie den mit Granta Selector erstellten *LCAs nach Werkstoffen* durchgeführt und ausgewertet (siehe Kap. 5.4). Der Ablauf der Clusteranalysen ist in Abb. 5.5 schematisch dargestellt. Die weiteren Hauptmerkmale nach Tab. 4.3 konnten aufgrund der geringen Anzahl an vorliegenden Daten nicht mit der Clusteranalyse untersucht werden.

### LCAs nach Phasen

In der Analyse der Ergebnisse zeigt sich eine Gruppierung in Produkte mit einem hohen CO<sub>2</sub>-Anteil in der Produktionsphase und einem eher niedrigen Anteil in der Nutzungsphase im Cluster VI, welcher daher den Zusatz „Fokus Produktion“ erhält (siehe Abb. 5.7). Das umgekehrte Verhalten ist in Cluster V „Fokus Nutzung“ zu beobachten. Hier besitzen die inkludierten Fälle einen eher geringen CO<sub>2</sub>-Anteil in der Produktionsphase und einen hohen in der Nutzungsphase. Die Gruppe der Smartphones und Notebooks wird mit knapp 73 % dem Cluster VI „Fokus Produktion“ zugeordnet, welcher einen hohen Produktionsanteil und geringen Anteil der Nutzungsphase beschreibt.

Diese Beobachtungen decken sich mit denen aus dem deskriptiven Vergleich, wo

die Boxplots des selben Hauptmerkmals der *LCAs nach Phasen* ein sehr ähnliches Verhalten gezeigt haben (siehe Abb. 5.2). Auch dem quasi umgekehrten Cluster V „Fokus Nutzung“ können 100 % der Fälle aus der Hauptgruppe der Weißwaren und 71 % der Fälle der Fahrzeuge zugeordnet werden, was ebenfalls zu den zuvor beschriebenen Boxplots passt. Diese Überdeckungen bestätigen die Ergebnisse aus dem deskriptiven Vergleich. Erst mit der Clusteranalyse wurde es möglich, eine eindeutige Zuordnung der einzelnen Veröffentlichungen zu den Beobachtungen des deskriptiven Vergleichs herzustellen. Konnten zuvor Extremwerte nur als solche identifiziert werden, ist es mit der Clusteranalyse nun möglich, diese detaillierter zu charakterisieren. Beispielsweise in der Hauptgruppe der Fahrzeuge wurde beim deskriptiven Vergleich zuvor ein langlebiges Verhalten festgestellt (siehe Kap. 5.3). Mithilfe der Clusteranalyse kann gezeigt werden, dass die Produktgruppe der Pe-delecs in den analysierten Quellen von Eckart et al., Rüdenauer und Prakash sowie Riese & Müller zu gleichen Teilen kurz- und langlebig ausgeprägt ist und somit nicht eindeutig zugeordnet werden kann.

Mit den zugehörigen Lebensdauern sowie *Absatzzahlen*, den Erkenntnissen aus dem deskriptiven Vergleich und der Clusteranalyse für das Hauptmerkmal *LCAs nach Phasen* lässt sich gut erkennen, dass bestimmte Produktgruppen ein eher kurzlebiges Verhalten aufweisen und andere ein eher langlebiges. Die kurzlebigen Produkte werden dabei im Hinblick auf die LCI-Daten vorzeitig ersetzt, aufgrund von funktioneller und psychologischer Obsoleszenz (siehe Kap. 2.7) [Packard, 1960]. Diese Unterscheidung in kurzlebige und langlebige Produkte ist auch in aktuellen Regulierungen wie den Neuerungen der Ökodesignrichtlinie oder dem Französischen Reparierbarkeitsindex zu sehen, welche teilweise schnelllebige Produkte wie Smartphones regulieren und bewerten [Ministère de la Transition écologique, 2022].

### LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen

Die Clusteranalyse für das Hauptmerkmal der *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen* erfolgte ähnlich wie der deskriptive Vergleich in zwei Schritten, da hier verschieden skalierte Daten vorliegen.

Die nominal skalierten Daten erreichten erst bei 30 Clustern ein Signifikanzniveau von  $\alpha = 0,05$ , was bei einer Fallanzahl von 33 betrachteten Fällen keine Rückschlüsse auf Gruppierungen zulässt (siehe Kap. 5.4). Diese Varianz der Da-

## 6 Diskussion

ten konnte im deskriptiven Vergleich ebenfalls schon betrachtet werden (siehe Kap. 5.3). Die durchgeführte Clusteranalyse lässt an dieser Stelle also keinen Vergleich zu den verwendeten Datenbanken und Datensets zu.

Die Analyse der metrisch skalierten Daten ermöglichte auch hier eine Gegenüberstellung. Die drei größten Cluster können unterteilt werden in ein kurzlebiges Szenario mit wenig Energieverbrauch in der Nutzungsphase, einem langlebigen Szenario mit hohem Energieverbrauch in der Nutzungsphase und einem mittleren mit vergleichsweise vielen Reparaturen (siehe Tab. 5.13). Somit ist die Unterscheidung zwischen kurzlebigen und langlebigen Produkten auch schon bei der Bildung der Szenarios der LCIs für Ökobilanzen zu sehen. Dabei können aus der Hauptgruppe der Smartphones und Notebooks knapp die Hälfte der analysierten Veröffentlichungen dem kurzlebigen Szenario zugeordnet werden. In der Gruppe der Weißwaren fallen 67 % in den Cluster II „langlebig“ (siehe Kap. 5.4). Die Gruppe der Fahrzeuge ist bei der Analyse der LCIs im Unterschied zu der vorherigen Clusteranalyse und dem deskriptiven Vergleich auch von kurzlebigen Szenarios geprägt, da ca. 80 % dem Cluster X „kurzlebig“ zugeordnet werden können. Dieses Verhalten kann auf die Produkte in der Hauptgruppe zurückgeführt werden, da Pedelecs und Fahrräder mit sehr unterschiedlichen Lebensdauern angenommen werden, zwischen 4 und 12,6 Jahren teilen sich die Lebensdauern für diese Produktgruppe weit auf [Rüdenauer und Prakash, 2020, Riese & Müller, 2025]. Gerade die Produktgruppe der Pedelecs ist ein noch eher neueres Produkt, mit wachsenden Absatzzahlen wie in Kap. 5.1 beschrieben und durch die starke Elektrifizierung besitzt diese eine höhere funktionelle Obsoleszenz als z.B. die Produktgruppe der Fahrräder (siehe Kap. 2.7).

Bei der Auswertung der Clusteranalyse für die metrisch skalierten Daten aus dem Hauptmerkmal *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen* zeigt sich dabei erneut eine Gruppierung in kurz- und langlebige Produkte. Damit kann gezeigt werden, dass sich diese Unterscheidung nicht nur in den Output- sondern auch in den Inputdaten finden lässt. Zuvor wurden schon existierende Produkte in der abgeschlossenen Analyse als kurz- oder langlebig charakterisiert. Nach den Ergebnissen der Clusteranalyse wird diese Eingruppierung in kurz- oder langlebig bereits vor dem Beginn einer Analyse getroffen.

## 6.3 Herausforderungen aktueller Nachhaltigkeitsbewertungen

Die vorangegangene Gegenüberstellung der Ergebnisse konnte verschiedene Herausforderungen, gerade im Bezug auf die Vergleichbarkeit von Ökobilanzierungen untereinander, aufzeigen. Im Folgenden werden diese einzeln herausgestellt.

Die Grundlage für alle Ökobilanzierungen stellen qualitative Daten aus schon bestehenden Datenbanken dar. Dabei führen unterschiedliche Datenbanken, die Modellierungsart sowie verwendete Datensets zu unterschiedlichen Ergebnissen. Aufgrund der historischen Entwicklung einiger Quellen, wie z.B. bei ecoinvent, welche in der ersten Version nur aus Daten aus der Schweiz für die Schweiz bestand, ist die Anwendung dieser nicht zu jedem Zeitpunkt vergleichbar [Wernet et al., 2016]. Erst später kamen neue Datensätze für die Verwendung außerhalb der Schweiz hinzu [Wernet et al., 2016]. Ähnlich ist es bei der Datenbank für den Granta Selector oder Edu-Pack, die sich auf die Arbeiten von verschiedenen Personen und Institutionen für ihre Berechnungen stützen [Ashby et al., 2021].

Diese Diskrepanz zeigt sich deutlich in den mit Granta Selector erstellten LCAs (siehe Kap. 5.3), da in der Software auch Informationen über die Berechnungsgrundlage für den jeweiligen Werkstoff und das Fertigungsverfahren sowie verwendete Quellen angegeben sind.

Beispielhaft sind in Tabelle 6.1 vier Werkstoffe gezeigt. Am Beispiel von Eisen ist hier gut zu sehen, dass die Emissionen in kg CO<sub>2</sub> pro produziertem Kilogramm Eisen in den berücksichtigten Quellen zwischen 1,78 und 20,3 kg CO<sub>2</sub>/kg schwanken. Für Magnesium ist für die Berechnungsgrundlage keine Quelle genannt und bei Aluminium schwankt die Berechnungsgrundlage je nach Quelle zwischen 9,92 und 22,2 kg CO<sub>2</sub>/kg. In den Daten ist ebenfalls schon eine große Ungenauigkeit zu sehen, die sich über verschiedene Datenbanken und Quellen somit nur vergrößert.

Die expliziten Quellen für alle in Kapitel 5.3 untersuchten Werkstoffen der *LCAs nach Werkstoffen* sind im Anhang zu finden. Die Inhalte der Quellen sind dabei als geistiges Eigentum einzelner Firmen geschützt oder teilweise nur käuflich zu erwerben. Dies führt unweigerlich dazu, dass die Quellen der Tabelle hier nur genannt werden können, da sie nicht einsehbar und somit nicht überprüfbar sind.

Auch der Betrachtungsrahmen im Bereich der Szenarios und des Produktumfangs

## 6 Diskussion

Tabelle 6.1: Von der Software Granta Selector verwendete Quellen und Wertebereiche für die Modellierung in Lebenszyklusanalysen. Eigene Darstellung nach [Ansys, 2025]

| Element | Fertigungsart, Güte                                   | CO <sub>2</sub> -Fußabdruck, Primärproduktion (Neuware) kg CO <sub>2</sub> /kg | Wert in der Quelle kg CO <sub>2</sub> /kg     | Quelle                                                                                                                                                                    |
|---------|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Fe      | Schmiedeeisen                                         | 2,19 - 2,42                                                                    | 2,06<br>4,28<br>20,30<br>1,85<br>1,80<br>1,78 | (Voet, van der and Oers, van, 2003)<br>(Voet, van der and Oers, van, 2003)<br>(Hammond and Jones, 2008)<br>(Ecoinvent v3.7.1)<br>(Ecoinvent v3.7.1)<br>(Ecoinvent v3.7.1) |
| Si      | Silicon                                               | 4,78 - 5,27                                                                    | 5,02                                          | (Ecoinvent v2.2)                                                                                                                                                          |
| Mg      | Magnesium, AE44, cast, F                              | 22,20 - 24,50                                                                  | <i>ohne Quelle</i>                            | <i>ohne Quelle</i>                                                                                                                                                        |
| Al      | Aluminium, kommerzielle Reinheit, S150.1: LM0-M, cast | 13,10 - 14,50                                                                  | 13,10<br>12,80<br>22,20<br>10,90<br>9,92      | (Voet, van der and Oers, van, 2003)<br>(Hammond and Jones, 2008)<br>(Ecoinvent v3.7.1)<br>(Ecoinvent v3.7.1)<br>(Ecoinvent v3.7.1)                                        |

unterscheidet sich in allen analysierten Quellen beträchtlich. Da in manchen Quellen Zubehör, Verpackung und diverse Szenarios angegeben werden, wie z.B. bei Sánchez et al., wohingegen andere Quellen nur das Produkt an sich ohne Reparaturen und ohne verschiedene Szenarios betrachten, wie z.B. bei Pero et al. [Sánchez et al., 2022, Pero et al., 2018]. Sowohl der deskriptive Vergleich in Kap. 5.3 wie auch die Clusteranalyse in Kap. 5.4 zeigen diese Unterschiede deutlich auf. Diese Gründe führen zu einer schlechten Vergleichbarkeit der berechneten absoluten Zahlen für Lebenszyklusanalysen.

Die aktuelle Normung setzt sich zum Ziel, dieses Vergleichbarkeit von Ökobilanzierungen herzustellen. So betrachtet der GRI-Standard beispielsweise verschiedene Wirtschaftssektoren oder Nachhaltigkeitsmerkmale wie verbrauchte Materialien oder Energie, gibt aber keinerlei Produktgruppendenken vor [GRI, 2024a]. Unter dem Standard 301-1 zum Material heißt es nur „Rohstoffe, d.h. natürliche Ressourcen, die für die Umwandlung zu Produkten oder Dienstleistungen verwendet werden, wie Erze, Mineralien und Holz“ sollen als Empfehlung offengelegt werden [GRI, 2024a]. Auch die DIN EN ISO 14040 und 14044 (siehe Kap. 2.8) für die Erstellung einer Ökobilanz geben keinerlei Hinweise darüber, wie der Betrachtungsrahmen für bestimmte Produktgruppen gewählt oder angepasst werden sollte [DIN

### 6.3 Herausforderungen aktueller Nachhaltigkeitsbewertungen

e. V., 2021a, DIN e. V., 2021b]. Der erweiterte Rahmen der ILCD lässt ebenfalls immer noch sehr viel Spielraum für die Erstellung von Ökobilanzen, wie schon in Kap. 3.1 beschrieben. Auch hier erfolgt keinerlei Standardisierung oder Klassifizierung in bestimmte Produktgruppen, um Nachhaltigkeitsbewertungen besser vergleichbar zu machen.

Die 2024 in Kraft getretene ESPR der EU (siehe Kap. 2.3.1) macht dabei am meisten Fortschritte, was ein produkt- bzw. ein produktgruppenbezogenes Denken bei der nachhaltigen Konstruktion betrifft [European Commission, 2024]. Die definierten Produktparameter, die laut Verordnung „je nach Sachlage einzeln oder zusammengefasst als Grundlage für die Verbesserung der folgenden Produktherausforderungen herangezogen“ werden müssen, beschreiben beispielsweise Indikatoren für die Zuverlässigkeit eines Produktes [European Commission, 2024]. Weiter beschreiben diese Produktparameter mittlere Ausfallabstände oder Aspekte, wie verwendete Materialien und Bauteile, sowie die Verwendung von Standardbauteilen [European Commission, 2024]. Gerade in Bezug auf diese Informationen oder auch andere Merkmale aus den Life Cycle Inventories legen Hersteller aktuell sehr wenig Daten offen. Sofern Hersteller Nachhaltigkeitsbewertungen durchführen, werden meist die Ergebnisse nach den GRI-Standards oder in Form einer LCA nach Phasen präsentiert, wie z.B. zu sehen bei Welter und Fink, Wagner oder Schaffeld und Ruppach [Welter und Fink, 2024, Wagner, 2019, Schaffeld und Ruppach, 2023]. Vergleichbare Grundannahmen können an dieser Stelle nicht überprüft werden, da diese Grundannahmen nicht offengelegt werden. In wissenschaftlichen Veröffentlichungen werden mehr Informationen über das Scope und Teile des LCIs gegeben, allerdings fehlt es auch hier an einheitlichen Angaben zu verwendeten Datenbanken und der durchgeführten Modellierung, also welche Art von Datensets für die Berechnung benutzt wurde, wie z.B. zu sehen bei Rüdenauer und Prakash, Kanz et al., Buberger et al., Xiao et al., Proske et al. und weiteren [Rüdenauer und Prakash, 2020, Kanz et al., 2018, Buberger et al., 2022, Xiao et al., 2015, Proske et al., 2020]. Die in Kapitel 5.3 und Kap. 5.4 durchgeführten Analysen konnten diese Unterschiede deutlich aufzeigen. So wurden bei 33 Fällen der anfänglichen Clusteranalyse der nominal skalierten Daten des Hauptmerkmals *LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen* 30 signifikant unterschiedliche Cluster ermittelt. Ein Vergleich ist somit zu keiner Zeit möglich.

Die aufgezeigten Herausforderungen lassen sich somit wie folgt zusammenfassen:

- Verwendung unterschiedlicher Datenbanken
- Keine stringent definierten LCIs
- Zu viel Spielraum in aktueller Normung
- Kein einheitliches Produktgruppendenken
- Nicht standardisierte Veröffentlichungen von Wissenschaft und Wirtschaft

### 6.4 Beantwortung der Forschungsfrage

Die abschließende Beantwortung der in Kap. 3.2 formulierten Forschungsfrage ist erst nach detaillierter Validierung der formulierten Hypothesen (siehe Abb. 5.1) möglich.

Im deskriptiven Vergleich (siehe Kap. 6.1) wurden Untermerkmale gegenübergestellt. Für insgesamt 329 Fälle wurde geprüft, ob das Kriterium nach Gl. 5.5 verletzt wird. Für 89,67 % (295 Fälle) wurde das Kriterium verletzt. Neben den im Kapitel 6.1 herausgearbeiteten Unterschieden zeigt die absolute Zahl der Verletzungen des Kriteriums die signifikante Unschärfe in den Eingangs- sowie Ausgangsdaten. Ausschließlich eine Unterscheidung in kurz- oder langlebige Produkte war an dieser Stelle möglich. Somit wird die erste Hypothese bestätigt: Die Daten zeigen im deskriptiven Vergleich eine klare Unschärfe.

Die in Kap. 5.1 formulierten Hypothesen zwei und drei wurden explizit auf die Unterscheidung zwischen Gemeinsamkeiten innerhalb von Hauptgruppen und über Hauptgruppen hinweg ausgelegt. Die detaillierte Analyse der erarbeiteten Ergebnisse aus Kap. 6.1 und Kap. 6.2 zeigen jedoch, dass eine strikte Trennung der Hypothesen im formulierten Sinne nicht möglich ist. Werden alle Erkenntnisse aus dem deskriptiven Vergleich und den durchgeführten Clusteranalysen zusammengefasst, kann gerade in den absolut ausgedrückten Zahlenwerten der Datenbasis keine Gruppierung der Produkte innerhalb einer Produktgruppe festgestellt werden. Betrachtet man beispielsweise die Produktgruppe der Notebooks, reichen die Summen der ausgestoßenen CO<sub>2</sub>-Äquivalente für die *LCAs nach Phasen* von 230 kg bei Prakash et al., über 369 kg bei O’Connell und Stutz bis zu 1228 kg bei Prakash et al. obwohl ausschließlich Produkte für private Haushalte betrachtet wurden [Prakash et al.,

2012, O’Connell und Stutz, 2010, Prakash et al., 2016b]. Auch in der Gruppe der Waschmaschinen reichen die summierten CO<sub>2</sub>-Äquivalente z.B. von 144 kg bis 1288 kg [Gensch und Blepp, 2015, Rüdenauer und Prakash, 2020].

Werden die Daten prozentual umgerechnet auf die Anteile der einzelnen Phasen, ergeben sich einige Erkenntnisse. Hier ist eine gewisse Kurzlebigkeit oder Langlebigkeit einzelner Produktgruppen zu erkennen. Dabei sind z.B. die Produktgruppen der Smartphones und Notebooks im Ergebnis kurzlebig, mit einem hohen Ausstoß an CO<sub>2</sub> in der Produktionsphase und einem vergleichsweise geringen in der Nutzungsphase (siehe Kap. 5.3 und 5.4). Produkte der Weißwaren sind langlebiger, bei ihnen kehrt sich das Verhältnis zwischen den Phasen um (siehe Tab. 5.6). Dieses Verhalten lässt sich auch in den analysierten metrischen Daten der LCIs betrachten, bei denen in der Wahl der Szenarios für die jeweilige Produktgruppe schon langlebige oder kurzlebige Szenarios benutzt werden (siehe Tab. 5.13). Auch die *Nutzungsdauer* sowie die *Absatzzahlen* zeigen für diese Unterscheidung klare Indikatoren auf, mit kurzen gemessenen Lebensdauern und hohen Absatzzahlen für kurzlebige Produkte und umgekehrt für langlebige (siehe Kap. 5.3).

Die Vergleichbarkeit innerhalb der untersuchten Produktgruppen und Merkmalen beschränkt sich im Ergebnis der Untersuchung also darauf, ob ein Produkt kurzlebig oder langlebig gestaltet ist. Weitere Nachhaltigkeitsmerkmale können in der aktuellen Form der Ökobilanzierung nicht verglichen werden, da es keinen Rahmen gibt bzw. keine Standardisierung für einzelne Produktgruppen im Bezug auf die zu erstellende Analyse (siehe Kap. 6.3). Dieses Verhalten spiegelt sich auch in der aktuellen Berichterstattung über die Nachhaltigkeit von Produkten wider. Hier wird meistens nur die Lang- bzw. Kurzlebigkeit eines Produktes herausgestellt und im Sinne der Nachhaltigkeit als gut oder schlecht bewertet.

Dies ist zum Beispiel in den Veröffentlichungen von Seifert, Stock, Schupak, Fowler, Grossarth oder McKeesick zu sehen [Seifert, 2025, Stock, 2025, Schupak, 2024, Fowler, 2022, Grossarth, 2024, McKeesick, 2025]. Andere Faktoren, wie z.B. die verbrauchte Energie in der Produktion und Rohmaterialbeschaffung, Fehleranfälligkeit oder geplante EOL-Strategien des Produktes oder die stoffliche Zusammensetzung bezogen auf kritische Rohstoffe oder Seltene Erden finden in dieser öffentlichen Diskussion sehr wenig Beachtung. Ganzheitlich nachhaltig entwickelte und erzeugte Produkte wie z.B. das Fairphone mit einer guten Reparierbarkeit, transparenter Lebenszyklusanalyse und geringem CO<sub>2</sub>-Fußabdruck (siehe Tab. 4.8) bilden aktuell die

## 6 Diskussion

Ausnahme, obwohl gerade umfassende Hintergrundinformationen für eine vergleichbare Nachhaltigkeitsbewertung unerlässlich sind (siehe Kap. 6.3) [Didham, 2025].

Die eingangs erstellte Forschungsfrage sowie die drei abgeleiteten Hypothesen können daher allesamt als positiv bestätigt gesehen werden, da eine Vergleichbarkeit nur sehr eingeschränkt möglich ist mit den aktuellen Bewertungssystemen. In den folgenden Unterkapiteln sollen die Problematiken aktueller Nachhaltigkeitsbewertungen noch einmal gebündelt und dazu mögliche Lösungswege aufgezeigt werden. Die in Kap. 5.1 noch getrennt voneinander formulierten Hypothesen konnten nur gemeinsam geprüft werden. Es zeigte sich, dass es keine signifikanten Merkmalscluster innerhalb einer Hauptgruppe oder darüber hinaus gab, mit Ausnahme der Kurz- oder Langlebigkeit. Somit gelten beide Hypothesen als bestätigt.

Mit den bestätigten Hypothesen ist es nun möglich auch die in Kap. 3.2 formulierte Forschungsfrage abschließend zu beantworten. Allein die vielfältige Verletzung des untersuchten Kriteriums nach Gl. 5.5 erlaubt es, nur in 10,3 % aller Daten von einer Signifikanz zu sprechen. Das Fehlen nahezu aller Merkmalscluster, ausgenommen der Lebensdauer, schränkt die Vergleichbarkeit von Ökobilanzen noch weiter ein. Davon ausgehend, dass die Lebensdauer innerhalb der signifikanten Ökobilanzen nicht das alleinige Merkmal der Bewertung darstellt, muss davon ausgegangen werden, dass nur ein einstelliger Prozentsatz der durchgeführten Ökobilanzen vergleichbar ist.

### 6.5 Lösungen aus der Nachhaltigkeitsdidaktik

Wie in Kapitel 6.3 beschrieben, haben aktuelle Ökobilanzierungen ein grundlegendes Problem in ihrer Vergleichbarkeit, sowohl innerhalb gleicher Produktgruppen wie auch darüber hinaus. Auch die präsentierten Erkenntnisse in den Kapiteln 6.1 und 6.2, dass bei den untersuchten Nachhaltigkeitsbewertungen nur eine grundlegende Unterscheidung zwischen kurzlebig und langlebig getroffen werden kann, zeigen eine Grundproblematik der Aussagekraft der Bewertungen. Die Bewertungen werden aufgrund der Vielzahl an Untermerkmalen innerhalb der Hauptmerkmale komplex, gerade in Bezug auf die Betrachtungsweisen für die Scopes und Life Cycle Inventories (siehe Kap. 4.3). Diese Komplexität macht die Überschaubarkeit über die komplette Prozesskette eines Produktes sowie allen zu betrachtenden In- und Outputs schwierig.

## 6.5 Lösungen aus der Nachhaltigkeitsdidaktik

Die Systeme der Nachhaltigkeitsbewertung müssen als Werkzeuge verstanden werden. Die korrekte Anwendung dieser Werkzeuge kann nicht vorausgesetzt und muss daher erlernt werden. Das erfolgreiche Lernen und Anwenden der Bewertungssysteme ist somit auch eine Herausforderung aus der Didaktik. Rapske und Stomporowski schreiben dazu „[w]ährend sich Nachhaltigkeit letztlich als didaktische Reflexionskategorie den Folgen beruflichen Handelns widmet, verbleibt Handlungsorientierung oft auf der konkret berufspraktischen Anforderungsebene“ [Rapske und Stomporowski, 2017]. Wird die Nachhaltigkeit aus der didaktischen Perspektive betrachtet, können Parallelen aufgezeigt werden.

Das Fachgebiet der Nachhaltigkeitsdidaktik fasst die nachhaltige Entwicklung (NE) und Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE) zusammen [Wolff B., 2025]. Dabei unterliegt die Lehre der Nachhaltigkeit sehr ähnlichen Problemen wie die untersuchten Nachhaltigkeitsbewertungen. Rapske und Stomporowski stellen dabei die grundsätzliche Problematik heraus, dass bei dem Prinzip der Handlungsorientierung nur Handlungsanforderungen betrachtet werden, aber keine Handlungsfolgen in der beruflichen Bildung [Rapske und Stomporowski, 2017]. Übertragen auf die Nachhaltigkeitsbewertung ist diese Problematik darin zu finden, dass Gesetze und Normen zwar Anforderungen an diese Bewertungen stellen, die Vergleichbarkeit als Folge jedoch nicht betrachtet wird. Die Autoren stellen zudem die These auf, dass die Folgewirkung beruflicher Arbeit sich dabei teilweise der beruflichen Konkretheit entzieht [Rapske und Stomporowski, 2017]. Als Beispiel kann in diesem Zusammenhang die Ökodesignrichtlinie genannt werden. Diese hat in ihren Fassungen von 2009 und 2012 die Folgen beruflicher Arbeit durch eine verbesserte Reparierbarkeit reguliert (siehe Kap. 2.3.1). Die Regulierung der Reparierbarkeit wurde in ihrer Konkretheit übergangen durch pauschalisierte Gründe wie z.B. die Kapselung von Systemen [European Union, 2009].

Die Herausforderung der Nachhaltigkeitsdidaktik, sich nicht nur mit den Anforderungen des eigenen Berufs auseinanderzusetzen, sondern auch mit den Folgen der eigenen Handlungen, spiegelt sich vor allem in den folgenden Veröffentlichungen zu dem Thema wider. Wilhelm und Kalcsics sprechen von der „Aufdeckung und Auseinandersetzung mit Komplexität und Kontroversen im Umgang mit Nachhaltigkeit“ [Wilhelm und Kalcsics, 2023].

Didham teilt die Nachhaltigkeitslehre in drei Felder, das problemorientierte Feld, das milderungsorientierte Feld und das lösungsorientierte Feld, wobei alle Felder re-

## 6 Diskussion

levant sind, um das Verständnis der Nachhaltigkeit zu verbessern [Didham, 2025]. Dabei lässt sich das problemorientierte Feld beispielsweise gut mit den von der EU verfassten Aktionsplänen, wie z.B. der Aktionsplan für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa (siehe Kap. 2.3.1), vergleichen [European Commission, 2020]. Beim milderungsorientierten Feld gibt es beispielsweise Hersteller wie Fairphone, die mit ihren Produkten eine Teillösung präsentieren, die aber weder alle Probleme der Nachhaltigkeit (siehe Kap. 2.2) noch eine globale Lösung hin zu einer vollständigen Kreislaufwirtschaft (siehe Kap. 2.5.2) zeigen [Wernink und Strahl, 2015]. Im lösungsorientierten Feld können die aktuellen Normen für Ökobilanzierungen genannt werden (siehe Kap. 2.8), die zwar fertige Lösungen präsentieren, welche aber weder die grundlegenden Problematiken der Nachhaltigkeit angehen, noch kurzfristige Lösungen für eine Verbesserung der Situation schaffen. Die genannten Beispiele belegen, dass schon jetzt die erläuterten drei Felder der Nachhaltigkeitslehre betrachtet werden.

Eine sinnvolle Zusammenarbeit sowie Kopplung der Disziplinen steht jedoch noch aus. Daher sind nicht nur die Felder wichtig, sondern auch die Verbindung dieser. Wie in Kap. 6.3 gezeigt wurde, können die Herausforderungen aktueller Nachhaltigkeitsbewertungen in die zuvor beschriebenen Felder Problem, Milderung und Lösung eingruppiert werden und zwar auf die Art, dass verschiedene Protagonisten nur einzelne Felder vertreten. Die Politik versucht fertige Lösungen zu formulieren, Hersteller versprechen eine Milderung und der Klimawandel wird als gesellschaftliches Problem verstanden. Überschneidungen der Felder finden aktuell nur sehr wenig statt.

Den zuvor aufgegriffenen realen Handlungsfolgen steht ein eher ethischer und virtueller Gedanke der Nachhaltigkeit gegenüber [Rapske und Stomporowski, 2017]. Die Herausforderungen in der Nachhaltigkeitsdidaktik zeigen dabei Analogien zu den Herausforderungen der Nachhaltigkeitsbewertung (siehe Kap. 6.3). Die Vergleichbarkeit und Aussagekraft von Ökobilanzierungen sind über die komplette Prozesskette hinweg komplex und schwer überschaubar. Dieser Problematik kann wie in der Nachhaltigkeitsdidaktik am besten mit BNE begegnet werden, um alle Beteiligten dazu zu befähigen, „sich kritisch mit Problemen nachhaltiger Entwicklung, mit möglichen Lösungen und der Forderung nach einer Transformation der Gesellschaften auseinanderzusetzen“ [Wilhelm und Kalcsics, 2023]. Durch eine ganzheitliche Betrachtung von In- und Outputs bzw. Handlungsanforderungen (siehe Kap. 6.1 und Kap. 6.2)

und Handlungsfolgen und einer guten BNE können die aktuell vorliegenden Probleme besser gelöst werden.

Ein gesetzlicher und auch normativer Rahmen, der im Idealfall eine produktgruppenspezifische Sicht ermöglicht, müssen Inhalte einer BNE sein. Ebenso die Betrachtungsweisen auf Phasen, Werkstoffe oder auch Einzelteile für das Erstellen von Ökobilanzierungen müssen Grundlagen sein, die vermittelt werden. Die Handlungsorientierung inklusive der Handlungsfolgen, wie von Rapske und Stomporowski dargelegt, müssen dabei das übergeordnete Ziel für den gesetzlichen und normativen Rahmen, der Anforderungen und Auswirkungen auf konkrete Weise beschreibt und reguliert, darstellen [Rapske und Stomporowski, 2017].

## 6.6 Lösungsansätze für eine verbesserte Nachhaltigkeitsbewertung

Die bis hierher dargestellten Defizite und Herausforderungen (vgl. Kap. 6.3) in der Vergleichbarkeit von Nachhaltigkeitsbewertungen machen weitergehende Lösungsansätze zwingend erforderlich. Die Überprüfung der abgeleiteten Hypothesen (siehe Kap. 6.4) leitet zu einer Vielzahl von Lösungsansätzen hin, die im Folgenden dargestellt werden.

Generell müssen die Eingangsdaten für die Lebenszyklusanalysen öffentlich zugänglich gemacht werden, wenn eine Ökobilanz erstellt wird. Gerade im Hinblick auf Hersteller müssten die Standards unverfängliche Daten beinhalten, die trotzdem genug Informationen bereitstellen, um das jeweilige LCI bewerten zu können und vergleichbar mit anderen zu machen. Wird von den Eingangsdaten ausgehend die eigentliche Ökobilanzierung erstellt, ist es wichtig, dass die Berechnungsgrundlage möglichst gleich gehalten wird. Daher sollte an dieser Stelle die Wahl der Datenbank, sowie die Modellierungsgrundlage der Datensets ebenfalls immer angegeben und im Idealfall standardisiert werden. Die Modellierung selbst sollte immer standardisiert durchgeführt werden, z.B. entweder immer auf Werkstoffbasis oder immer auf Basis von gleichen generischen Datensets.

Gerade die Wahl der Datenbank sollte für eine vereinheitlichte Ökobilanzierung vorgegeben werden, da aktuell zu viele verschiedene Lösungen vorliegen, wie z.B. ecoinvent, GaBi, Idemat, Umberto, ProBas, GEMIS, SMARD, Granta Selector und

weitere [Sánchez et al., 2022, Bakker et al., 2014a, Rüdenauer et al., 2007, Kanz et al., 2018]. Durch die Angabe der Datenbank sowie der Modellierungsgrundlage der Datensets ist die Bewertung dieser möglich. Da diese Datenbanken sich alle in ihren zugrundeliegenden verwendeten Quellen unterscheiden und auch diese wiederum unterschiedliche Werte für die Berechnung angeben, wie im Kap. 6.3 in Tab. 6.1 zu sehen, ist die logische Konsequenz die Verwendung einer globalen Datenbank, wenn auch die Ergebnisse verglichen werden sollen. Die generelle Vorgabe, eine bestimmte Datenbank zu nutzen, kann nicht die Lösung sein, da viele Datenbanken aktuell nicht öffentlich zugänglich und monetarisiert sind [Ansys, 2025].

Werden Lebenszyklusanalysen für Werkstoffe oder Einzelteile erstellt, müssen auch diese bestimmte Standardisierungen aufweisen, in Abhängigkeit des betrachteten Produktes. Bei Kühlschränken z.B. müssen immer die benötigten Kunststoffe für die Isolierung betrachtet werden oder auf Einzelteilebene immer der Kompressor und das Kühlmittel. Da der Einsatz von Halbleitertechnologie mit einem hohen CO<sub>2</sub>-Footprint einhergeht, wie schon von Gutowski et al. festgestellt, müssen Komponenten aus dem Bereich der Halbleitertechnologie in Ökobilanzen besonders ausgewiesen werden [Gutowski et al., 2009]. Durch diese Standardisierung werden die Eingangs- und Ausgangsdaten für die Ökobilanzen besser normiert, um so eine bessere Vergleichbarkeit zu erlangen. Die Sicht auf ein gleichbleibendes Grundset an Werkstoffen oder Einzelteilen macht eine Vergleichbarkeit für diese erst möglich über alle Produkte innerhalb der betrachteten Gruppe. Wenn sich auf bestimmte grundlegende Werkstoffe geeinigt wird, wie z.B. eine Liste für kritische Rohstoffe oder ähnliches, könnten außerdem Vergleiche über Produktgruppen hinweg angestellt werden.

Für die Definition einer einzelnen Produktgruppe müssen ebenso definierte Rahmenbedingungen bestehen. Dabei sollte eine Spezifizierung für die LCIs einzelner Produktgruppen erfolgen, gerade im Hinblick auf die betrachteten Szenarios sowie den Ein- und Ausgangsdaten der Ökobilanzierungen. So könnte beispielsweise für die Produktgruppe der Smartphones immer standardmäßig ein kurzlebiges Szenario mit einer Lebensdauer von drei Jahren und einer Reparatur betrachtet werden, wie z.B. bei Cordella et al. [Cordella et al., 2021b]. Zusätzlich sollten immer für das Zielland der Untersuchung die kritischen Werkstoffe sowie Seltenen Erden analysiert werden. Eine standardisierte Betrachtungsweise für einzelne Produktgruppen ermöglicht es erst, die Basis der Eingangsdaten zu vereinheitlichen und somit auch

## 6.6 Lösungsansätze für eine verbesserte Nachhaltigkeitsbewertung

die Ausgangsdaten vergleichbarer zu gestalten.

Durch ein stringent durchdachtes und ausgeführtes produktgruppenspezifisches Denken in der aktuellen Normung für Ökobilanzierungen können diese, ähnlich wie auch in der Gesetzgebung aktuell zu sehen, besser kontrolliert und vereinheitlicht werden.

Die aktuellen Rahmenbedingungen für Ökobilanzierungen ergeben sich aus Normen wie der DIN EN ISO 14040 und 14044, dem ILCD-Handbuch oder den GRI-Standards (siehe Kap. 3.2). Auf der rechtlichen Seite existieren Richtlinien, wie die Ökodesignrichtlinie, die mittlerweile durch die ESPR ersetzt worden ist, so wie Aktionspläne wie „Fit for 55“ oder der Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft der Europäischen Kommission (siehe Kap. 2.3.1). Dabei sind gerade die jüngeren Richtlinien und Gesetzgebungen, wie die Änderungen der Ökodesignrichtlinie 2019/2020 auf bestimmte Produktgruppen ausgerichtet, wie z.B. Kühlgeräte oder Waschmaschinen [European Commission, 2019]. Auch der Weg zur ESPR im Jahr 2024, welche dann bis auf wenige Ausnahmen für alle erzeugten Produkte gilt und anzuwenden ist, zeigt eine stärkere Regulierung einzelner Produkte und Produktgruppen [European Commission, 2024]. Dieser Ansatz, Produkte aus bestimmten Gruppen mit gesonderten Regulierungen zu versehen, bietet auch große Vorteile im Bereich der Nachhaltigkeitsbewertung. Durch die Standards werden Vergleiche von Lebenszyklusanalysen innerhalb von Produktgruppen ermöglicht.

Mittels weiterer produktgruppenübergreifender grundlegender Standards, wird die Basis für Vergleiche von Ökobilanzierungen über einzelne Produktgruppen hinweg geschaffen. Zu diesen Standards kann beispielsweise eine einzelne Liste kritischer Rohstoffe gehören. Auch für die betrachteten Szenarios sollte ein Standard gewählt werden, der eine Einteilung in bestimmte Lebensdauern ermöglicht. Ebenso die Anzahl der Reparaturen sollte für den Rahmen der Betrachtung fest vorgegeben sein.

Die untersuchten Daten haben zudem gezeigt, dass die Absatzzahlen einzelner Produkte stark schwanken. Beispielsweise Smartphones in den letzten zehn Jahren oder in jüngster Zeit die Produktgruppe der Pedelecs (siehe Kap. 4.3) zeigen ein starkes Wachstum. Bei den Pedelecs stieg der Absatz um ca. 1400 % von 2009 bis heute [ZIV, 2025a]. Aus diesem Grund ist es unerlässlich, dass globale Datenbanken, wie auch die Regulierungen für die Nachhaltigkeitsbewertung einzelner Produktgruppen fortlaufend angepasst werden.

Zuletzt wurden verschiedene Ansätze dargestellt, die die Herausforderungen in

## 6 Diskussion

der Vergleichbarkeit von Nachhaltigkeitsbewertungen (siehe Kap. 6.3) lösen können. Jeder einzelne Lösungsansatz bringt alleine ein großes Potential mit sich, um eine Standardisierung zu ermöglichen. Nur in der Gesamtheit der hier präsentierten Ansätze kann allerdings eine tiefgreifende Verbesserung der Vergleichbarkeit erreicht werden. Zusammengefasst müssen daher die folgenden Punkte umgesetzt werden, um Nachhaltigkeitsbewertungen überhaupt erst vergleichbar zu machen:

- Zugänglichkeit der Eingangsdaten und LCIs (öffentlich einsehbar)
- Gleiche Modellierung und Berechnung
- Einheitliche globale Datenbank
- Standardisierte LCAs und LCIs für bestimmte Produktgruppen
- Gleiches Grundset an betrachteten Werkstoffen innerhalb der LCAs
- Anpassung der aktuellen Normen und Gesetze auf ein Produktgruppendenken

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

Eine Verbesserung der Nachhaltigkeit in verschiedensten Bereichen, um die Klimaauswirkungen abzumildern, stellt eine der größten Herausforderungen in den kommenden Jahrzehnten dar. Die Probleme, die zu den Klimaauswirkungen führen, sind dabei ebenso vielfältig wie durch eine steigende Bevölkerungszahl, steigenden Konsum von Produkten und damit verbunden steigendem Abfallaufkommen [Forti et al., 2020]. Aufgrund dieser Probleme kam es zu einem außerordentlichen Anstieg der CO<sub>2</sub>-Konzentration in der Luft, was wiederum zum Klimawandel führt [Mann, 2021]. Durch die erfolgte und weiter voranschreitende Industrialisierung haben Produkte und deren Konsum einen großen Einfluss darauf, den Klimawandel zu beeinflussen [McNeill, 2000].

Für mögliche Lösungen und eine Verbesserung der Nachhaltigkeit wurden verschiedene Wirtschaftsmodelle präsentiert und analysiert, wie z.B. die Kreislaufwirtschaft, Cradle-to-Cradle oder Circular Design. Die zugrundeliegenden Anforderungen, um diese nachhaltigen Wirtschaftssysteme zu ermöglichen, sind dabei die R-Systeme, mithilfe derer Produkte oder Produktteile in Kreisläufen zirkulieren können [Potting et al., 2017]. Dabei wurde darauf eingegangen, dass gerade diese Zirkularität ein wichtiger Aspekt im Lebenszyklus von Produkten ist, da diese oft kurzlebig durch eine funktionelle, qualitative oder psychologische Obsoleszenz bzw. Kombinationen daraus sind [Packard, 1960]. Mit den Grundlagen aus verschiedenen Wirtschaftsmodellen sowie Ansätzen für nachhaltige Produktgestaltung wurde der aktuell vorliegende rechtliche Rahmen dazu analysiert. Dabei wurden für die Produktentwicklung Gesetze bzw. Richtlinien untersucht, wie z.B. die frühere Ökodesignrichtlinie 2009/125/EG, die mittlerweile durch die EU-2024/1781 ESPR ersetzt worden ist [European Union, 2009, European Commission, 2024]. Dabei wurde die Betrachtung nicht nur auf die aktuellen Änderungen der Ökodesignrichtlinie begrenzt, sondern auch weitere relevante gesetzliche Regulierungen und Arbeitspläne wie bspw. Richtlinien zu Abfällen, wie die 2008/98/EG und deren jüngste Ände-

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

rungen oder der Aktionsplan „Fit for 55“ und das Europäische Klimagesetz EU-2021/1119 wurden für einen umfassenden Blick auf den aktuellen Stand der Nachhaltigkeit sowie Vorgaben dazu analysiert [European Commission, 2023a, Europäischer Rat, 2023, Europäisches Parlament, 2021]. Mithilfe dieser gesetzlichen Normen wie auch aktuell eingesetzten Standards für die Nachhaltigkeitsbewertung, wie der DIN EN ISO 14040, DIN EN ISO 14044, DIN EN ISO 14067, dem ergänzenden ILCD Handbuch oder den GRI-Standards, wurde die Thematik der Ökobilanzierung umfassend analysiert und beschrieben [DIN e. V., 2021a, DIN e. V., 2021b, DIN e. V., 2019, European Commission, 2010, GRI, 2024a]. Ausgehend von diesen Normen wurden Lebenszyklusanalysen von Produkten betrachtet, welche angewendet werden, um die Nachhaltigkeit eines Produktes zu beschreiben. So wurden in vielen Veröffentlichungen von Herstellern oder aus wissenschaftlichen Quellen LCAs ermittelt, die auch dazu eingesetzt werden die berechnete Umweltauswirkung des Produktes als besonders Merkmal der Nachhaltigkeit zu bewerben, wie z.B. zu sehen bei Proske et al., Welter und Fink, Trek Bicycle, Apple, Riese & Müller und vielen weiteren [Proske et al., 2020, Welter und Fink, 2024, Trek Bicycle, 2024, Apple, 2025, Riese & Müller, 2025]. Dabei konnte die Outputgröße des GWPs als eine der wichtigsten identifiziert werden, die für ein Produkt oder Prozess ein Äquivalent des dabei emittierten CO<sub>2</sub>s in Kilogramm angibt [Team et al., 2023]. Die Angaben des GWPs werden dann in den beispielsweise zuvor genannten Veröffentlichungen verwendet, um Produkte im Sinne ihrer Nachhaltigkeit einzustufen und zu bewerten.

Bei näherer Betrachtung der Inputs und Outputs aus den Ökobilanzierungen wurden die Forschungsfrage und die Hypothesen dieser Arbeit abgeleitet, da die Berechnungen oft in sehr unterschiedlichen Ausprägungen durchgeführt werden und dabei Unstimmigkeiten in der Ausführung aufgedeckt werden konnten. So ist die Untersuchung der Vergleichbarkeit dieser Ökobilanzen zum einen innerhalb bestimmter Produktgruppen, zum anderen aber auch über Produktgruppen hinweg zentral, um die aufgestellte Forschungsfrage beantworten zu können. Zur Bewertung dieser Hypothesen wurde eine umfassende Datenbasis aufgebaut. Die Wahl der betrachteten Produktgruppen erfolgte dabei anhand von entwickelten Merkmalen, wie der Menge an ausgestoßenem CO<sub>2</sub>, dem Wachstum von Verkaufszahlen oder Abfallaufkommen oder auch existierenden und neugeschaffenen Regulierungen bestimmter Produktgruppen. Dabei wurden die Produktgruppen Smartphones, Notebooks, Waschmaschinen, Kühlschränke, PKW, Pedelecs und Fahrräder als relevant ermit-

telt und wiederum in drei übergeordnete Hauptgruppen eingeteilt, um eine genauere Vergleichbarkeit zu ermöglichen. Für die definierten Produktgruppen wurden zehn Hauptmerkmale ermittelt und ausgewählt, um die Nachhaltigkeit eines Produktes beschreiben und untersuchen zu können.

Die erzeugte Datenbasis wurde anhand der 15 Informationsqualitäts-Dimensionen nach Hildebrand et al. positiv bewertet und daher für die Analyse benutzt [Hildebrand et al., 2025]. Dabei gehen die Hauptmerkmale unter anderem auf die stoffliche Zusammensetzung, die Nutzungsdauer, die Lebenszyklusanalyse in verschiedenen Vorgehensweisen, den Life Cycle Inventorys, End-of-Life-Strategien oder auch auf verwendete kritische Rohstoffe ein. Die so aufgebaute umfangreiche Datenbasis bietet die Möglichkeit, verschiedene Hauptgruppen mit darin enthaltenen Produktgruppen auf vielfältige Hauptmerkmale sowie dazu zugehöriger Untermerkmale zu analysieren. Um die Forschungsfrage mithilfe der geschaffenen Datenbasis zu beantworten, wurde ein deskriptiver Vergleich der Daten durchgeführt. Dabei konnte größtenteils eine hohe Unschärfe und eine schlechte Vergleichbarkeit der Daten festgestellt werden. Bei den LCAs nach Phasen ist eine Aufteilung der Produktgruppen in langlebige und kurzlebige Produkte innerhalb der analysierten Datenbasis zu beobachten. Dies äußert sich durch einen hohen Anteil am gesamten, emittierten CO<sub>2</sub> in der Produktionsphase und einem geringen Anteil in der Nutzungsphase für kurzlebige Produkte. Bei langlebigen Produkten kehren sich diese Anteile um.

Für die Validierung oder Falsifizierung der Ergebnisse des deskriptiven Vergleichs wurde nach geeigneten Verfahren gesucht, um Ähnlichkeiten innerhalb der Datenbasis zu ermitteln. Dabei wurde die Clusteranalyse als geeignetes Verfahren identifiziert und angewendet. Diese konnte die Erkenntnisse zu kurzlebigen und langlebigen Produkten aus dem deskriptiven Vergleich belegen, mit der weiteren Erkenntnis, dass diese Ausprägungen auch schon in der Gestaltung der Szenarios für die Life Cycle Inventorys zu finden sind. Alle weiteren Clusteranalysen ergaben keine signifikante Gruppierbarkeit der Daten und haben somit die eingangs aufgestellte Forschungsfrage sowie die Hypothesen bestätigt. Die Gründe für diese Nicht-Vergleichbarkeit sind dabei starke Unterschiede in der Ausprägung der LCIs, dem betrachteten Scope und maßgeblich die Varianz in den ausgewählten verwendeten Datenbanken sowie der Modellierungsgrundlage der Datensets. Die aktuellen Vorgehensweisen für Ökobilanzierungen können daher nicht als eine Grundlage gesehen werden, Nachhaltigkeit von Produkten innerhalb von Produktgruppen oder auch über Produktgruppen hin-

## 7 Zusammenfassung und Ausblick

weg zu vergleichen. Somit sind die von Herstellern veröffentlichten Ergebnisse von kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten nicht für die Wahl eines nachhaltigeren Produktes relevant und können Verbraucher wie auch Gesetzgeber in der Wahl ihrer Entscheidungen in die Irre führen. Aktuelle Normen für die Berechnung von Ökobilanzen müssen daher überarbeitet und angepasst werden, um durch eine Spezifizierung von bestimmten Produktgruppen sowie weiteren grundlegenden Anforderungen die generierten Outputdaten vergleichbar zu machen.

Das aktuelle Vorgehen für die Erstellung von Lebenszyklusanalysen bietet noch viele Potentiale, um diese zu verbessern und eine bessere Bewertung der Nachhaltigkeit von Produkten zu ermöglichen. Essentiell dabei ist die konsequente Standardisierung der angewendeten Normen in Bezug auf einzelne Produktgruppen, so wie es bei diversen Richtlinien der EU heute schon der Fall ist. Dazu gehört auch eine transparente Offenlegung der verwendeten Daten für die Life Cycle Inventorys, die die Berechnungsgrundlage der Ökobilanz darstellen. Dabei muss ein Weg gefunden werden, Angaben zu den LCIs herauszugeben ohne dabei grundlegende Firmengeheimnisse zu veröffentlichen. Dafür könnten bspw. weitere Vereinheitlichungen in Gruppen gebildet werden, um einzelne Daten zu schützen oder die Verwendung bestimmter Software bzw. der Einsatz von Prüfsummen, die die Vollständigkeit der Daten verifizieren können. Generell wäre der Einsatz einer definierten Datenbank sowie einer Software für die Erstellung von Ökobilanzen ein enormer Gewinn, im Hinblick auf die Vergleichbarkeit der erzeugten Analysen. Dies stellt ein großes Vorhaben dar, bei dem verschiedene Nationen und Wissenschaftler sowie Firmen miteinander kooperieren müssen, um diese globale Datenbasis zu erstellen und zu pflegen. Daher ist dieses Vorhaben als globales Projekt zu sehen, was genauso wie der Klimaschutz nicht nur im eigenen Land bzw. dem eigenen Unternehmen stattfinden kann.

Auch die weitere Standardisierung aktueller Normen hin zu mehr produktgruppenbezogenen Berechnungen, ist eine Aufgabe, die ein größeres Konsortium, wie z.B. die Europäische Kommission, benötigt. Diese Verbesserungen im Bereich der Nachhaltigkeitsbewertung bieten nicht nur Verbrauchern und Gesetzgebern Vorteile, auch Unternehmen profitieren durch mehr Transparenz und können ihre Produktentwicklung besser bewerten sowie erzeugte Produkte besser als nachhaltig bewerben. Durch die in dieser Arbeit gemachten Erkenntnisse und die Umsetzung dieser, kann ein weiterer wichtiger Schritt für eine nachhaltigere Gesellschaft gemacht werden, die das Leben auch für zukünftige Generationen auf diesem Planeten ermöglicht.

# A Anhang

## A.1 Datenbasis

**A.1.1 Stoffliche Zusammensetzung (Prozentual gewichtet)****Smartphones und Notebooks (Teil 1)**

| Metall | [Bookhagen et al., 2020] | [Buchert, 2012] | [Manhart et al., 2016] | [Trinh et al., 2023],<br>[Deng et al., 2011] | [Prakash et al., 2012] | $\bar{x}$ | s       |
|--------|--------------------------|-----------------|------------------------|----------------------------------------------|------------------------|-----------|---------|
| Fe     | 14,2861                  | 0,0000          | 0,5500                 | 23,0464                                      | 22,8570                | 12,1479   | 11,4031 |
| Si     | 8,1984                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 1,1600                 | 1,8717    | 3,5722  |
| Mg     | 6,5412                   | 0,0000          | 3,4623                 | 0,0000                                       | 5,6610                 | 3,1329    | 3,0719  |
| Al     | 6,0179                   | 0,0000          | 13,8616                | 13,5474                                      | 2,4834                 | 7,1821    | 6,3275  |
| Cu     | 5,9046                   | 0,0000          | 9,4494                 | 7,1441                                       | 5,3696                 | 5,5735    | 3,4894  |
| Ni     | 2,3374                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0262                                       | 0,1100                 | 0,4947    | 1,0311  |
| Cr     | 1,8315                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,3663    | 0,8191  |
| Sn     | 0,5669                   | 0,0000          | 0,7562                 | 0,2461                                       | 0,6116                 | 0,4362    | 0,3069  |
| Zn     | 0,5669                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0026                                       | 0,1290                 | 0,1397    | 0,2452  |
| Sr     | 0,3925                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,0785    | 0,1755  |
| Ba     | 0,3140                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,0628    | 0,1404  |
| REE    | 0,2704                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,0541    | 0,1209  |
| W      | 0,2093                   | 0,0000          | 0,2750                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,0969    | 0,1346  |
| Mn     | 0,1657                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,0331    | 0,0741  |
| Ti     | 0,1047                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,0209    | 0,0468  |
| Co     | 0,0454                   | 4,4057          | 3,3623                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 1,5627    | 2,1510  |
| Ta     | 0,0366                   | 0,0000          | 0,0125                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,0098    | 0,0159  |
| Mo     | 0,0331                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,0066    | 0,0148  |
| Zr     | 0,0331                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,0066    | 0,0148  |
| Au     | 0,0148                   | 0,0210          | 0,0187                 | 0,0095                                       | 0,0042                 | 0,0137    | 0,0068  |
| Ag     | 0,0000                   | 0,2133          | 0,1937                 | 0,0370                                       | 0,0181                 | 0,0924    | 0,1025  |
| Pd     | 0,0000                   | 0,0077          | 0,0062                 | 0,0016                                       | 0,0015                 | 0,0034    | 0,0034  |
| Nd     | 0,0000                   | 0,0350          | 0,0312                 | 0,0005                                       | 0,0000                 | 0,0133    | 0,0181  |
| Pr     | 0,0000                   | 0,0070          | 0,0062                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,0026    | 0,0036  |
| In     | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0062                 | 0,0000                                       | 2,9233                 | 0,5859    | 1,3066  |
| Pb     | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,1614                                       | 0,1833                 | 0,0689    | 0,0947  |
| Sb     | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,0223                 | 0,0045    | 0,0100  |

## Smartphones und Notebooks (Teil 2)

| Kunststoff         | [Bookhagen et al., 2020] | [Buchert, 2012] | [Manhart et al., 2016] | [Trinh et al., 2023],<br>[Deng et al., 2011] | [Prakash et al., 2012] | $\bar{x}$ | s       |
|--------------------|--------------------------|-----------------|------------------------|----------------------------------------------|------------------------|-----------|---------|
| ABS                | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 9,8695                                       | 6,5890                 | 3,2917    | 4,6542  |
| PC                 | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 10,7426                                      | 12,3893                | 4,6264    | 6,3616  |
| (LD)PE             | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 2,9600                 | 0,5920    | 1,3237  |
| PP                 | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,6533                 | 0,1307    | 0,2922  |
| PS                 | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,1392                 | 0,0278    | 0,0623  |
| EPS                | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 2,3201                 | 0,4640    | 1,0376  |
| PVC                | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 1,3011                 | 0,2602    | 0,5819  |
| PA 6               | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 13,0389                | 2,6078    | 5,8312  |
| PMMA               | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 1,6705                 | 0,3341    | 0,7471  |
| EPDM               | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,0000    | 0,0000  |
| POM                | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 0,0000                                       | 0,0000                 | 0,0000    | 0,0000  |
| Epoxy              | 0,0000                   | 0,0000          | 0,0000                 | 6,4562                                       | 0,6069                 | 1,4126    | 2,8317  |
| Andere Kunststoffe | 18,0887                  | 0,0000          | 5,9559                 | 9,0757                                       | 0,0000                 | 6,6241    | 7,5109  |
| Andere             | 0,0000                   | 95,3104         | 62,0524                | 11,6952                                      | 0,0000                 | 33,8116   | 42,8813 |
| Glas               | 34,0407                  | 0,0000          | 0,0000                 | 7,9379                                       | 16,7974                | 11,7552   | 14,2566 |

## Weißwaren (Teil 1)

| Metall | [Rüdenauer et al., 2007] | [VDI, 2022] | [Xiao et al., 2015] | $\bar{x}$ | $s$     |
|--------|--------------------------|-------------|---------------------|-----------|---------|
| Fe     | 38,2632                  | 32,2928     | 66,7385             | 45,7648   | 18,4074 |
| Si     | 0,5285                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,1762    | 0,3051  |
| Mg     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| Al     | 6,7179                   | 0,0000      | 4,5528              | 3,7569    | 3,4290  |
| Cu     | 1,8152                   | 0,0000      | 2,7201              | 1,5118    | 1,3852  |
| Ni     | 0,0501                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0167    | 0,0289  |
| Cr     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| Sn     | 0,1307                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0436    | 0,0755  |
| Zn     | 0,0669                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0223    | 0,0386  |
| Sr     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| Ba     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| REE    | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| W      | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| Mn     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| Ti     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| Co     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| Ta     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| Mo     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| Zr     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| Au     | 0,0019                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0006    | 0,0011  |
| Ag     | 0,0083                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0028    | 0,0048  |
| Pd     | 0,0007                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0002    | 0,0004  |
| Nd     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| Pr     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| In     | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| Pb     | 0,0835                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0278    | 0,0482  |
| Sb     | 0,0102                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0034    | 0,0059  |

## Weißwaren (Teil 2)

| Kunststoff         | [Rüdenauer et al., 2007] | [VDI, 2022] | [Xiao et al., 2015] | $\bar{x}$ | s       |
|--------------------|--------------------------|-------------|---------------------|-----------|---------|
| ABS                | 2,2685                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,7562    | 1,3097  |
| PC                 | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| (LD)PE             | 0,4469                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,1490    | 0,2580  |
| PP                 | 1,5129                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,5043    | 0,8735  |
| PS                 | 0,0000                   | 0,0000      | 21,2577             | 7,0859    | 12,2731 |
| EPS                | 0,0000                   | 0,0000      | 3,5294              | 1,1765    | 2,0377  |
| PVC                | 0,1066                   | 0,0000      | 0,9705              | 0,3590    | 0,5322  |
| PA 6               | 0,0797                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0266    | 0,0460  |
| PMMA               | 0,0000                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0000    | 0,0000  |
| EPDM               | 3,6553                   | 0,0000      | 0,0000              | 1,2184    | 2,1104  |
| POM                | 0,0601                   | 0,0000      | 0,0000              | 0,0200    | 0,0347  |
| Epoxy              | 0,2131                   | 0,0000      | 0,2311              | 0,1481    | 0,1285  |
| Andere Kunststoffe | 3,6553                   | 66,0926     | 0,0000              | 23,2493   | 37,1484 |
| Andere             | 38,2548                  | 0,0000      | 0,0000              | 12,7516   | 22,0864 |
| Glas               | 2,0698                   | 1,6146      | 0,0000              | 1,2282    | 1,0877  |

## A Anhang

### Fahrzeuge (Teil 1)

| Metall | [Danilecki et al., 2017] |         |         | [Mottschall, 2012],<br>[Del Duce, 2011] |         | [Mottschall, 2012] |         | $\bar{x}$ | s       |
|--------|--------------------------|---------|---------|-----------------------------------------|---------|--------------------|---------|-----------|---------|
| Fe     | 78,8400                  | 73,5938 | 70,0155 | 20,1257                                 | 48,8464 | 23,5294            | 58,8235 | 53,3963   | 23,7369 |
| Si     | 0,5303                   | 0,5788  | 0,5512  | 3,2475                                  | 3,2475  | 0,0000             | 0,0000  | 1,1650    | 1,4440  |
| Mg     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Al     | 7,0189                   | 8,6472  | 9,4259  | 41,7686                                 | 13,0479 | 50,0000            | 14,7059 | 20,6592   | 17,5898 |
| Cu     | 2,1407                   | 3,0539  | 3,2891  | 5,2901                                  | 5,2901  | 0,0000             | 0,0000  | 2,7234    | 2,1901  |
| Ni     | 0,0503                   | 0,0549  | 0,0523  | 0,3079                                  | 0,3079  | 0,0000             | 0,0000  | 0,1105    | 0,1369  |
| Cr     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Sn     | 0,1311                   | 0,1431  | 0,1363  | 0,8031                                  | 0,8031  | 0,0000             | 0,0000  | 0,2881    | 0,3571  |
| Zn     | 0,0590                   | 0,0643  | 0,0613  | 0,3611                                  | 0,3611  | 0,0000             | 0,0000  | 0,1295    | 0,1606  |
| Sr     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Ba     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| REE    | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| W      | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Mn     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Ti     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Co     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Ta     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Mo     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Zr     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Au     | 0,0019                   | 0,0021  | 0,0020  | 0,0119                                  | 0,0119  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0043    | 0,0053  |
| Ag     | 0,0084                   | 0,0091  | 0,0087  | 0,0512                                  | 0,0512  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0184    | 0,0228  |
| Pd     | 0,0007                   | 0,0007  | 0,0007  | 0,0041                                  | 0,0041  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0015    | 0,0018  |
| Nd     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Pr     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| In     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Pb     | 0,1254                   | 0,1815  | 0,1725  | 0,5130                                  | 0,5130  | 0,0000             | 0,0000  | 0,2150    | 0,2164  |
| Sb     | 0,0000                   | 0,0000  | 0,0000  | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |

## Fahrzeuge (Teil 2)

| Kunststoff         | [Danilecki et al., 2017] |        |        | [Mottschall, 2012],<br>[Del Duce, 2011] |         | [Mottschall, 2012] |         | $\bar{x}$ | s       |
|--------------------|--------------------------|--------|--------|-----------------------------------------|---------|--------------------|---------|-----------|---------|
| ABS                | 1,5128                   | 2,0411 | 2,3913 | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,8493    | 1,0896  |
| PC                 | 0,0000                   | 0,0000 | 0,0095 | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0014    | 0,0036  |
| (LD)PE             | 0,5382                   | 0,0000 | 1,6132 | 2,7012                                  | 2,7012  | 0,0000             | 0,0000  | 1,0791    | 1,2472  |
| PP                 | 3,2811                   | 4,7058 | 5,1756 | 1,3097                                  | 1,3097  | 0,0000             | 0,0000  | 2,2545    | 2,1427  |
| PS                 | 0,4441                   | 0,7504 | 0,7117 | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,2723    | 0,3530  |
| EPS                | 0,0000                   | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| PVC                | 0,1069                   | 0,2868 | 0,2819 | 0,6548                                  | 0,6548  | 0,0000             | 0,0000  | 0,2836    | 0,2792  |
| PA 6               | 0,6662                   | 0,9605 | 1,0533 | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,3829    | 0,4916  |
| PMMA               | 0,0694                   | 0,1801 | 0,0000 | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0356    | 0,0687  |
| EPDM               | 0,0000                   | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| POM                | 0,0000                   | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Epoxy              | 0,2138                   | 0,2334 | 0,0000 | 1,3097                                  | 1,3097  | 0,0000             | 0,0000  | 0,4381    | 0,6038  |
| Andere Kunststoffe | 0,8605                   | 1,0506 | 1,1672 | 21,5405                                 | 21,5405 | 26,4706            | 26,4706 | 14,1572   | 12,4472 |
| Andere             | 0,0000                   | 0,0000 | 0,0000 | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 0,0000    | 0,0000  |
| Glas               | 3,4004                   | 3,4619 | 3,8811 | 0,0000                                  | 0,0000  | 0,0000             | 0,0000  | 1,5348    | 1,9201  |

### A.1.2 Absatzzahlen (Absolut gewichtet)

#### Smartphones und Notebooks

| Jahr | Smartphones<br>[Bitkom, 2025] | Notebooks<br>[gfu, 2025] | $\bar{x}$ | s           |
|------|-------------------------------|--------------------------|-----------|-------------|
| 2005 |                               | 1945000                  | 1945000   |             |
| 2006 |                               | 2280000                  | 2280000   |             |
| 2007 |                               | 3010000                  | 3010000   |             |
| 2008 |                               | 4433000                  | 4433000   |             |
| 2009 | 5100000                       | 6322000                  | 5711000   | 864084,49   |
| 2010 | 10400000                      | 6661000                  | 8530500   | 2643872,25  |
| 2011 | 15900000                      | 7123000                  | 11511500  | 6206276,22  |
| 2012 | 21600000                      | 5688000                  | 13644000  | 11251483,10 |
| 2013 | 22900000                      | 5013000                  | 13956500  | 12648019,00 |
| 2014 | 24400000                      | 5436000                  | 14918000  | 13409573,00 |
| 2015 | 26200000                      | 5155000                  | 15677500  | 14881062,20 |
| 2016 | 24200000                      | 4756000                  | 14478000  | 13748984,30 |
| 2017 | 22900000                      | 4231000                  | 13565500  | 13200976,50 |
| 2018 | 22800000                      | 3962000                  | 13381000  | 13320477,50 |
| 2019 | 22100000                      | 3945000                  | 13022500  | 12837523,60 |
| 2020 | 22000000                      | 4887000                  | 13443500  | 12100718,30 |
| 2021 | 22200000                      | 4286000                  | 13243000  | 12667110,90 |
| 2022 | 21000000                      | 3902000                  | 12451000  | 12090111,70 |
| 2023 | 20300000                      | 2899000                  | 11599500  | 12304365,10 |
| 2024 | 20000000                      | 2684000                  | 11342000  | 12244261,00 |

**Weißwaren**

| Jahr | Waschmaschinen<br>[ZVEI, 2024b] | Kühlschränke<br>[ZVEI, 2024a] | $\bar{x}$ | $s$       |
|------|---------------------------------|-------------------------------|-----------|-----------|
| 2014 | 3000000                         | 3250000                       | 3125000   | 176776,70 |
| 2015 | 3150000                         | 3450000                       | 3300000   | 212132,03 |
| 2016 | 3300000                         | 3450000                       | 3375000   | 106066,02 |
| 2017 | 3250000                         | 3400000                       | 3325000   | 106066,02 |
| 2018 | 3250000                         | 3450000                       | 3350000   | 141421,36 |
| 2020 | 3300000                         | 3650000                       | 3475000   | 247487,37 |
| 2021 | 3350000                         | 3850000                       | 3600000   | 353553,39 |
| 2022 | 3150000                         | 3650000                       | 3400000   | 353553,39 |
| 2023 | 3000000                         | 3300000                       | 3150000   | 212132,03 |

## A Anhang

### Fahrzeuge

| Jahr | PKW<br>[VDA, 2024] | Pedelecs<br>[ZIV, 2025a] | Fahrräder<br>[ZIV, 2025b] | $\bar{x}$  | s          |
|------|--------------------|--------------------------|---------------------------|------------|------------|
| 2005 | 3340000            |                          | 4750000                   | 4045000    | 997020,56  |
| 2006 |                    |                          | 4430000                   | 4430000    |            |
| 2007 |                    |                          | 4600000                   | 4600000    |            |
| 2008 |                    |                          | 4350000                   | 4350000    |            |
| 2009 |                    | 150000                   | 4050000                   | 2100000    | 2757716,45 |
| 2010 | 2920000            | 200000                   | 4010000                   | 2376666,67 | 1962252,11 |
| 2011 | 3170000            | 330000                   | 4100000                   | 2533333,33 | 1963984,05 |
| 2012 | 3080000            | 380000                   | 3950000                   | 2470000    | 1861531,63 |
| 2013 | 2950000            | 410000                   | 3800000                   | 2386666,67 | 1763812,16 |
| 2014 | 3040000            | 480000                   | 4100000                   | 2540000    | 1861074,96 |
| 2015 | 3210000            | 540000                   | 4360000                   | 2703333,33 | 1959753,39 |
| 2016 | 3350000            | 610000                   | 4060000                   | 2673333,33 | 1821821,43 |
| 2017 | 3440000            | 720000                   | 3850000                   | 2670000    | 1701146,67 |
| 2018 | 3440000            | 980000                   | 4180000                   | 2866666,67 | 1675271,12 |
| 2019 | 3610000            | 1360000                  | 4310000                   | 3093333,33 | 1541373,85 |
| 2020 | 2920000            | 1950000                  | 5040000                   | 3303333,33 | 1580263,69 |
| 2021 | 2620000            | 2000000                  | 4700000                   | 2985533    | 1179879,52 |
| 2022 | 2700000            | 2200000                  | 4600000                   | 3037839,25 | 1065492,80 |
| 2023 | 2840000            | 2100000                  | 4000000                   | 2946152,25 | 784888,11  |
| 2024 | 2820000            | 2100000                  | 3900000                   | 2909332,75 | 742268,09  |

### A.1.3 Nutzungsdauer (Mittlere Nutzungsdauer (Jahre))

|                | Quelle                        | Besonderheit | Nutzungs-<br>dauer |
|----------------|-------------------------------|--------------|--------------------|
| Smartphones    | [Wieser und Troeger, 2015]    |              | 2,70               |
|                | [Rüdenauer und Prakash, 2020] |              | 2,50               |
| Notebooks      | [Wang et al., 2013]           | 2000         | 4,30               |
|                |                               | 2005         | 4,10               |
|                | [Prakash et al., 2016b]       |              | 4,90               |
| $\bar{x}$      |                               |              | <b>3,70</b>        |
| s              |                               |              | <b>0,94</b>        |
| Waschmaschinen | [Wang et al., 2013]           | 1995         | 14,60              |
|                |                               | 2005         | 13,90              |
| Kühlschränke   | [Rüdenauer et al., 2007]      |              | 14,00              |
|                | [Huisman et al., 2012]        |              | 20,00              |
|                | [Gutiérrez et al., 2011]      |              | 11,00              |
| $\bar{x}$      |                               |              | <b>14,70</b>       |
| s              |                               |              | <b>3,28</b>        |
| PKW            | [KBA, 2024]                   | Ab 2000      | 9,12               |
| Pedelecs       | [Rüdenauer und Prakash, 2020] | Discounter   | 4,00               |
|                |                               | Marken       | 10,00              |
|                | [Chang et al., 2012]          |              | 7,50               |
| $\bar{x}$      |                               |              | <b>7,66</b>        |
| s              |                               |              | <b>2,65</b>        |

## A.1.4 LCAs nach Phasen

### Smartphones (Teil 1)

| Quelle                   | Besonderheit | Einheit                 | Rohmaterial-<br>beschaffung | Produktion | Transport |
|--------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------|------------|-----------|
| [Sánchez et al., 2022]   |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 35,05      | 2,34      |
|                          |              | Prozent                 | 0,00                        | 75,00      | 5,00      |
| [Cordella et al., 2021a] |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 48,00                       | 12,00      | 8,70      |
|                          |              | Prozent                 | 65,22                       | 16,30      | 11,82     |
| [Ercan et al., 2016]     |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 1,90                        | 0,00       | 47,90     |
|                          |              | Prozent                 | 3,35                        | 0,00       | 84,48     |
| [Proske et al., 2020]    |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 32,26      | 0,68      |
|                          |              | Prozent                 | 0,00                        | 0,75       | 0,02      |
| [Apple, 2025]            | iPhone 4     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 25,65      | 3,60      |
|                          |              | Prozent                 | 0,00                        | 57,00      | 8,00      |
|                          | iPhone 6     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 80,75      | 2,85      |
|                          |              | Prozent                 | 0,00                        | 85,00      | 3,00      |
|                          | iPhone 8     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 45,60      | 1,71      |
|                          |              | Prozent                 | 0,00                        | 80,00      | 3,00      |
|                          | iPhone X     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 63,20      | 1,58      |
|                          |              | Prozent                 | 0,00                        | 80,00      | 2,00      |
|                          | iPhone 12    | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 58,10      | 1,40      |
|                          |              | Prozent                 | 0,00                        | 83,00      | 2,00      |
|                          | iPhone 14    | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 48,19      | 1,22      |
|                          |              | Prozent                 | 0,00                        | 79,00      | 2,00      |
|                          | iPhone 16    | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 44,80      | 1,68      |
|                          |              | Prozent                 | 0,00                        | 80,00      | 3,00      |

## Smartphones (Teil 2)

| Quelle                   | Besonderheit | Einheit                 | Nutzung | EOL   | Summe  |
|--------------------------|--------------|-------------------------|---------|-------|--------|
| [Sánchez et al., 2022]   |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 7,48    | -1,87 | 43,00  |
|                          |              | Prozent                 | 16,00   | -4,00 | 92,00  |
| [Cordella et al., 2021a] |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 8,50    | -3,60 | 73,60  |
|                          |              | Prozent                 | 11,55   | -4,89 | 100,00 |
| [Ercan et al., 2016]     |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 7,20    | -0,30 | 56,70  |
|                          |              | Prozent                 | 12,70   | -0,53 | 100,00 |
| [Proske et al., 2020]    |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 8,34    | -1,78 | 39,50  |
|                          |              | Prozent                 | 0,19    | -0,04 | 0,92   |
| [Apple, 2025]            | iPhone 4     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 15,30   | 0,45  | 45,00  |
|                          |              | Prozent                 | 34,00   | 1,00  | 100,00 |
|                          | iPhone 6     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 10,45   | 0,95  | 95,00  |
|                          |              | Prozent                 | 11,00   | 1,00  | 100,00 |
|                          | iPhone 8     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 9,12    | 0,57  | 57,00  |
|                          |              | Prozent                 | 16,00   | 1,00  | 100,00 |
|                          | iPhone X     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 13,43   | 0,79  | 79,00  |
|                          |              | Prozent                 | 17,00   | 1,00  | 100,00 |
|                          | iPhone 12    | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 9,80    | 0,70  | 70,00  |
|                          |              | Prozent                 | 14,00   | 1,00  | 100,00 |
|                          | iPhone 14    | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 10,98   | 0,61  | 61,00  |
|                          |              | Prozent                 | 18,00   | 1,00  | 100,00 |
|                          | iPhone 16    | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 10,08   | 0,56  | 56,00  |
|                          |              | Prozent                 | 18,00   | 1,00  | 102,00 |

## A Anhang

### Notebooks (Teil 1)

| Quelle                      | Besonderheit                        | Einheit                 | Rohmaterial-<br>beschaffung | Produktion | Transport |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------|-----------|
| [Prakash et al., 2016b]     | Notebook,<br>langlebig              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 405,00     | 84,00     |
|                             |                                     | Prozent                 | 0,00                        | 44,95      | 9,32      |
|                             | Notebook,<br>kurzlebig              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 696,00     | 128,00    |
|                             |                                     | Prozent                 | 0,00                        | 56,68      | 10,42     |
| [Prakash et al., 2016a]     |                                     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 1152,96    | 33,70     |
|                             |                                     | Prozent                 | 0,00                        | 84,03      | 2,46      |
| [O'Connell und Stutz, 2010] | US                                  | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 154,12     | 53,44     |
|                             |                                     | Prozent                 | 0,00                        | 44,73      | 15,51     |
|                             | EU                                  | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 157,14     | 39,33     |
|                             |                                     | Prozent                 | 0,00                        | 49,84      | 12,47     |
|                             | China                               | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 155,13     | 0,00      |
|                             |                                     | Prozent                 | 0,00                        | 42,07      | 0,00      |
| [Prakash et al., 2012]      | EuP Lot3                            | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 81,00      | 11,40     |
|                             |                                     | Prozent                 | 0,00                        | 35,22      | 4,96      |
|                             | EcoInvent2.2                        | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 195,80     | 28,80     |
|                             |                                     | Prozent                 | 0,00                        | 54,09      | 7,96      |
|                             | UBA-FuE Vorhaben<br>+ EcoInvent 2.2 | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 214,20     | 30,40     |
|                             |                                     | Prozent                 | 0,00                        | 56,07      | 7,96      |

## Notebooks (Teil 2)

| Quelle                      | Besonderheit                        | Einheit                 | Nutzung | EOL    | Summe   |
|-----------------------------|-------------------------------------|-------------------------|---------|--------|---------|
| [Prakash et al., 2016b]     | Notebook,<br>langlebig              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 404,00  | 8,00   | 901,00  |
|                             |                                     | Prozent                 | 44,84   | 0,89   | 100,00  |
|                             | Notebook,<br>kurzlebig              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 391,00  | 13,00  | 1228,00 |
|                             |                                     | Prozent                 | 31,84   | 1,06   | 100,00  |
| [Prakash et al., 2016a]     |                                     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 198,82  | -13,90 | 1372,00 |
|                             |                                     | Prozent                 | 14,49   | -1,01  | 99,97   |
| [O'Connell und Stutz, 2010] | US                                  | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 166,39  | -29,41 | 344,54  |
|                             |                                     | Prozent                 | 48,29   | -8,54  | 100,00  |
|                             | EU                                  | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 149,24  | -30,42 | 315,29  |
|                             |                                     | Prozent                 | 47,33   | -9,65  | 100,00  |
|                             | China                               | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 243,02  | -29,41 | 368,74  |
|                             |                                     | Prozent                 | 65,91   | -7,98  | 100,00  |
| [Prakash et al., 2012]      | EuP Lot3                            | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 138,50  | -1,00  | 230,00  |
|                             |                                     | Prozent                 | 60,22   | -0,43  | 99,96   |
|                             | EcoInvent2.2                        | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 138,50  | -1,05  | 362,00  |
|                             |                                     | Prozent                 | 38,26   | -0,29  | 100,00  |
|                             | UBA-FuE Vorhaben<br>+ EcoInvent 2.2 | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 138,50  | -1,17  | 382,00  |
|                             |                                     | Prozent                 | 36,26   | -0,31  | 99,98   |

## A Anhang

### Weißwaren (Teil 1)

| Quelle                        | Besonderheit | Einheit                 | Rohmaterial-<br>beschaffung | Produktion | Transport |
|-------------------------------|--------------|-------------------------|-----------------------------|------------|-----------|
| <b>Waschmaschinen</b>         |              |                         |                             |            |           |
| [Gensch und Blepp, 2015]      |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 32,00                       | 2,00       | 1,00      |
|                               |              | Prozent                 | 22,22                       | 1,39       | 0,69      |
| [Rüdenauer et al., 2007]      |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 285,00                      | 27,00      | 2,00      |
|                               |              | Prozent                 | 22,85                       | 2,17       | 0,16      |
| [Rüdenauer und Prakash, 2020] |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 453,00     | 0,00      |
|                               |              | Prozent                 | 0,00                        | 35,17      | 0,00      |
| <b>Kühlschränke</b>           |              |                         |                             |            |           |
| [Xiao et al., 2015]           |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 247,38     | 23,21     |
|                               |              | Prozent                 | 0,00                        | 14,81      | 1,39      |
| [Skolaut, 2018]               |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 0,00       | 0,00      |
|                               |              | Prozent                 | 21,20                       | 3,43       | 0,00      |
| [Steiner et al., 2005]        |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 0,00       | 0,00      |
|                               |              | Prozent                 | 0,00                        | 19,60      | 0,00      |

### Weißwaren (Teil 2)

| Quelle                        | Besonderheit | Einheit                 | Nutzung | EOL    | Summe   |
|-------------------------------|--------------|-------------------------|---------|--------|---------|
| <b>Waschmaschinen</b>         |              |                         |         |        |         |
| [Gensch und Blepp, 2015]      |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 107,00  | 2,00   | 144,00  |
|                               |              | Prozent                 | 74,31   | 1,39   | 100,00  |
| [Rüdenauer et al., 2007]      |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 988,00  | -55,00 | 1247,00 |
|                               |              | Prozent                 | 79,23   | -4,41  | 100,00  |
| [Rüdenauer und Prakash, 2020] |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 835,00  | 0,00   | 1288,00 |
|                               |              | Prozent                 | 64,83   | 0,00   | 100,00  |
| <b>Kühlschränke</b>           |              |                         |         |        |         |
| [Xiao et al., 2015]           |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 1450,91 | -51,51 | 1670,00 |
|                               |              | Prozent                 | 86,88   | -3,08  | 100,00  |
| [Skolaut, 2018]               |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00    | 0,00   | 0,00    |
|                               |              | Prozent                 | 74,10   | 1,27   | 100,00  |
| [Steiner et al., 2005]        |              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00    | 0,00   | 0,00    |
|                               |              | Prozent                 | 80,30   | 0,10   | 100,00  |

## PKW (Teil 1)

| Quelle                  | Besonderheit                  | Einheit                 | Rohmaterial-<br>beschaffung | Produktion | Transport |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------|-----------|
| [Buberger et al., 2022] | VW Passat 2.0 TSI             | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 7412,00    | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 15,01      | 0,00      |
|                         | Mercedes-Benz C300d           | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 7412,00    | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 19,34      | 0,00      |
|                         | Tesla Model 3 SP              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 11180,00   | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 64,00      | 0,00      |
| [Bieker, 2021]          | small, gasoline + biofuels    | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 5904,36    | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 13,13      | 0,00      |
|                         | small, diesel + biofuels      | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 5904,36    | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 13,20      | 0,00      |
|                         | small, battery ev, 2021       | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 8060,58    | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 48,63      | 0,00      |
|                         | medium, gasoline + biofuels   | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 7146,63    | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 11,99      | 0,00      |
|                         | medium, diesel + biofuels     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 7146,63    | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 11,99      | 0,00      |
|                         | medium, battery ev, 2021      | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 9148,95    | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 45,72      | 0,00      |
| [Pero et al., 2018]     | ICEV (KG CO <sub>2</sub> eq.) | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 4973,00    | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 16,31      | 0,00      |
|                         | BEV (KG CO <sub>2</sub> EQ)   | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 8974,00    | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 46,53      | 0,00      |
| [Kanz et al., 2018]     | e-Smart                       | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 3380,50    | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 29,12      | 0,00      |
|                         | Benzin-Smart                  | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 1939,20    | 0,00      |
|                         |                               | Prozent                 | 0,00                        | 9,56       | 0,00      |

## PKW (Teil 2)

| Quelle                  | Besonderheit                  | Einheit                 | Nutzung  | EOL      | Summe    |
|-------------------------|-------------------------------|-------------------------|----------|----------|----------|
| [Buberger et al., 2022] | VW Passat 2.0 TSI             | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 46985,00 | -5030,00 | 49367,00 |
|                         |                               | Prozent                 | 95,17    | -10,19   | 100,00   |
|                         | Mercedes-Benz C300d           | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 35804,00 | -4900,00 | 38316,00 |
|                         |                               | Prozent                 | 93,44    | -12,79   | 100,00   |
|                         | Tesla Model 3 SP              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 13190,00 | -6900,00 | 17470,00 |
|                         |                               | Prozent                 | 75,50    | -39,50   | 100,00   |
| [Bieker, 2021]          | small, gasoline + biofuels    | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 39053,52 | 0,00     | 44957,88 |
|                         |                               | Prozent                 | 86,87    | 0,00     | 100,00   |
|                         | small, diesel + biofuels      | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 38827,80 | 0,00     | 44732,16 |
|                         |                               | Prozent                 | 86,80    | 0,00     | 100,00   |
|                         | small, battery ev, 2021       | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 8514,00  | 0,00     | 16574,58 |
|                         |                               | Prozent                 | 51,37    | 0,00     | 100,00   |
|                         | medium, gasoline + biofuels   | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 52458,84 | 0,00     | 59605,47 |
|                         |                               | Prozent                 | 88,01    | 0,00     | 100,00   |
|                         | medium, diesel + biofuels     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 52458,84 | 0,00     | 59605,47 |
|                         |                               | Prozent                 | 88,01    | 0,00     | 100,00   |
|                         | medium, battery ev, 2021      | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 10862,10 | 0,00     | 20011,05 |
|                         |                               | Prozent                 | 54,28    | 0,00     | 100,00   |
| [Pero et al., 2018]     | ICEV (KG CO <sub>2</sub> eq.) | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 25610,00 | -95,00   | 30488,00 |
|                         |                               | Prozent                 | 84,00    | -0,31    | 100,00   |
|                         | BEV (KG CO <sub>2</sub> EQ)   | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 10400,00 | -87,00   | 19287,00 |
|                         |                               | Prozent                 | 53,92    | -0,45    | 100,00   |
| [Kanz et al., 2018]     | e-Smart                       | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 10220,13 | -1991,61 | 11609,02 |
|                         |                               | Prozent                 | 88,04    | -17,16   | 100,00   |
|                         | Benzin-Smart                  | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 19889,94 | -1546,12 | 20283,02 |
|                         |                               | Prozent                 | 98,06    | -7,62    | 100,00   |

## Pedelects und Fahrräder (Teil 1)

| Quelle                        | Besonderheit                            | Einheit                 | Rohmaterial-<br>beschaffung | Produktion | Transport |
|-------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|-----------------------------|------------|-----------|
| <b>Pedelects</b>              |                                         |                         |                             |            |           |
| [Eckart et al., 2022]         |                                         | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 355,00                      | 40,00      | 29,00     |
|                               |                                         | Prozent                 | 90,33                       | 10,18      | 7,38      |
| [Rüdenauer und Prakash, 2020] | 4 J. (Kurze Nutzungsdauer)              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 356,00     | 0,00      |
|                               |                                         | Prozent                 | 0,00                        | 63,35      | 0,00      |
|                               | 10 J. (Durchschnittliche Nutzungsdauer) | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 143,00     | 0,00      |
|                               |                                         | Prozent                 | 0,00                        | 38,24      | 0,00      |
|                               | 15 J. (Verlängerte Nutzungsdauer)       | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 95,00      | 0,00      |
|                               |                                         | Prozent                 | 0,00                        | 27,07      | 0,00      |
| [Riese & Müller, 2025]        |                                         | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 525,02     | 62,96     |
|                               |                                         | Prozent                 | 0,00                        | 66,36      | 7,96      |
| <b>Fahrräder</b>              |                                         |                         |                             |            |           |
| [Chang et al., 2012]          |                                         | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00                        | 228,39     | 1,47      |
|                               |                                         | Prozent                 | 0,00                        | 96,48      | 0,62      |
| [Mottschall, 2012]            | Rahmenmaterial Aluminium                | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 112,30                      | 26,70      | 0,00      |
|                               |                                         | Prozent                 | 213,09                      | 50,66      | 0,00      |
|                               | Rahmenmaterial Stahl                    | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 55,80                       | 26,70      | 0,00      |
|                               |                                         | Prozent                 | 120,26                      | 57,54      | 0,00      |

## A Anhang

### Pedelecs und Fahrräder (Teil 2)

| Quelle                        | Besonderheit                            | Einheit                 | Nutzung | EOL     | Summe  |
|-------------------------------|-----------------------------------------|-------------------------|---------|---------|--------|
| <b>Pedelecs</b>               |                                         |                         |         |         |        |
| [Eckart et al., 2022]         |                                         | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 198,00  | -229,00 | 393,00 |
|                               |                                         | Prozent                 | 50,38   | -58,27  | 100,00 |
| [Rüdenauer und Prakash, 2020] | 4 J. (Kurze Nutzungsdauer)              | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 206,00  | 0,00    | 562,00 |
|                               |                                         | Prozent                 | 36,65   | 0,00    | 100,00 |
|                               | 10 J. (Durchschnittliche Nutzungsdauer) | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 231,00  | 0,00    | 374,00 |
|                               |                                         | Prozent                 | 61,76   | 0,00    | 100,00 |
|                               | 15 J. (Verlängerte Nutzungsdauer)       | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 256,00  | 0,00    | 351,00 |
|                               |                                         | Prozent                 | 72,93   | 0,00    | 100,00 |
| [Riese & Müller, 2025]        |                                         | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 158,69  | 44,53   | 791,20 |
|                               |                                         | Prozent                 | 20,06   | 5,63    | 100,00 |
| <b>Fahrräder</b>              |                                         |                         |         |         |        |
| [Chang et al., 2012]          |                                         | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 18,17   | -11,30  | 236,73 |
|                               |                                         | Prozent                 | 7,68    | -4,77   | 100,00 |
| [Mottschall, 2012]            | Rahmenmaterial Aluminium                | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00    | -86,30  | 52,70  |
|                               |                                         | Prozent                 | 0,00    | -163,76 | 100,00 |
|                               | Rahmenmaterial Stahl                    | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | 0,00    | -36,10  | 46,40  |
|                               |                                         | Prozent                 | 0,00    | -77,80  | 100,00 |

### Mittelwerte und Standardabweichungen LCAs nach Phasen

|                             | Smartphones | Notebooks | Waschmaschinen | Kühlschränke | PKW      | Pedelecs | Fahrräder |
|-----------------------------|-------------|-----------|----------------|--------------|----------|----------|-----------|
| <b><math>\bar{x}</math></b> |             |           |                |              |          |          |           |
| Rohmaterialbeschaffung      | 4,54        | 0,00      | 105,67         | 0,00         | 0,00     | 71,00    | 56,03     |
| Produktion                  | 40,51       | 356,82    | 160,67         | 82,46        | 6814,02  | 231,80   | 93,93     |
| Transport                   | 6,70        | 45,45     | 1,00           | 7,74         | 0,00     | 18,39    | 0,49      |
| Nutzung                     | 10,06       | 218,66    | 643,33         | 483,64       | 28021,09 | 209,94   | 6,06      |
| EOL                         | -0,27       | -9,48     | -17,67         | -17,17       | -1580,75 | -36,89   | -44,57    |
| <b>s</b>                    |             |           |                |              |          |          |           |
| Rohmaterialbeschaffung      | 13,76       | 0,00      | 127,48         | 0,00         | 0,00     | 142,00   | 45,85     |
| Produktion                  | 21,99       | 332,53    | 206,96         | 116,62       | 2357,75  | 181,54   | 95,08     |
| Transport                   | 13,20       | 36,92     | 0,82           | 10,94        | 0,00     | 24,95    | 0,69      |
| Nutzung                     | 2,35        | 101,03    | 384,35         | 683,97       | 16284,34 | 32,71    | 8,57      |
| EOL                         | 1,42        | 15,90     | 26,41          | 24,28        | 2333,87  | 97,59    | 31,20     |

### A.1.5 LCAs nach Bauteilen

#### Smartphones

| Quelle<br>Einheit<br>Besonderheit | [Ercan et al., 2016]<br>Prozent | [Proske et al., 2020]<br>Prozent | [Sánchez et al., 2022]<br>Prozent |
|-----------------------------------|---------------------------------|----------------------------------|-----------------------------------|
| Gesamt                            | 100,00                          | 100,00                           | 100,00                            |
| Batterie                          | 9,27                            | 5,00                             | 5,00                              |
| Mainboard                         | 13,91                           | 0,00                             | 0,00                              |
| Display                           | 23,18                           | 6,00                             | 5,00                              |
| Andere                            | 17,88                           | 0,00                             | 2,00                              |
| Diverse<br>Aktivitäten            | 15,89                           | 0,00                             | 0,00                              |
| Transport                         | 19,87                           | 0,00                             | 0,00                              |
| Montage                           | 0,00                            | 6,00                             | 0,00                              |
| Core module                       | 0,00                            | 72,00                            | 71,00                             |
| Bottom module                     | 0,00                            | 2,00                             | 0,00                              |
| Top module                        | 0,00                            | 4,00                             | 9,00                              |
| Kamera                            | 0,00                            | 5,00                             | 3,00                              |
| Lautsprecher                      | 0,00                            | 0,00                             | 5,00                              |
| RAM                               | 0,00                            | 0,00                             | 0,00                              |
| CPU                               | 0,00                            | 0,00                             | 0,00                              |
| Hard Drive                        | 0,00                            | 0,00                             | 0,00                              |
| Gehäuse                           | 0,00                            | 0,00                             | 0,00                              |
| Stromversorgung                   | 0,00                            | 0,00                             | 0,00                              |
| Disc Drive                        | 0,00                            | 0,00                             | 0,00                              |
| Dockingstation                    | 0,00                            | 0,00                             | 0,00                              |
| Maus                              | 0,00                            | 0,00                             | 0,00                              |
| Keyboard                          | 0,00                            | 0,00                             | 0,00                              |
| Kabel                             | 0,00                            | 0,00                             | 0,00                              |
| Verpackung                        | 0,00                            | 0,00                             | 0,00                              |

## Notebooks

| Quelle<br>Einheit<br>Besonderheit | Prozent<br>with HDD | Prozent<br>with SSD<br>[Prakash et al., 2016b] | Prozent<br>[O'Connell und Stutz, 2010] | Prozent<br>lower | Prozent<br>higher<br>[Deng et al., 2011] |
|-----------------------------------|---------------------|------------------------------------------------|----------------------------------------|------------------|------------------------------------------|
| Gesamt                            | 100,00              | 100,00                                         | 100,00                                 | 100,00           | 100,00                                   |
| Batterie                          | 2,19                | 1,77                                           | 6,39                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Mainboard                         | 33,53               | 27,13                                          | 47,20                                  | 2,17             | 2,31                                     |
| Display                           | 5,52                | 4,47                                           | 25,22                                  | 14,13            | 4,62                                     |
| Andere                            | 0,00                | 0,00                                           | 0,00                                   | 5,43             | 0,00                                     |
| Diverse<br>Aktivitäten            | 0,00                | 0,00                                           | 0,00                                   | 17,39            | 31,54                                    |
| Transport                         | 0,00                | 0,00                                           | 0,35                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Montage                           | 0,00                | 0,00                                           | 0,00                                   | 38,04            | 36,15                                    |
| Core module                       | 0,00                | 0,00                                           | 0,00                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Bottom module                     | 0,00                | 0,00                                           | 0,00                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Top module                        | 0,00                | 0,00                                           | 0,00                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Kamera                            | 0,00                | 0,00                                           | 0,00                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Lautsprecher                      | 0,00                | 0,00                                           | 0,00                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| RAM                               | 36,43               | 29,48                                          | 0,00                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| CPU                               | 2,34                | 1,90                                           | 0,00                                   | 22,83            | 25,38                                    |
| Hard Drive                        | 2,46                | 21,09                                          | 0,87                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Gehäuse                           | 3,97                | 3,21                                           | 16,11                                  | 0,00             | 0,00                                     |
| Stromversorgung                   | 1,59                | 1,29                                           | 1,40                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Disc Drive                        | 2,30                | 1,86                                           | 1,23                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Dockingstation                    | 7,39                | 5,98                                           | 0,00                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Maus                              | 0,72                | 0,58                                           | 0,00                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Keyboard                          | 1,55                | 1,25                                           | 0,44                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Kabel                             | 0,00                | 0,00                                           | 0,18                                   | 0,00             | 0,00                                     |
| Verpackung                        | 0,00                | 0,00                                           | 0,61                                   | 0,00             | 0,00                                     |

### Mittelwerte und Standardabweichungen der Hauptkategorie Smartphones und Notebooks

|                 | $\bar{x}$ | s     |
|-----------------|-----------|-------|
| Gesamt          | 100,00    | 0,00  |
| Batterie        | 3,70      | 3,27  |
| Mainboard       | 15,78     | 18,12 |
| Display         | 11,02     | 8,74  |
| Andere          | 3,16      | 6,25  |
| Diverse         |           |       |
| Aktivitäten     | 8,10      | 12,10 |
| Transport       | 2,53      | 7,01  |
| Montage         | 10,02     | 16,85 |
| Core module     | 17,88     | 33,10 |
| Bottom module   | 0,25      | 0,71  |
| Top module      | 1,63      | 3,29  |
| Kamera          | 1,00      | 1,93  |
| Lautsprecher    | 0,63      | 1,77  |
| RAM             | 8,24      | 15,37 |
| CPU             | 6,56      | 10,89 |
| Hard Drive      | 3,05      | 7,34  |
| Gehäuse         | 2,91      | 5,58  |
| Stromversorgung | 0,53      | 0,74  |
| Disc Drive      | 0,67      | 0,97  |
| Dockingstation  | 1,67      | 3,12  |
| Maus            | 0,16      | 0,30  |
| Keyboard        | 0,41      | 0,64  |
| Kabel           | 0,02      | 0,06  |
| Verpackung      | 0,08      | 0,22  |

## A Anhang

### Weißwaren

| Quelle<br>Einheit | [Xiao et al., 2015]<br>Prozent |
|-------------------|--------------------------------|
| Gesamt            | 100,00                         |
| Andere            | 4,36                           |
| Montage           | 4,99                           |
| Schrank           | 43,02                          |
| Tür               | 18,95                          |
| Kompressor        | 28,68                          |

### PKW

| Quelle<br>Einheit<br>Besonderheit | [Pero et al., 2018]<br>Prozent ICEV      Prozent BEV |        |
|-----------------------------------|------------------------------------------------------|--------|
| Gesamt                            | 100,00                                               | 100,00 |
| Rohkarosserie                     | 23,00                                                | 15,97  |
| Türen                             | 15,83                                                | 8,57   |
| Antrieb                           | 24,29                                                | 55,85  |
| Elektronik                        | 5,58                                                 | 2,86   |
| Innenraum                         | 13,51                                                | 8,18   |
| Fahrwerk                          | 17,79                                                | 8,57   |

### Pedelecs

| Quelle<br>Einheit | [Winograd, 2022]<br>Prozent |
|-------------------|-----------------------------|
| Gesamt            | 100,00                      |
| Batterie          | 23,88                       |
| Display           | 1,21                        |
| Andere            | 37,46                       |
| Transport         | 7,36                        |
| Antrieb           | 15,38                       |
| Nutzung           | 14,72                       |

## Fahrräder

| Quelle                  | [Trek Bicycle, 2024] |                    | [Trek Bicycle, 2022] |         | [Johnson et al., 2014] |         |
|-------------------------|----------------------|--------------------|----------------------|---------|------------------------|---------|
| Einheit                 | Prozent              |                    | Prozent              |         | Prozent                | Prozent |
| Besonderheit            | Trek Marlin Alu      | Trek Madone Carbon | Trek Fuel Ex Fully   | Roubaix | Allez                  |         |
| Innenlager              | 1,00                 | 0,00               | 0,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Bremsenbaugruppe vorne  | 2,00                 | 0,00               | 2,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Bremsenbaugruppe hinten | 3,00                 | 0,00               | 2,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Kassette / Freilauf     | 1,00                 | 2,00               | 2,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Kette                   | 1,00                 | 0,00               | 0,00                 | 1,56    | 0,61                   |         |
| Kurbelbaugruppe         | 9,00                 | 5,00               | 8,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Schaltwerk / Umwerfer   | 3,00                 | 2,00               | 2,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Gabelbaugruppe          | 15,00                | 7,00               | 14,00                | 24,22   | 10,64                  |         |
| Rahmenbaugruppe         | 17,00                | 29,00              | 18,00                | 54,44   | 80,99                  |         |
| Betriebsstoffe          | 6,00                 | 5,00               | 5,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Hinterrad               | 10,00                | 21,00              | 6,00                 | 12,72   | 4,99                   |         |
| Vorderrad               | 10,00                | 15,00              | 6,00                 | 7,06    | 2,77                   |         |
| Schaltungsbaugruppe     | 2,00                 | 3,00               | 1,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Sattelstützenbaugruppe  | 4,00                 | 2,00               | 3,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Bremsscheiben           | 1,00                 | 1,00               | 1,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Reflektoren             | 1,00                 | 0,00               | 1,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Verpackung              | 3,00                 | 0,00               | 3,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Schlauch                | 1,00                 | 0,00               | 1,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Hinterradnabe           | 4,00                 | 0,00               | 3,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Steuersatzbaugruppe     | 1,00                 | 2,00               | 2,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Lenker                  | 4,00                 | 6,00               | 4,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Pedale                  | 1,00                 | 0,00               | 0,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Tretlager               | 0,00                 | 0,00               | 1,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Kettenstrebe            | 0,00                 | 0,00               | 2,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Dämpfer Hardware        | 0,00                 | 0,00               | 2,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Vorbau                  | 0,00                 | 0,00               | 1,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Speichen hinten         | 0,00                 | 0,00               | 1,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Speichen vorne          | 0,00                 | 0,00               | 1,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Achse                   | 0,00                 | 0,00               | 1,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Dämpfer                 | 0,00                 | 0,00               | 2,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Link                    | 0,00                 | 0,00               | 3,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |
| Vorderradnabe           | 0,00                 | 0,00               | 2,00                 | 0,00    | 0,00                   | 0,00    |

## Mittelwerte und Standardabweichungen Fahrräder

|                         | $\bar{x}$ | s     |
|-------------------------|-----------|-------|
| Innenlager              | 0,13      | 0,35  |
| Bremsenbaugruppe vorne  | 0,50      | 0,93  |
| Bremsenbaugruppe hinten | 0,63      | 1,19  |
| Kassette / Freilauf     | 0,63      | 0,92  |
| Kette                   | 0,40      | 0,60  |
| Kurbelbaugruppe         | 2,75      | 3,96  |
| Schaltwerk / Umwerfer   | 0,88      | 1,25  |
| Gabelbaugruppe          | 8,86      | 8,80  |
| Rahmenbaugruppe         | 24,93     | 29,29 |
| Betriebsstoffe          | 2,00      | 2,78  |
| Hinterrad               | 6,84      | 7,46  |
| Vorderrad               | 5,10      | 5,48  |
| Schaltungsbaugruppe     | 0,75      | 1,16  |
| Sattelstützenbaugruppe  | 1,13      | 1,64  |
| Bremsscheiben           | 0,38      | 0,52  |
| Reflektoren             | 0,25      | 0,46  |
| Verpackung              | 0,75      | 1,39  |
| Schlauch                | 0,25      | 0,46  |
| Hinterradnabe           | 0,88      | 1,64  |
| Steuersatzbaugruppe     | 0,63      | 0,92  |
| Lenker                  | 1,75      | 2,49  |
| Pedale                  | 0,13      | 0,35  |
| Tretlager               | 0,13      | 0,35  |
| Kettenstrebe            | 0,25      | 0,71  |
| Dämpfer Hardware        | 0,25      | 0,71  |
| Vorbau                  | 0,13      | 0,35  |
| Speichen hinten         | 0,13      | 0,35  |
| Speichen vorne          | 0,13      | 0,35  |
| Achse                   | 0,13      | 0,35  |
| Dämpfer                 | 0,25      | 0,71  |
| Link                    | 0,38      | 1,06  |
| Vorderradnabe           | 0,25      | 0,71  |

### A.1.6 LCAs nach Werkstoffen

#### Notebooks und Kühlschränke

| Quelle<br>Einheit<br>Besonderheit | Notebooks<br>[Deng et al., 2011] |         | Kühlschranke<br>[Paz et al., 2024] |         |
|-----------------------------------|----------------------------------|---------|------------------------------------|---------|
|                                   | kg CO <sub>2</sub> -Äq.          | Prozent | kg CO <sub>2</sub> -Äq.            | Prozent |
| Gesamt                            | 227,58                           | 100,00  | 227,19                             | 100,00  |
| ABS                               | 1,60                             | 5,80    | 0,00                               | 0,00    |
| PC                                | 2,70                             | 9,79    | 0,00                               | 0,00    |
| Kunststoffe                       | 1,90                             | 6,89    | 0,00                               | 0,00    |
| Glas                              | 1,00                             | 3,63    | 0,00                               | 0,00    |
| Kupfer                            | 1,08                             | 3,90    | 4,97                               | 18,28   |
| Aluminium                         | 3,95                             | 14,32   | 5,21                               | 19,16   |
| Eisen                             | 3,45                             | 12,51   | 17,01                              | 62,56   |
| Gold                              | 7,93                             | 28,73   | 0,00                               | 0,00    |
| Silber                            | 0,55                             | 1,98    | 0,00                               | 0,00    |
| Epoxy                             | 2,60                             | 9,43    | 0,00                               | 0,00    |
| Palladium                         | 0,54                             | 1,96    | 0,00                               | 0,00    |
| Nickel                            | 0,01                             | 0,03    | 0,00                               | 0,00    |
| Zink                              | 0,00                             | 0,00    | 0,00                               | 0,00    |
| Neodymium                         | 0,00                             | 0,00    | 0,00                               | 0,00    |
| Zinn                              | 0,15                             | 0,54    | 0,00                               | 0,00    |
| Blei                              | 0,14                             | 0,49    | 0,00                               | 0,00    |

#### PKW

| Quelle<br>Einheit<br>Besonderheit | [Danilecki et al., 2017] |         |                         |         |                         |         |
|-----------------------------------|--------------------------|---------|-------------------------|---------|-------------------------|---------|
|                                   | kg CO <sub>2</sub> -Äq.  | Prozent | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | Prozent | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | Prozent |
|                                   | VW Golf MK1              |         | VW Golf MK4             |         | VW Golf MK6             |         |
| Gesamt                            | 4171,00                  | 100,00  | 5874,00                 | 100,00  | 6026,00                 | 100,00  |
| Eisen                             | 2601,40                  | 65,51   | 3362,41                 | 59,26   | 3373,08                 | 56,92   |
| Aluminium                         | 524,57                   | 13,21   | 895,92                  | 15,79   | 1028,16                 | 17,35   |
| Nickel                            | 116,75                   | 2,94    | 276,32                  | 4,87    | 312,30                  | 5,27    |
| Kunststoffe                       | 279,16                   | 7,03    | 519,74                  | 9,16    | 577,19                  | 9,74    |
| Andere                            | 449,12                   | 11,31   | 619,60                  | 10,92   | 635,27                  | 10,72   |

### A.1.7 Selbsterstellte LCAs nach Werkstoffen (Prozentual gewichtet)

#### Smartphones

| Metall | [Bookhagen et al., 2020] |           | [Buchert, 2012] |           | [Manhart et al., 2016] |           |
|--------|--------------------------|-----------|-----------------|-----------|------------------------|-----------|
|        | Deponie                  | Recycling | Deponie         | Recycling | Deponie                | Recycling |
| Fe     | 0,30                     | 0,11      | 0,00            | 0,00      | 0,02                   | 0,01      |
| Si     | 0,32                     | 0,33      | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| Mg     | 61,32                    | 62,05     | 0,00            | 0,00      | 45,75                  | 55,33     |
| Al     | 0,69                     | 0,17      | 0,00            | 0,00      | 2,27                   | 0,68      |
| Cu     | 0,34                     | 0,08      | 0,00            | 0,00      | 0,76                   | 0,21      |
| Ni     | 17,37                    | 17,63     | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| Cr     | 12,61                    | 12,75     | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| Sn     | 0,88                     | 0,86      | 0,00            | 0,00      | 1,69                   | 1,99      |
| Zn     | 1,52                     | 1,55      | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| Sr     | 0,00                     | 0,00      | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| Ba     | 0,00                     | 0,00      | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| REE    | 0,00                     | 0,00      | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| W      | 1,09                     | 1,07      | 0,00            | 0,00      | 1,98                   | 2,32      |
| Mn     | 1,10                     | 1,13      | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| Ti     | 0,98                     | 0,99      | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| Co     | 0,31                     | 0,30      | 70,88           | 95,61     | 31,95                  | 37,43     |
| Ta     | 0,23                     | 0,15      | 0,00            | 0,00      | 0,11                   | 0,09      |
| Mo     | 0,24                     | 0,24      | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| Zr     | 0,10                     | 0,09      | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| Au     | 0,00                     | 0,00      | 24,70           | 1,95      | 13,15                  | 0,90      |
| Ag     | 0,00                     | 0,00      | 3,11            | 2,02      | 1,66                   | 0,85      |
| Pd     | 0,00                     | 0,00      | 1,15            | 0,19      | 0,56                   | 0,08      |
| Nd     | 0,00                     | 0,00      | 0,13            | 0,18      | 0,07                   | 0,08      |
| Pr     | 0,00                     | 0,00      | 0,04            | 0,05      | 0,02                   | 0,02      |
| In     | 0,00                     | 0,00      | 0,00            | 0,00      | 0,02                   | 0,01      |
| Pb     | 0,00                     | 0,00      | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| Sb     | 0,00                     | 0,00      | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |
| Glas   | 0,60                     | 0,49      | 0,00            | 0,00      | 0,00                   | 0,00      |

## Notebooks

| Metall     | [Trinh et al., 2023],<br>[Deng et al., 2011] |           | [Prakash et al., 2012] |           |
|------------|----------------------------------------------|-----------|------------------------|-----------|
|            | Deponie                                      | Recycling | Deponie                | Recycling |
| Fe         | 5,14                                         | 7,72      | 0,72                   | 0,27      |
| Si         | 0,00                                         | 0,00      | 0,07                   | 0,08      |
| Mg         | 0,00                                         | 0,00      | 79,10                  | 88,79     |
| Al         | 16,59                                        | 16,57     | 0,44                   | 0,13      |
| Cu         | 4,36                                         | 4,36      | 0,48                   | 0,13      |
| Ni         | 2,05                                         | 8,15      | 1,41                   | 1,58      |
| Sn         | 3,97                                         | 15,23     | 1,47                   | 1,61      |
| Zn         | 0,08                                         | 0,30      | 0,53                   | 0,60      |
| Au         | 48,46                                        | 0,65      | 3,11                   | 0,01      |
| Ag         | 2,39                                         | 4,15      | 0,17                   | 0,09      |
| Pd         | 1,08                                         | 0,53      | 0,14                   | 0,02      |
| Nd         | 0,01                                         | 0,03      | 0,00                   | 0,00      |
| In         | 0,00                                         | 0,00      | 8,48                   | 4,30      |
| Pb         | 0,99                                         | 3,92      | 0,17                   | 0,19      |
| Sb         | 0,00                                         | 0,00      | 0,14                   | 0,16      |
| Kunststoff |                                              |           |                        |           |
| ABS        | 3,46                                         | 5,90      | 0,33                   | 0,15      |
| PC         | 5,70                                         | 10,69     | 0,95                   | 0,51      |
| (LD)PE     | 0,00                                         | 0,00      | 0,10                   | 0,06      |
| PP         | 0,00                                         | 0,00      | 0,03                   | 0,01      |
| PS         | 0,00                                         | 0,00      | 0,01                   | 0,00      |
| EPS        | 0,00                                         | 0,00      | 0,08                   | 0,10      |
| PVC        | 0,00                                         | 0,00      | 0,04                   | 0,03      |
| PA 6       | 0,00                                         | 0,00      | 1,40                   | 0,66      |
| PMMA       | 0,00                                         | 0,00      | 0,13                   | 0,06      |
| Epoxy      | 4,24                                         | 17,06     | 0,06                   | 0,06      |
| Glas       | 1,48                                         | 4,73      | 0,45                   | 0,41      |

**Mittelwerte und Standardabweichungen von Smartphones und Notebooks**

| Metall     | $\bar{x}$<br>Deponie | s<br>Deponie | $\bar{x}$<br>Recycling | s<br>Recycling |
|------------|----------------------|--------------|------------------------|----------------|
| Fe         | 1,24                 | 2,20         | 1,62                   | 3,41           |
| Si         | 0,08                 | 0,14         | 0,08                   | 0,14           |
| Mg         | 37,24                | 35,98        | 41,23                  | 39,67          |
| Al         | 4,00                 | 7,09         | 3,51                   | 7,31           |
| Cu         | 1,19                 | 1,79         | 0,96                   | 1,90           |
| Ni         | 4,17                 | 7,44         | 5,47                   | 7,58           |
| Cr         | 2,52                 | 5,64         | 2,55                   | 5,70           |
| Sn         | 1,60                 | 1,48         | 3,94                   | 6,36           |
| Zn         | 0,42                 | 0,65         | 0,49                   | 0,64           |
| W          | 0,61                 | 0,90         | 0,68                   | 1,03           |
| Mn         | 0,22                 | 0,49         | 0,23                   | 0,50           |
| Ti         | 0,20                 | 0,44         | 0,20                   | 0,44           |
| Co         | 20,63                | 31,29        | 26,67                  | 41,79          |
| Ta         | 0,07                 | 0,10         | 0,05                   | 0,07           |
| Mo         | 0,05                 | 0,11         | 0,05                   | 0,11           |
| Zr         | 0,02                 | 0,04         | 0,02                   | 0,04           |
| Au         | 17,88                | 19,63        | 0,70                   | 0,80           |
| Ag         | 1,47                 | 1,36         | 1,42                   | 1,73           |
| Pd         | 0,58                 | 0,52         | 0,16                   | 0,22           |
| Nd         | 0,04                 | 0,06         | 0,06                   | 0,08           |
| Pr         | 0,01                 | 0,02         | 0,02                   | 0,02           |
| In         | 1,70                 | 3,79         | 0,86                   | 1,92           |
| Pb         | 0,23                 | 0,43         | 0,82                   | 1,74           |
| Sb         | 0,03                 | 0,06         | 0,03                   | 0,07           |
| Kunststoff |                      |              |                        |                |
| ABS        | 0,76                 | 1,52         | 1,21                   | 2,62           |
| PC         | 1,33                 | 2,48         | 2,24                   | 4,73           |
| (LD)PE     | 0,02                 | 0,04         | 0,01                   | 0,03           |
| PP         | 0,01                 | 0,01         | 0,00                   | 0,01           |
| PS         | 0,00                 | 0,00         | 0,00                   | 0,00           |
| EPS        | 0,02                 | 0,04         | 0,02                   | 0,04           |
| PVC        | 0,01                 | 0,02         | 0,01                   | 0,01           |
| PA 6       | 0,28                 | 0,63         | 0,13                   | 0,30           |
| PMMA       | 0,03                 | 0,06         | 0,01                   | 0,03           |
| Epoxy      | 0,86                 | 1,89         | 3,42                   | 7,62           |
| Glas       | 0,51                 | 0,61         | 1,13                   | 2,03           |

**Weißwaren**

| Metall     | <b>Waschmaschinen</b>    |           | <b>Kühlschränke</b> |           |                     |           |
|------------|--------------------------|-----------|---------------------|-----------|---------------------|-----------|
|            | [Rüdenauer et al., 2007] |           | [VDI, 2022]         |           | [Xiao et al., 2015] |           |
|            | Deponie                  | Recycling | Deponie             | Recycling | Deponie             | Recycling |
| Fe         | 20,37                    | 17,23     | 96,04               | 91,97     | 50,81               | 45,85     |
| Si         | 0,53                     | 1,24      | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| Al         | 19,51                    | 11,34     | 0,00                | 0,00      | 18,77               | 12,00     |
| Cu         | 2,66                     | 1,51      | 0,00                | 0,00      | 5,71                | 3,53      |
| Ni         | 11,04                    | 25,48     | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| Sn         | 5,14                     | 11,47     | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| Zn         | 4,39                     | 10,20     | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| Au         | 23,72                    | 0,75      | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| Ag         | 1,28                     | 1,30      | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| Pd         | 1,08                     | 0,33      | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| Pb         | 1,22                     | 2,80      | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| Sb         | 1,08                     | 2,50      | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| Kunststoff |                          |           |                     |           |                     |           |
| ABS        | 1,85                     | 1,82      | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| (LD)PE     | 0,23                     | 0,32      | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| PP         | 1,01                     | 1,03      | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| PS         | 0,00                     | 0,00      | 0,00                | 0,00      | 20,42               | 28,62     |
| EPS        | 0,00                     | 0,00      | 0,00                | 0,00      | 3,01                | 7,64      |
| PVC        | 0,06                     | 0,07      | 0,00                | 0,00      | 0,77                | 1,07      |
| PA 6       | 0,14                     | 0,13      | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| EPDM       | 3,41                     | 7,96      | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| POM        | 0,04                     | 0,06      | 0,00                | 0,00      | 0,00                | 0,00      |
| Epoxy      | 0,32                     | 0,74      | 0,00                | 0,00      | 0,51                | 1,29      |
| Glas       | 0,92                     | 1,73      | 3,96                | 8,03      | 0,00                | 0,00      |

**Mittelwerte und Standardabweichungen für Weißwaren**

| Metall     | $\bar{x}$<br>Deponie | s<br>Deponie | $\bar{x}$<br>Recycling | s<br>Recycling |
|------------|----------------------|--------------|------------------------|----------------|
| Fe         | 55,74                | 38,07        | 51,68                  | 37,71          |
| Si         | 0,18                 | 0,31         | 0,41                   | 0,72           |
| Al         | 12,76                | 11,06        | 7,78                   | 6,75           |
| Cu         | 2,79                 | 2,86         | 1,68                   | 1,77           |
| Ni         | 3,68                 | 6,37         | 8,49                   | 14,71          |
| Sn         | 1,71                 | 2,97         | 3,82                   | 6,62           |
| Zn         | 1,46                 | 2,54         | 3,40                   | 5,89           |
| Au         | 7,91                 | 13,70        | 0,25                   | 0,43           |
| Ag         | 0,43                 | 0,74         | 0,43                   | 0,75           |
| Pd         | 0,36                 | 0,62         | 0,11                   | 0,19           |
| Pb         | 0,41                 | 0,70         | 0,93                   | 1,62           |
| Sb         | 0,36                 | 0,62         | 0,83                   | 1,44           |
| Kunststoff |                      |              |                        |                |
| ABS        | 0,62                 | 1,07         | 0,61                   | 1,05           |
| (LD)PE     | 0,08                 | 0,13         | 0,11                   | 0,18           |
| PP         | 0,34                 | 0,58         | 0,34                   | 0,60           |
| PS         | 6,81                 | 11,79        | 9,54                   | 16,52          |
| EPS        | 1,00                 | 1,74         | 2,55                   | 4,41           |
| PVC        | 0,28                 | 0,43         | 0,38                   | 0,60           |
| PA 6       | 0,05                 | 0,08         | 0,04                   | 0,08           |
| EPDM       | 1,14                 | 1,97         | 2,65                   | 4,60           |
| POM        | 0,01                 | 0,03         | 0,02                   | 0,04           |
| Epoxy      | 0,27                 | 0,26         | 0,68                   | 0,65           |
| Glas       | 1,63                 | 2,07         | 3,25                   | 4,23           |

## PKW

| Metall     | [Danilecki et al., 2017] |           |                        |           |                        |           |
|------------|--------------------------|-----------|------------------------|-----------|------------------------|-----------|
|            | Deponie<br>VW Golf MK1   | Recycling | Deponie<br>VW Golf MK4 | Recycling | Deponie<br>VW Golf MK6 | Recycling |
| Fe         | 34,96                    | 32,00     | 30,35                  | 28,23     | 29,28                  | 27,27     |
| Si         | 0,44                     | 1,11      | 0,44                   | 1,14      | 0,43                   | 1,10      |
| Al         | 17,04                    | 10,89     | 19,46                  | 12,59     | 21,90                  | 14,93     |
| Cu         | 2,52                     | 1,33      | 3,53                   | 2,46      | 3,74                   | 2,12      |
| Ni         | 7,91                     | 19,91     | 7,91                   | 20,16     | 7,63                   | 19,48     |
| Sn         | 4,39                     | 10,70     | 4,39                   | 10,85     | 4,24                   | 10,48     |
| Zn         | 3,24                     | 8,20      | 3,39                   | 8,70      | 3,27                   | 8,40      |
| Au         | 19,97                    | 0,75      | 19,89                  | 0,17      | 19,19                  | 0,16      |
| Ag         | 1,10                     | 1,23      | 1,08                   | 1,22      | 0,08                   | 0,10      |
| Pd         | 0,90                     | 0,32      | 0,91                   | 0,30      | 0,00                   | 0,00      |
| Pb         | 1,53                     | 3,83      | 2,04                   | 5,17      | 1,97                   | 5,00      |
| Kunststoff |                          |           |                        |           |                        |           |
| ABS        | 1,03                     | 1,08      | 0,65                   | 0,68      | 1,54                   | 1,65      |
| PC         | 0,00                     | 0,00      | 0,00                   | 0,00      | 0,01                   | 0,01      |
| (LD)PE     | 0,23                     | 0,35      | 0,00                   | 0,00      | 0,63                   | 0,98      |
| PP         | 1,84                     | 2,11      | 2,48                   | 2,93      | 2,73                   | 3,34      |
| PS         | 0,25                     | 0,34      | 0,39                   | 0,54      | 0,38                   | 0,52      |
| PVC        | 0,05                     | 0,07      | 0,12                   | 0,17      | 0,12                   | 0,17      |
| PA 6       | 0,99                     | 1,02      | 1,31                   | 1,34      | 1,46                   | 1,51      |
| PMMA       | 0,08                     | 0,08      | 0,18                   | 0,19      | 0,00                   | 0,00      |
| Epoxy      | 0,27                     | 0,69      | 0,28                   | 0,71      | 0,00                   | 0,00      |
| Glas       | 1,26                     | 3,98      | 1,18                   | 2,43      | 1,40                   | 2,78      |

## A Anhang

### Pedelecs

| Metall     | [Mottschall, 2012, Del Duce, 2011] |                        |                           |                    | [Riese & Müller, 2025] |           |
|------------|------------------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------|------------------------|-----------|
|            | Deponie<br>Rahmenmaterial          | Recycling<br>Aluminium | Deponie<br>Rahmenmaterial | Recycling<br>Stahl | Deponie                | Recycling |
| Fe         | 2,53                               | 2,36                   | 7,15                      | 5,90               | 1,59                   | 1,38      |
| Si         | 0,76                               | 1,95                   | 0,90                      | 2,13               | 0,52                   | 1,24      |
| Al         | 28,41                              | 17,78                  | 10,70                     | 6,61               | 37,50                  | 22,02     |
| Cu         | 1,82                               | 1,09                   | 2,16                      | 1,20               | 1,25                   | 0,72      |
| Ni         | 13,57                              | 34,47                  | 16,14                     | 37,77              | 9,24                   | 21,88     |
| Sn         | 7,59                               | 18,63                  | 9,02                      | 20,41              | 5,12                   | 11,71     |
| Zn         | 5,62                               | 14,37                  | 6,69                      | 15,74              | 3,89                   | 9,25      |
| Au         | 33,48                              | 0,29                   | 39,82                     | 0,32               | 23,38                  | 0,73      |
| Ag         | 1,85                               | 2,06                   | 2,20                      | 2,26               | 1,26                   | 1,33      |
| Pd         | 1,54                               | 0,48                   | 1,83                      | 0,52               | 1,06                   | 0,31      |
| Pb         | 1,76                               | 4,46                   | 2,10                      | 4,88               | 1,21                   | 2,85      |
| Sb         | 0,00                               | 0,00                   | 0,00                      | 0,00               | 1,06                   | 2,53      |
| Kunststoff |                                    |                        |                           |                    |                        |           |
| ABS        | 0,00                               | 0,00                   | 0,00                      | 0,00               | 0,01                   | 0,01      |
| (LD)PE     | 0,33                               | 0,51                   | 0,39                      | 0,56               | 0,22                   | 0,31      |
| PP         | 0,21                               | 0,24                   | 0,25                      | 0,26               | 4,14                   | 4,40      |
| PVC        | 0,09                               | 0,12                   | 0,10                      | 0,13               | 7,74                   | 18,08     |
| PA 6       | 0,00                               | 0,00                   | 0,00                      | 0,00               | 0,49                   | 0,47      |
| Epoxy      | 0,46                               | 1,19                   | 0,55                      | 1,31               | 0,32                   | 0,77      |
| Glas       | 0,00                               | 0,00                   | 0,00                      | 0,00               | 0,00                   | 0,01      |

### Fahrräder

| Metall | (Mottschall, 2012)        |                        |                           |                    |
|--------|---------------------------|------------------------|---------------------------|--------------------|
|        | Deponie<br>Rahmenmaterial | Recycling<br>Aluminium | Deponie<br>Rahmenmaterial | Recycling<br>Stahl |
| Fe     | 7,78                      | 10,34                  | 42,64                     | 52,75              |
| Al     | 92,22                     | 89,66                  | 57,36                     | 47,25              |

## Mittelwerte und Standardabweichungen für Fahrzeuge

| Metall     | $\bar{x}$ | s       | $\bar{x}$ | s         |
|------------|-----------|---------|-----------|-----------|
|            | Deponie   | Deponie | Recycling | Recycling |
| Fe         | 19,54     | 16,42   | 20,03     | 18,08     |
| Si         | 0,44      | 0,32    | 1,09      | 0,78      |
| Al         | 35,57     | 27,12   | 27,72     | 27,96     |
| Cu         | 1,88      | 1,42    | 1,11      | 0,89      |
| Ni         | 7,80      | 5,69    | 19,21     | 13,75     |
| Sn         | 4,34      | 3,18    | 10,35     | 7,43      |
| Zn         | 3,26      | 2,36    | 8,08      | 5,74      |
| Au         | 19,47     | 14,06   | 0,30      | 0,30      |
| Ag         | 0,95      | 0,85    | 1,02      | 0,91      |
| Pd         | 0,78      | 0,72    | 0,24      | 0,21      |
| Pb         | 1,33      | 0,87    | 3,27      | 2,15      |
| Sb         | 0,13      | 0,38    | 0,32      | 0,89      |
| Kunststoff |           |         |           |           |
| ABS        | 0,40      | 0,60    | 0,43      | 0,64      |
| PC         | 0,00      | 0,00    | 0,00      | 0,00      |
| (LD)PE     | 0,22      | 0,23    | 0,34      | 0,34      |
| PP         | 1,46      | 1,57    | 1,66      | 1,76      |
| PS         | 0,13      | 0,18    | 0,18      | 0,25      |
| PVC        | 1,03      | 2,71    | 2,34      | 6,36      |
| PA 6       | 0,53      | 0,63    | 0,54      | 0,65      |
| PMMA       | 0,03      | 0,07    | 0,03      | 0,07      |
| Epoxy      | 0,24      | 0,22    | 0,58      | 0,53      |
| Glas       | 0,48      | 0,66    | 1,15      | 1,64      |

## Datenbasis Granta Selector (Teil 1)

| Werkstoff | Genaue Bezeichnung                                   | CO <sub>2</sub> footprint, primary production<br>(virgin grade) kg/kg | Wert in der Quelle<br>kg/kg | Quelle                              |
|-----------|------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|-------------------------------------|
| Fe        | Wrought iron                                         | 2,19 - 2,42                                                           | 2,06                        | (Voet, van der and Oers, van, 2003) |
|           |                                                      |                                                                       | 4,28                        | (Voet, van der and Oers, van, 2003) |
|           |                                                      |                                                                       | 20,3                        | (Hammond and Jones, 2008)           |
|           |                                                      |                                                                       | 1,85                        | (Ecoinvent v3.7.1)                  |
|           |                                                      |                                                                       | 1,8                         | (Ecoinvent v3.7.1)                  |
| Si        | Silicon                                              | 4,78 - 5,27                                                           | 1,78                        | (Ecoinvent v3.7.1)                  |
|           |                                                      |                                                                       | 5,02                        | (Ecoinvent v2.2)                    |
| Mg        | Magnesium, AE44, cast, F                             | 22,2 - 24,5                                                           | <i>ohne Quelle</i>          | <i>ohne Quelle</i>                  |
| Al        | Aluminium, commercial purity,<br>S150.1: LM0-M, cast | 13,1 - 14,5                                                           | 13,1                        | (Voet, van der and Oers, van, 2003) |
|           |                                                      |                                                                       | 12,8                        | (Hammond and Jones, 2008)           |
|           |                                                      |                                                                       | 22,2                        | (Ecoinvent v3.7.1)                  |
|           |                                                      |                                                                       | 10,9                        | (Ecoinvent v3.7.1)                  |
|           |                                                      |                                                                       | 9,92                        | (Ecoinvent v3.7.1)                  |
| Cu        | Copper, cast (h.c. copper)                           | 6,41 - 7,07                                                           | 3,3                         | (Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007) |
|           |                                                      |                                                                       | 6,2                         | (Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007) |
|           |                                                      |                                                                       | 3,81                        | (Hammond and Jones, 2008)           |
|           |                                                      |                                                                       | 13,65                       | (Ecoinvent v3.7.1)                  |
| Ni        | Nickel, commercial purity,<br>grade 270              | 14,7 - 16,2                                                           | 11,4                        | (Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007) |
|           |                                                      |                                                                       | 14,6                        | (Nickel Institute, 2003)            |
|           |                                                      |                                                                       | 15,1                        | (Voet, van der and Oers, van, 2003) |
|           |                                                      |                                                                       | 16,1                        | (Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007) |
|           |                                                      |                                                                       | 19,8                        | (Ecoinvent v3.7.1)                  |
| Cr        | Chromium, commercial purity,<br>hard, >99 %Cr        | 20,1 - 22,2                                                           | 15,5                        | (Voet, van der and Oers, van, 2003) |
|           |                                                      |                                                                       | 26,8                        | (Ecoinvent v3.7.1)                  |
| Sn        | Tin, commercial purity, Grade A                      | 11,8 - 13                                                             | 14,47                       | (Hammond and Jones, 2008)           |
|           |                                                      |                                                                       | 10,2                        | (Ecoinvent v3.7.1)                  |
| Zn        | Zinc, commercial purity, rolled                      | 3,53 - 3,89                                                           | 3,3                         | (Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007) |
|           |                                                      |                                                                       | 4,6                         | (Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007) |
|           |                                                      |                                                                       | 4,18                        | (Hammond and Jones, 2008)           |
|           |                                                      |                                                                       | 2,76                        | (Ecoinvent v3.7.1)                  |

## Datenbasis Granta Selector (Teil 2)

| Werkstoff  | Genaue Bezeichnung                                                | CO <sub>2</sub> footprint, primary production<br>(virgin grade) kg/kg | Wert in der Quelle<br>kg/kg                | Quelle                                                                                                                                                                                                      |
|------------|-------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <i>Sr</i>  | <i>kein Material gewählt</i>                                      |                                                                       |                                            |                                                                                                                                                                                                             |
| <i>Ba</i>  | <i>kein Material gewählt</i>                                      |                                                                       |                                            |                                                                                                                                                                                                             |
| <i>REE</i> | <i>kein Material gewählt</i>                                      |                                                                       |                                            |                                                                                                                                                                                                             |
| W          | Tungsten, commercial purity,<br>R07004, wire                      | 36,2 - 39,9                                                           | <i>ohne Quelle</i>                         | <i>ohne Quelle</i>                                                                                                                                                                                          |
| Mn         | Manganese, commercial purity                                      | 5,19 - 5,72                                                           | 3,93<br>5,52                               | (Voet, van der and Oers, van, 2003)<br>(Ecoinvent v3.7.1)                                                                                                                                                   |
| Ti         | Titanium, commercial purity,<br>Grade 1                           | 31,6 - 34,9                                                           | 25,6<br>32,2<br>42,8                       | (Hammond and Jones, 2008)<br>(Hammond and Jones, 2008)<br>(Hammond and Jones, 2008)                                                                                                                         |
| Co         | Cobalt, commercial purity >99.3 %Co,<br>cold worked, hard         | 41,2 - 45,4                                                           | 43,3                                       | (Ecoinvent v3.7.1)                                                                                                                                                                                          |
| Ta         | Tantalum, commercial purity, R05200,<br>cold worked, >99.7 % Ta   | 270 - 298                                                             | 284                                        | (Ecoinvent v3.7.1)                                                                                                                                                                                          |
| Mo         | Molybdenum, 360 grade, wire,<br>150µm dia.                        | 16,1 - 17,7                                                           | 16,9                                       | (Ecoinvent v3.7.1)                                                                                                                                                                                          |
| Zr         | Zirconium, commercial purity,<br>Zr702, (industrial grade)        | 98 - 108                                                              | 97,2                                       | (Hammond and Jones, 2008)                                                                                                                                                                                   |
| Au         | Gold, commercial purity, P00020,<br>cold worked, hard, min 99.5 % | 5,9e4 - 6,5e4                                                         | 35800<br>102000<br>48300                   | (AngloGold Ashanti, 2009 (2))<br>(Harmony, 2010)<br>(Ecoinvent v3.7.1)                                                                                                                                      |
| Ag         | Silver, commercial purity, fine,<br>cold worked, hard             | 431 - 475                                                             | 453                                        | (Ecoinvent v3.7.1)                                                                                                                                                                                          |
| Pd         | Palladium, commercial purity,<br>P03980, cold worked, hard        | 7,23e3 - 7,97e3                                                       | 3900<br>11300                              | (Voet, van der and Oers, van, 2003)<br>(Ecoinvent v3.7.1)                                                                                                                                                   |
| Nd         | Neodymium, commercial purity                                      | 4,8 - 5,28                                                            | <i>ohne Quelle</i>                         | <i>ohne Quelle</i>                                                                                                                                                                                          |
| Pr         | Praseodymium, commercial purity,<br>forged, hard                  | 40,3 - 44,4                                                           | <i>ohne Quelle</i>                         | <i>ohne Quelle</i>                                                                                                                                                                                          |
| In         | Indium, commercial purity,<br>min 99.97 %                         | 147 - 162                                                             | 154                                        | (Ecoinvent v2.2)                                                                                                                                                                                            |
| Pb         | Lead, Corroding                                                   | 2,03 - 2,24                                                           | 1,15<br>1,61<br>2,1<br>3,2<br>3,37<br>1,37 | (Voet, van der and Oers, van, 2003)<br>(Voet, van der and Oers, van, 2003)<br>(Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007)<br>(Norgate, Jahanshahi, Rankin, 2007)<br>(Hammond and Jones, 2008)<br>(Ecoinvent v3.7.1) |
| Sb         | Antimony, commercial purity<br>(Regulus)                          | 8,05 - 8,87                                                           | 8,46<br>2,76                               | (Ecoinvent v3.7.1)<br>(Ecoinvent v3.7.1)                                                                                                                                                                    |

## Datenbasis Granta Selector (Teil 3)

| Werkstoff | Genaue Bezeichnung                             | CO <sub>2</sub> footprint, primary production<br>(virgin grade) kg/kg | Wert in der Quelle<br>kg/kg | Quelle                 |
|-----------|------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------|-----------------------------|------------------------|
| ABS       | ABS ( <i>extrusion</i> )                       | 3,51 - 3,87                                                           | 3,32                        | (Kemna et al. 2005)    |
|           |                                                |                                                                       | 3,1                         | (PlasticsEurope, 2017) |
|           |                                                |                                                                       | 4,65                        | (Ecoinvent v3.7.1)     |
| PC        | PC (low viscosity,<br>molding and extrusion)   | 5,62 - 6,2                                                            | 5,39                        | (Kemna et al. 2005)    |
|           |                                                |                                                                       | 4,13                        | (PlasticsEurope, 2017) |
|           |                                                |                                                                       | 8,21                        | (Ecoinvent v3.7.1)     |
| (LP)DE    | PE-LD (molding and extrusion)                  | 1,98 - 2,19                                                           | 1,9                         | (Kemna et al. 2005)    |
|           |                                                |                                                                       | 1,87                        | (PlasticsEurope, 2017) |
|           |                                                |                                                                       | 2,49                        | (Ecoinvent v3.7.1)     |
| PP        | PP (random copolymer, high flow)               | 2,77 - 3,06                                                           | ohne Quelle                 | ohne Quelle            |
| PS        | PS (general purpose, 'crystal')                | 2,79 - 3,08                                                           | 2,79                        | (Kemna et al. 2005)    |
|           |                                                |                                                                       | 2,25                        | (PlasticsEurope, 2017) |
|           |                                                |                                                                       | 3,76                        | (Ecoinvent v3.7.1)     |
| EPS       | Expanded PS foam<br>(closed cell, 0.050)       | 2,25 - 2,49                                                           | 2,37                        | (PlasticsEurope, 2014) |
| PVC       | PVC (rigid, molding and extrusion)             | 2,21 - 2,44                                                           | 2,16                        | (Kemna et al. 2005)    |
|           |                                                |                                                                       | 1,99                        | (PlasticsEurope, 2017) |
|           |                                                |                                                                       | 2,56                        | (PlasticsEurope, 2017) |
|           |                                                |                                                                       | 2,58                        | (Ecoinvent v3.7.1)     |
| PA 6      | PA6 (molding and extrusion)                    | 8,05 - 8,88                                                           | 8,56                        | (Kemna et al. 2005)    |
|           |                                                |                                                                       | 6,7                         | (PlasticsEurope, 2017) |
|           |                                                |                                                                       | 9,33                        | (Ecoinvent v3.7.1)     |
|           |                                                |                                                                       | 9,27                        | (Ecoinvent v3.7.1)     |
| PMMA      | PMMA (molding and extrusion)                   | 5,88 - 6,48                                                           | 6                           | (Kemna et al. 2005)    |
|           |                                                |                                                                       | 3,75                        | (PlasticsEurope, 2017) |
|           |                                                |                                                                       | 8,78                        | (Ecoinvent v3.7.1)     |
| EDPM      | Ethylene propylene<br>(EPDM/EPM, unreinforced) | 3,25 - 3,59                                                           | ohne Quelle                 | ohne Quelle            |
| POM       | POM (homopolymer)                              | 3,04 - 3,36                                                           | 3,2                         | (PlasticsEurope, 2014) |
| Epoxy     | Epoxy resin (unfilled)                         | 5,69 - 6,27                                                           | 6,59                        | (Kemna et al. 2005)    |
|           |                                                |                                                                       | 8,1                         | (PlasticsEurope, 2017) |
|           |                                                |                                                                       | 5,1                         | (Spolchemie, 2016)     |
|           |                                                |                                                                       | 5,16                        | (Ecoinvent v3.7.1)     |
|           |                                                |                                                                       | 4,97                        | (Ecoinvent v3.7.1)     |
| Glass     | Soda borosilicate                              | 1,52 - 1,68                                                           | ohne Quelle                 | ohne Quelle            |

## A.1.8 EOL Strategien

### Smartphones und Notebooks

| Quelle                 | Smartphones           |                         |         | Notebooks                |              |                                       |
|------------------------|-----------------------|-------------------------|---------|--------------------------|--------------|---------------------------------------|
|                        | [Zink et al., 2014]   | [Welfens, 2013]         |         | [Van Eygen et al., 2016] |              |                                       |
| Besonderheit           | Verdrängungs-<br>rate | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | Prozent | Input, kg                | Recycled, kg | Material Weight<br>Recycling, Prozent |
| Refurbished Smartphone | 0,00                  | 7,03                    | 0,00    | 0,00                     | 0,00         | 0,00                                  |
| Primär Smartphone      | 0,05                  | -0,78                   | 0,00    | 0,00                     | 0,00         | 0,00                                  |
| Auswirkungen           | 0,00                  | 6,25                    | 0,00    | 0,00                     | 0,00         | 0,00                                  |
| Rückgabe               | 0,00                  | 0,00                    | 15,00   | 0,00                     | 0,00         | 0,00                                  |
| Aufbewahren            | 0,00                  | 0,00                    | 30,00   | 0,00                     | 0,00         | 0,00                                  |
| Weiterverkaufen        | 0,00                  | 0,00                    | 23,00   | 0,00                     | 0,00         | 0,00                                  |
| Hausmüll               | 0,00                  | 0,00                    | 2,00    | 0,00                     | 0,00         | 0,00                                  |
| Weiterverschenken      | 0,00                  | 0,00                    | 19,00   | 0,00                     | 0,00         | 0,00                                  |
| Recycling              | 0,00                  | 0,00                    | 5,00    | 0,00                     | 0,00         | 0,00                                  |
| Eisen                  | 0,00                  | 0,00                    | 0,00    | 142,00                   | 122,00       | 86,00                                 |
| Aluminium              | 0,00                  | 0,00                    | 0,00    | 84,40                    | 63,70        | 75,00                                 |
| Kupfer                 | 0,00                  | 0,00                    | 0,00    | 68,50                    | 58,40        | 85,00                                 |
| Seltene Erden          | 0,00                  | 0,00                    | 0,00    | 0,29                     | 0,18         | 63,00                                 |
| Andere Metalle         | 0,00                  | 0,00                    | 0,00    | 109,00                   | 98,20        | 90,00                                 |
| Kunststoffe            | 0,00                  | 0,00                    | 0,00    | 406,00                   | 51,40        | 13,00                                 |
| Organische Stoffe      | 0,00                  | 0,00                    | 0,00    | 0,87                     | 0,00         | 0,00                                  |
| Mineralien             | 0,00                  | 0,00                    | 0,00    | 126,00                   | 0,00         | 0,00                                  |
| Andere                 | 0,00                  | 0,00                    | 0,00    | 63,20                    | 0,00         | 0,00                                  |
| Gesamt                 | 0,00                  | 0,00                    | 0,00    | 1000,00                  | 394,00       | 39,00                                 |

### Weißwaren

| Quelle                    | Waschmaschinen                |                         |                         | Kühlschränke        |
|---------------------------|-------------------------------|-------------------------|-------------------------|---------------------|
|                           | [Rüdenauer und Prakash, 2020] |                         |                         | [Xiao et al., 2016] |
| Einheit                   | kg CO <sub>2</sub> -Äq.       | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | kg CO <sub>2</sub> -Äq. | Prozent             |
| Eisen                     | 0,00                          | 0,00                    | 0,00                    | 41,81               |
| Aluminium                 | 0,00                          | 0,00                    | 0,00                    | -0,98               |
| Kupfer                    | 0,00                          | 0,00                    | 0,00                    | -5,83               |
| Gesamt                    | 1779,00                       | 1289,00                 | 1230,00                 | 0,00                |
| Herstellung               | 979,00                        | 453,00                  | 360,00                  | 0,00                |
| Reparaturen               | 0,00                          | 16,00                   | 27,00                   | 0,00                |
| Nutzung - Stromverbrauch  | 728,00                        | 747,00                  | 771,00                  | 0,00                |
| Nutzung - Wasserverbrauch | 72,00                         | 72,00                   | 72,00                   | 0,00                |
| Transport                 | 0,00                          | 0,00                    | 0,00                    | 41,81               |
| HIPS Recycling            | 0,00                          | 0,00                    | 0,00                    | -16,54              |
| PUR Entsorgung            | 0,00                          | 0,00                    | 0,00                    | 9,24                |
| Stromverbrauch Entsorgung | 0,00                          | 0,00                    | 0,00                    | 6,08                |
| Kompressor Recycling      | 0,00                          | 0,00                    | 0,00                    | 1,71                |

## A Anhang

### Fahrzeuge

| Quelle<br>Besonderheit<br>Einheit | PKW                              |                     |         | Fahrräder                   |                         |
|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------|---------|-----------------------------|-------------------------|
|                                   | [Bhari et al., 2021]             | [Soo et al., 2017]  |         | [Mottschall, 2012]          |                         |
|                                   | Altauto in der EU<br>(Jahr 2014) | Altauto Recycling   |         | Rahmenmaterial<br>Aluminium | Rahmenmaterial<br>Stahl |
|                                   | Material kg<br>/ ELV             | Prozess kg<br>/ ELV | Prozent | kg CO <sub>2</sub> -Äq.     | kg CO <sub>2</sub> -Äq. |
| Eisen                             | 117,20                           | 0,00                | 99,97   | -4,90                       | -12,20                  |
| Aluminium                         | 0,00                             | 0,00                | 97,52   | -81,40                      | -23,90                  |
| Kupfer                            | 0,00                             | 0,00                | 91,76   | 0,00                        | 0,00                    |
| Kunststoffe                       | 3,60                             | 0,00                | 0,00    | 0,00                        | 0,00                    |
| Mineralien                        | 9,80                             | 0,00                | 79,40   | 0,00                        | 0,00                    |
| Andere                            | 40,60                            | 0,00                | 0,00    | 0,00                        | 0,00                    |
| Gesamt                            | 221,10                           | 0,00                | 0,00    | 0,00                        | 0,00                    |
| Re-Use                            | 0,00                             | 95,30               | 0,00    | 0,00                        | 0,00                    |
| Material-<br>rückgewinnung        | 0,00                             | 114,90              | 0,00    | 0,00                        | 0,00                    |
| Energie-<br>rückgewinnung         | 0,00                             | 8,10                | 0,00    | 0,00                        | 0,00                    |
| Entsorgung                        | 0,00                             | 2,80                | 0,00    | 0,00                        | 0,00                    |
| Reifen                            | 45,70                            | 0,00                | 1,94    | 0,00                        | 0,00                    |
| Katalysator                       | 4,30                             | 0,00                | 0,00    | 0,00                        | 0,00                    |
| Zn                                | 0,00                             | 0,00                | 98,24   | 0,00                        | 0,00                    |
| Pb                                | 0,00                             | 0,00                | 97,08   | 0,00                        | 0,00                    |
| PP                                | 0,00                             | 0,00                | 89,50   | 0,00                        | 0,00                    |
| PE                                | 0,00                             | 0,00                | 89,50   | 0,00                        | 0,00                    |
| PMMA                              | 0,00                             | 0,00                | 0,32    | 0,00                        | 0,00                    |
| ABS                               | 0,00                             | 0,00                | 83,36   | 0,00                        | 0,00                    |
| PET                               | 0,00                             | 0,00                | 0,40    | 0,00                        | 0,00                    |

### A.1.9 Kritische Rohstoffe

#### Kritische Rohstoffe (Absolut gewichtet)

|                | Quelle                                  | Besonderheit             | krit. Rohstoffe (g) | krit. Rohstoffe EU (g) | Seltene Erden (g) |
|----------------|-----------------------------------------|--------------------------|---------------------|------------------------|-------------------|
| Smartphones    | [Buchert, 2012]                         |                          | 6,71                | 6,37                   | 0,06              |
|                | [Bookhagen et al., 2020]                |                          | 53,54               | 17,40                  | 0,00              |
|                | [Manhart et al., 2016]                  |                          | 51,19               | 26,57                  | 0,06              |
| Notebooks      | [Trinh et al., 2023],                   |                          | 1665,23             | 271,07                 | 0,02              |
|                | [Deng et al., 2011]                     |                          | 6,25                | 5,58                   | 2,41              |
|                | [Kastanaki und Giannis, 2021]           |                          | 891,15              | 240,60                 | 0,00              |
| $\bar{x}$      | [Prakash et al., 2012]                  |                          | 335,82              | 72,35                  | 0,92              |
|                |                                         |                          | 617,67              | 113,79                 | 1,24              |
|                |                                         |                          |                     |                        |                   |
| Waschmaschinen | [Rüdenauer et al., 2007]                |                          | 38814,18            | 1530,11                | 0,00              |
| Kühlschränke   | [Xiao et al., 2015]                     |                          | 35589,99            | 1308,00                | 0,00              |
| $\bar{x}$      |                                         |                          | 37202,08            | 1419,06                | 0,00              |
|                |                                         |                          | 2279,85             | 157,06                 | 0,00              |
| PKW            | [Danilecki et al., 2017]                | VW Golf MK1              | 639678,40           | 15790,85               | 0,00              |
|                |                                         | VW Golf MK4              | 861017,78           | 31078,68               | 0,00              |
|                |                                         | VW Golf MK6              | 880406,72           | 35219,73               | 0,00              |
| Pedelecs       | [Mottschall, 2012],<br>[Del Duce, 2011] | Rahmenmaterial Aluminium | 15035,41            | 1170,34                | 0,00              |
|                |                                         | Rahmenmaterial Stahl     | 15035,41            | 1170,34                | 0,00              |
|                |                                         | Rahmenmaterial Aluminium | 12500,00            | 0,00                   | 0,00              |
| Fahrräder      | [Mottschall, 2012]                      | Rahmenmaterial Stahl     | 12500,00            | 0,00                   | 0,00              |
|                |                                         |                          | 348024,82           | 12061,42               | 0,00              |
|                |                                         |                          | 423983,45           | 15492,25               | 0,00              |
| $\bar{x}$      |                                         |                          |                     |                        |                   |
| s              |                                         |                          |                     |                        |                   |

Kritische Rohstoffe (Prozentual gewichtet)

|                | Quelle                                  | Besonderheit             | Prozentanteil krit. Rohstoffe | Prozentanteil krit. Rohstoffe EU | Prozentanteil seltene Erden |
|----------------|-----------------------------------------|--------------------------|-------------------------------|----------------------------------|-----------------------------|
| Smartphones    | [Buchert, 2012]                         |                          | 5,85                          | 5,56                             | 0,05                        |
|                | [Bookhagen et al., 2020]                |                          | 37,44                         | 12,17                            | 0,00                        |
|                | [Manhart et al., 2016]                  |                          | 31,99                         | 16,61                            | 0,04                        |
| Notebooks      | [Trinh et al., 2023],                   |                          | 44,07                         | 7,17                             | 0,00                        |
|                | [Deng et al., 2011]                     |                          |                               |                                  |                             |
|                | [Kastanaki und Giannis, 2021]           |                          | 1,42                          | 1,27                             | 0,55                        |
|                | [Prakash et al., 2012]                  |                          | 41,35                         | 11,16                            | 0,00                        |
| $\bar{x}$      |                                         |                          | 20,62                         | 7,06                             | 0,22                        |
| s              |                                         |                          | 19,70                         | 5,82                             | 0,28                        |
| Waschmaschinen | [Rüdenauer et al., 2007]                |                          | 47,59                         | 1,88                             | 0,00                        |
| Kühlschränke   | [Xiao et al., 2015]                     |                          | 74,01                         | 2,72                             | 0,00                        |
| $\bar{x}$      |                                         |                          | 60,80                         | 2,30                             | 0,00                        |
| s              |                                         |                          | 18,68                         | 0,60                             | 0,00                        |
| PKW            | [Danilecki et al., 2017]                | VW Golf MK1              | 88,78                         | 2,19                             | 0,00                        |
|                |                                         | VW Golf MK4              | 86,15                         | 3,11                             | 0,00                        |
|                |                                         | VW Golf MK6              | 83,54                         | 3,34                             | 0,00                        |
| Pedelecs       | [Mottschall, 2012],<br>[Del Duce, 2011] | Rahmenmaterial Aluminium | 71,97                         | 5,60                             | 0,00                        |
|                |                                         | Rahmenmaterial Stahl     | 71,97                         | 5,60                             | 0,00                        |
|                |                                         | Rahmenmaterial Aluminium | 73,53                         | 0,00                             | 0,00                        |
| Fahrräder      | [Mottschall, 2012]                      | Rahmenmaterial Stahl     | 73,53                         | 0,00                             | 0,00                        |
|                |                                         |                          |                               |                                  |                             |
|                |                                         |                          |                               |                                  |                             |
| $\bar{x}$      |                                         |                          | 78,50                         | 2,84                             | 0,00                        |
| s              |                                         |                          | 7,35                          | 2,31                             | 0,00                        |

### A.1.10 Fehlerquellen

#### Smartphones

| Quelle<br>Besonderheit<br>Einheit | [Thiemann und Schneider, 2020]   |                                 | [Statista Research Department, 2016] |       |
|-----------------------------------|----------------------------------|---------------------------------|--------------------------------------|-------|
|                                   | Stichprobengröße<br>2856 Schäden | Stichprobengröße<br>375 Schäden |                                      |       |
|                                   | Prozent                          | Prozent                         | $\bar{x}$                            | s     |
| Displayschaden                    | 69,60                            | 60,00                           | 64,80                                | 6,79  |
| Gehäuseschaden                    | 48,00                            | 0,00                            | 24,00                                | 33,94 |
| Akkuschaden                       | 34,70                            | 50,90                           | 42,80                                | 11,46 |
| Schaden an Anschlüssen            | 16,20                            | 0,00                            | 8,10                                 | 11,46 |
| Kameraschaden                     | 7,10                             | 10,10                           | 8,60                                 | 2,12  |
| Tasten/ Schalter defekt           | 0,00                             | 18,70                           | 9,35                                 | 13,22 |
| Wasserschaden                     | 0,00                             | 18,10                           | 9,05                                 | 12,80 |
| Lautsprecher defekt               | 0,00                             | 13,60                           | 6,80                                 | 9,62  |
| Mikrofon defekt                   | 0,00                             | 8,30                            | 4,15                                 | 5,87  |
| Sonstiges                         | 0,00                             | 2,40                            | 1,20                                 | 1,70  |

## A Anhang

### Waschmaschinen

| Einheit                 | [Bracquené et al., 2018]        |                                | $\bar{x}$ | s    |
|-------------------------|---------------------------------|--------------------------------|-----------|------|
|                         | Tecchio et al (2016)<br>Prozent | Test aankoop (2015)<br>Prozent |           |      |
| Tasten/ Schalter defekt | 4,00                            | 8,00                           | 6,00      | 2,83 |
| Wasserkreis             | 19,00                           | 29,60                          | 24,30     | 7,50 |
| Motor                   | 18,00                           | 5,50                           | 11,75     | 8,84 |
| Wascheinheit            | 16,00                           | 11,00                          | 13,50     | 3,54 |
| Elektrik                | 14,00                           | 5,50                           | 9,75      | 6,01 |
| Tür                     | 11,00                           | 11,80                          | 11,40     | 0,57 |
| Fremdobjekte            | 6,00                            | 0,00                           | 3,00      | 4,24 |
| Thermometer             | 3,00                            | 0,00                           | 1,50      | 2,12 |
| Druckkammer             | 2,00                            | 0,00                           | 1,00      | 1,41 |
| Waschmittelfach         | 2,00                            | 8,80                           | 5,40      | 4,81 |
| Kabel                   | 2,00                            | 0,00                           | 1,00      | 1,41 |
| Korrosion               | 0,00                            | 7,60                           | 3,80      | 5,37 |

## A.2 Ergebnisse der Clusteranalyse

### A.2.1 LCAs nach Phasen

#### Dendrogramm

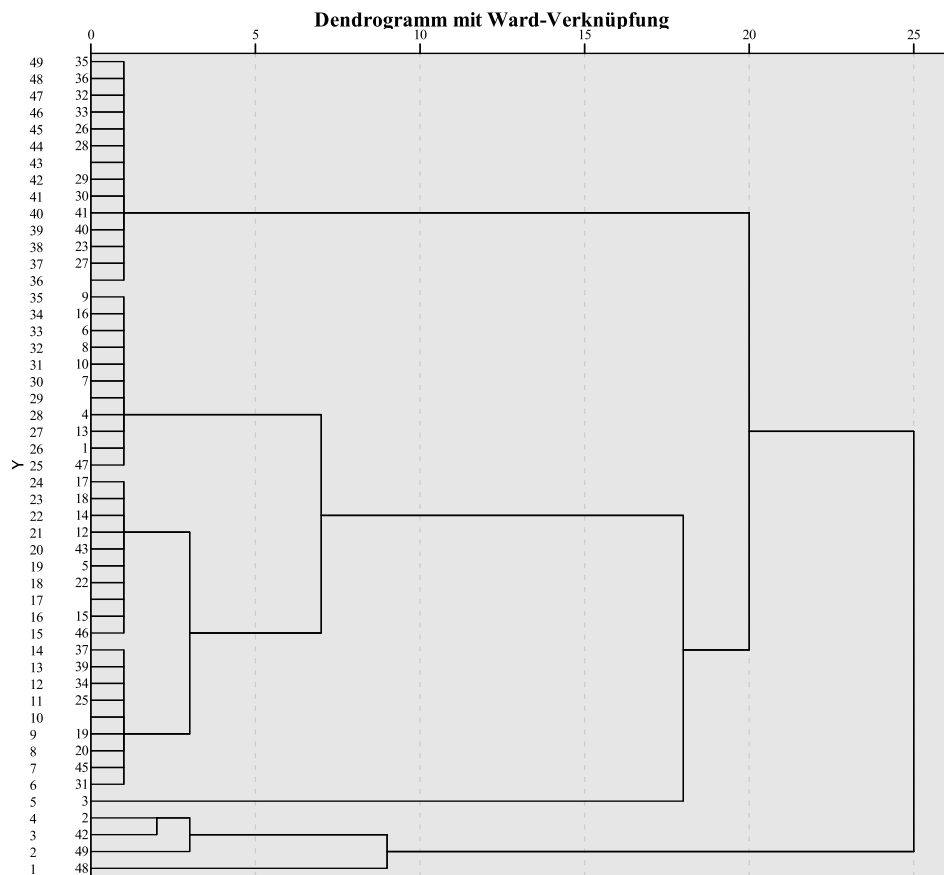


Abbildung A.1: Dendrogramm mit Ward-Verknüpfung der z-transformierten Werte für das Hauptmerkmal *LCAs nach Phasen*

## A Anhang

### Clusterzentren

| Anfängliche Clusterzentren           |          |          |          |          |          |          |
|--------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                      | Cluster  |          |          |          |          |          |
|                                      | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        |
| z-Faktorwert(Rohmaterialbeschaffung) | 5,29854  | 1,38035  | -0,25890 | 2,83875  | -0,34769 | -0,34769 |
| z-Faktorwert(Produktion)             | 0,24650  | -1,02135 | -1,62297 | 0,50033  | -1,27019 | 1,93697  |
| z-Faktorwert(Transport)              | -0,35252 | 0,64117  | 6,74915  | -0,35252 | -0,35252 | -0,30032 |
| z-Faktorwert(Nutzung)                | -1,51027 | -1,13646 | -1,09925 | -1,51027 | 1,66377  | -1,26184 |
| z-Faktorwert(EOL)                    | -5,94946 | 0,12745  | 0,29432  | -2,66151 | 0,02297  | 0,13196  |

| Clusterzentren der endgültigen Lösung |          |          |          |          |          |          |
|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                       | Cluster  |          |          |          |          |          |
|                                       | 1        | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        |
| z-Faktorwert(Rohmaterialbeschaffung)  | 5,29854  | 0,68268  | -0,25890 | 2,83875  | -0,27134 | -0,34769 |
| z-Faktorwert(Produktion)              | 0,24650  | -0,50627 | -1,62297 | 0,50033  | -0,71862 | 1,02252  |
| z-Faktorwert(Transport)               | -0,35252 | 0,63912  | 6,74915  | -0,35252 | -0,32620 | -0,00615 |
| z-Faktorwert(Nutzung)                 | -1,51027 | -0,23532 | -1,09925 | -1,51027 | 0,97211  | -0,75129 |
| z-Faktorwert(EOL)                     | -5,94946 | -0,46335 | 0,29432  | -2,66151 | 0,14631  | 0,31462  |

### ANOVA Tabelle

| ANOVA                                |                     |    |                     |    |         |       |  |
|--------------------------------------|---------------------|----|---------------------|----|---------|-------|--|
|                                      | Cluster             |    | Fehler              |    | F       | Sig.  |  |
|                                      | Mittel der Quadrate | df | Mittel der Quadrate | df |         |       |  |
| z-Faktorwert(Rohmaterialbeschaffung) | 8,390               | 5  | 0,125               | 43 | 67,275  | 0,000 |  |
| z-Faktorwert(Produktion)             | 7,143               | 5  | 0,342               | 43 | 20,865  | 0,000 |  |
| z-Faktorwert(Transport)              | 9,972               | 5  | 0,043               | 43 | 233,005 | 0,000 |  |
| z-Faktorwert(Nutzung)                | 7,653               | 5  | 0,180               | 43 | 42,454  | 0,000 |  |
| z-Faktorwert(EOL)                    | 9,157               | 5  | 0,131               | 43 | 69,709  | 0,000 |  |

Clusterzuordnung

| Anzahl der Fälle in jedem Cluster |    |
|-----------------------------------|----|
| Cluster                           | 1  |
|                                   | 2  |
|                                   | 3  |
|                                   | 4  |
|                                   | 5  |
|                                   | 6  |
| Gültig                            | 49 |
| Fehlend                           | 0  |

## A Anhang

### Clusterzuordnung zu Quellen

| Produktgruppe  | Quelle                        | Besonderheit                             | Cluster |
|----------------|-------------------------------|------------------------------------------|---------|
| Smartphones    | [Sánchez et al., 2022]        |                                          | 6       |
| Smartphones    | [Cordella et al., 2021a]      |                                          | 2       |
| Smartphones    | [Ercan et al., 2016]          |                                          | 3       |
| Smartphones    | [Proske et al., 2020]         |                                          | 6       |
| Smartphones    | [Apple, 2025]                 | iPhone 4                                 | 6       |
| Smartphones    | [Apple, 2025]                 | iPhone 6                                 | 6       |
| Smartphones    | [Apple, 2025]                 | iPhone 8                                 | 6       |
| Smartphones    | [Apple, 2025]                 | iPhone X                                 | 6       |
| Smartphones    | [Apple, 2025]                 | iPhone 12                                | 6       |
| Smartphones    | [Apple, 2025]                 | iPhone 14                                | 6       |
| Smartphones    | [Apple, 2025]                 | iPhone 16                                | 6       |
| Notebooks      | [Bakker et al., 2014a]        | 1990                                     | 6       |
| Notebooks      | [Bakker et al., 2014a]        | 2010                                     | 6       |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2016b]       | Notebook, langlebig                      | 6       |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2016b]       | Notebook, kurzlebig                      | 6       |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2016b]       |                                          | 6       |
| Notebooks      | [O'Connell und Stutz, 2010]   | US                                       | 6       |
| Notebooks      | [O'Connell und Stutz, 2010]   | EU                                       | 6       |
| Notebooks      | [O'Connell und Stutz, 2010]   | China                                    | 5       |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2012]        | EuP Lot3                                 | 5       |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2012]        | EcoInvent2.2                             | 6       |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2012]        | UBA-FuE Vorhaben + EcoInvent 2.2         | 6       |
| Waschmaschinen | [Gensch und Blepp, 2015]      |                                          | 5       |
| Waschmaschinen | [Rüdenauer et al., 2007]      |                                          | 5       |
| Waschmaschinen | [Rüdenauer und Prakash, 2020] |                                          | 5       |
| Kühlschränke   | [Xiao et al., 2015]           |                                          | 5       |
| Kühlschränke   | [Skolaut, 2018]               |                                          | 5       |
| Kühlschränke   | [Steiner et al., 2005]        |                                          | 5       |
| PKW            | [Buberger et al., 2022]       | VW Passat 2.0 TSI                        | 5       |
| PKW            | [Buberger et al., 2022]       | Mercedes-Benz C300d                      | 5       |
| PKW            | [Buberger et al., 2022]       | Tesla Model 3 SP                         | 5       |
| PKW            | [Bieker, 2021]                | small, gasoline + biofuels               | 5       |
| PKW            | [Bieker, 2021]                | small, diesel + biofuels                 | 5       |
| PKW            | [Bieker, 2021]                | small, battery ev, 2021 - 2038 grid mix  | 6       |
| PKW            | [Bieker, 2021]                | medium, gasoline + biofuels              | 5       |
| PKW            | [Bieker, 2021]                | medium, diesel + biofuels                | 5       |
| PKW            | [Bieker, 2021]                | medium, battery ev, 2021 - 2038 grid mix | 5       |
| PKW            | [Pero et al., 2018]           | ICEV (KG CO2 eq.)                        | 5       |
| PKW            | [Pero et al., 2018]           | BEV (KG CO2 EQ)                          | 5       |
| PKW            | [Kanz et al., 2018]           | e-Smart                                  | 5       |
| PKW            | [Kanz et al., 2018]           | Benzin-Smart                             | 5       |
| Pedelects      | [Eckart et al., 2022]         |                                          | 2       |
| Pedelects      | [Rüdenauer und Prakash, 2020] | 4 J. (Kurze Nutzungsdauer                | 6       |
| Pedelects      | [Rüdenauer und Prakash, 2020] | 10 J. (Durchschnittliche Nutzungsdauer   | 5       |
| Pedelects      | [Rüdenauer und Prakash, 2020] | 15 J. Verlängerte Nutzungsdauer          | 5       |
| Pedelects      | [Riese & Müller, 2025]        |                                          | 6       |
| Fahrräder      | [Chang et al., 2012]          |                                          | 6       |
| Fahrräder      | [Mottschall, 2012]            | Rahmenmaterial Aluminium                 | 1       |
| Fahrräder      | [Mottschall, 2012]            | Rahmenmaterial Stahl                     | 4       |

## A.2.2 LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen (metrisch)

### Dendrogramm

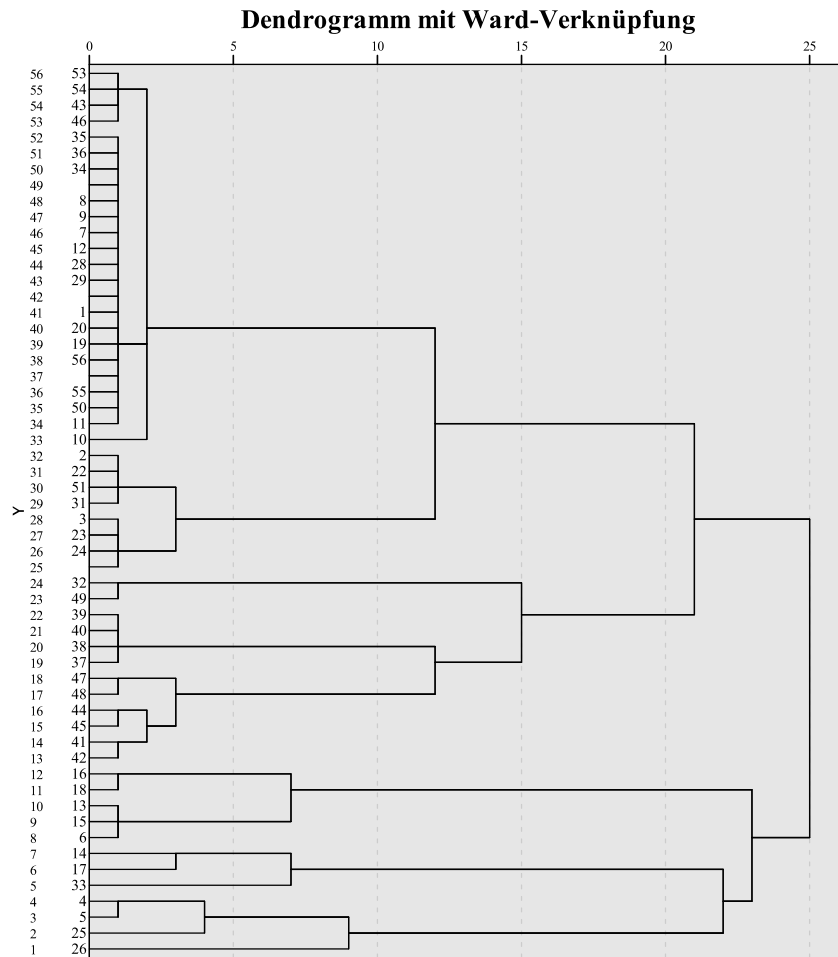


Abbildung A.2: Dendrogramm für die metrisch Werte des Hauptmerkmals *LCIs* der *LCAs* nach *Phasen*

## A Anhang

### Clusterzentren (Teil 1)

|                                    | Anfängliche Clusterzentren            |          |          |          |          |          |          |
|------------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                    | Cluster                               |          |          |          |          |          |          |
|                                    | 1                                     | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        |
| z-Faktorwert(AnzahlEinheiten)      | -0,35506                              | -0,35506 | 4,00627  | -0,35506 | 0,55355  | -0,35506 | -0,35506 |
| z-Faktorwert(Lebensdauer)          | -0,38314                              | 1,83836  | 1,83836  | -0,38314 | -0,47571 | -0,38314 | -0,01289 |
| z-Faktorwert(ReparaturBatterie)    | 0,91995                               | -0,51109 | -0,51109 | -0,51109 | 0,91995  | -0,51109 | 3,78203  |
| z-Faktorwert(ReparaturDisplay)     | -0,27486                              | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 |
| z-Faktorwert(ReparaturAndere)      | 5,25268                               | 2,49071  | -0,27126 | -0,27126 | -0,27126 | -0,27126 | -0,27126 |
| z-Faktorwert(ReparaturHersteller)  | 3,57321                               | -0,27486 | -0,27486 | 3,57321  | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 |
| z-Faktorwert(ReparaturFachbetrieb) | -0,23578                              | -0,23578 | -0,23578 | -0,23578 | 4,16548  | -0,23578 | -0,23578 |
| z-Faktorwert(ReparaturNutzer)      | -0,31030                              | -0,31030 | -0,31030 | -0,31030 | -0,31030 | 3,16510  | -0,31030 |
| z-Faktorwert(Energieverbrauch)     | -0,38499                              | 1,09129  | 1,09129  | -0,42893 | -0,43257 | -0,42893 | -0,38499 |
|                                    | Clusterzentren der endgültigen Lösung |          |          |          |          |          |          |
|                                    | Cluster                               |          |          |          |          |          |          |
|                                    | 1                                     | 2        | 3        | 4        | 5        | 6        | 7        |
| z-Faktorwert(AnzahlEinheiten)      | -0,35506                              | -0,22887 | 4,55143  | -0,35506 | 0,55355  | 0,02353  | -0,35506 |
| z-Faktorwert(Lebensdauer)          | -0,38314                              | 2,33203  | 1,37555  | -0,38314 | -0,47571 | -0,44485 | 0,26480  |
| z-Faktorwert(ReparaturBatterie)    | 0,91995                               | -0,51109 | -0,51109 | -0,51109 | 0,91995  | 0,44294  | 2,70875  |
| z-Faktorwert(ReparaturDisplay)     | -0,27486                              | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 |
| z-Faktorwert(ReparaturAndere)      | 5,25268                               | 0,41923  | -0,27126 | -0,27126 | -0,27126 | -0,27126 | -0,27126 |
| z-Faktorwert(ReparaturHersteller)  | 3,57321                               | -0,27486 | -0,27486 | 3,57321  | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 |
| z-Faktorwert(ReparaturFachbetrieb) | -0,23578                              | -0,23578 | -0,23578 | -0,23578 | 4,16548  | -0,23578 | -0,23578 |
| z-Faktorwert(ReparaturNutzer)      | -0,31030                              | -0,31030 | -0,31030 | -0,31030 | -0,31030 | 3,16510  | -0,31030 |
| z-Faktorwert(Energieverbrauch)     | -0,38499                              | 0,64140  | 0,31197  | -0,42893 | -0,43257 | -0,43136 | -0,29532 |

## Clusterzentren (Teil 2)

|                                    | Anfängliche Clusterzentren |          |          |          |          |          |
|------------------------------------|----------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                    | Cluster                    |          |          |          |          |          |
|                                    | 8                          | 9        | 10       | 11       | 12       | 13       |
| z-Faktorwert(AnzahlEinheiten)      | -0,35506                   | 0,55355  | -0,35506 | -0,35506 | 0,55355  | 1,46216  |
| z-Faktorwert(Lebensdauer)          | -0,38314                   | -0,47571 | 0,07967  | -0,38314 | -0,47571 | 0,91273  |
| z-Faktorwert(ReparaturBatterie)    | 0,91995                    | -0,51109 | -0,51109 | -0,51109 | -0,51109 | 2,35099  |
| z-Faktorwert(ReparaturDisplay)     | 3,57321                    | 3,57321  | -0,27486 | -0,27486 | 3,57321  | -0,27486 |
| z-Faktorwert(ReparaturAndere)      | -0,27126                   | -0,27126 | -0,27126 | -0,27126 | -0,27126 | 3,87169  |
| z-Faktorwert(ReparaturHersteller)  | 3,57321                    | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 |
| z-Faktorwert(ReparaturFachbetrieb) | -0,23578                   | -0,23578 | -0,23578 | -0,23578 | 4,16548  | 4,16548  |
| z-Faktorwert(ReparaturNutzer)      | -0,31030                   | 3,16510  | -0,31030 | -0,31030 | -0,31030 | -0,31030 |
| z-Faktorwert(Energieverbrauch)     | -0,38499                   | -0,43257 | -0,49580 | 3,15577  | -0,43257 | -0,46734 |

|                                    | Clusterzentren der endgültigen Lösung |          |          |          |          |          |
|------------------------------------|---------------------------------------|----------|----------|----------|----------|----------|
|                                    | Cluster                               |          |          |          |          |          |
|                                    | 8                                     | 9        | 10       | 11       | 12       | 13       |
| z-Faktorwert(AnzahlEinheiten)      | -0,35506                              | 0,21282  | -0,22401 | -0,35506 | 0,55355  | 1,46216  |
| z-Faktorwert(Lebensdauer)          | -0,38314                              | -0,47571 | -0,40522 | -0,38314 | -0,47571 | 0,91273  |
| z-Faktorwert(ReparaturBatterie)    | 0,91995                               | -0,51109 | -0,29093 | -0,51109 | -0,51109 | 2,35099  |
| z-Faktorwert(ReparaturDisplay)     | 3,57321                               | 3,57321  | -0,27486 | -0,27486 | 3,57321  | -0,27486 |
| z-Faktorwert(ReparaturAndere)      | -0,27126                              | -0,27126 | -0,21815 | -0,27126 | -0,27126 | 3,87169  |
| z-Faktorwert(ReparaturHersteller)  | 3,57321                               | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 | -0,27486 |
| z-Faktorwert(ReparaturFachbetrieb) | -0,23578                              | -0,23578 | -0,23578 | -0,23578 | 4,16548  | 4,16548  |
| z-Faktorwert(ReparaturNutzer)      | -0,31030                              | 3,16510  | -0,31030 | -0,31030 | -0,31030 | -0,31030 |
| z-Faktorwert(Energieverbrauch)     | -0,38499                              | -0,43257 | -0,39551 | 3,15577  | -0,43257 | -0,46734 |

## A Anhang

### ANOVA Tabelle

|                                    | ANOVA               |    |                     |    |           |       |
|------------------------------------|---------------------|----|---------------------|----|-----------|-------|
|                                    | Cluster             |    | Fehler              |    | F         | Sig.  |
|                                    | Mittel der Quadrate | df | Mittel der Quadrate | df |           |       |
| z-Faktorwert(AnzahlEinheiten)      | 3,950               | 12 | 0,179               | 41 | 22,056    | 0,000 |
| z-Faktorwert(Lebensdauer)          | 3,700               | 12 | 0,214               | 41 | 17,304    | 0,000 |
| z-Faktorwert(ReparaturBatterie)    | 3,719               | 12 | 0,240               | 41 | 15,507    | 0,000 |
| z-Faktorwert(ReparaturDisplay)     | 4,570               | 12 | 0,000               | 41 | 3,296E+15 | 0,000 |
| z-Faktorwert(ReparaturAndere)      | 3,862               | 12 | 0,208               | 41 | 18,607    | 0,000 |
| z-Faktorwert(ReparaturHersteller)  | 4,570               | 12 | 0,000               | 41 | 1,319E+16 | 0,000 |
| z-Faktorwert(ReparaturFachbetrieb) | 4,574               | 12 | 0,000               | 41 | 2,932E+15 | 0,000 |
| z-Faktorwert(ReparaturNutzer)      | 4,567               | 12 | 0,000               | 41 | 1,882E+15 | 0,000 |
| z-Faktorwert(Energieverbrauch)     | 4,092               | 12 | 0,140               | 41 | 29,317    | 0,000 |

### Clusterzuordnung

| Anzahl der Fälle in jedem Cluster |    |
|-----------------------------------|----|
| 1                                 | 1  |
| 2                                 | 6  |
| 3                                 | 2  |
| 4                                 | 2  |
| 5                                 | 1  |
| 6                                 | 3  |
| Cluster 7                         | 4  |
| 8                                 | 1  |
| 9                                 | 2  |
| 10                                | 26 |
| 11                                | 4  |
| 12                                | 1  |
| 13                                | 1  |
| Gültig                            | 54 |
| Fehlend                           | 0  |

## Clusterzuordnung zu Quellen (Teil 1)

| Produktgruppe | Quelle                   | Szenario                         | Cluster |
|---------------|--------------------------|----------------------------------|---------|
| Smartphones   | [Sánchez et al., 2022]   | Low                              | 10      |
| Smartphones   | [Sánchez et al., 2022]   | Average                          | 10      |
| Smartphones   | [Sánchez et al., 2022]   | Intensive                        | 7       |
| Smartphones   | [Sánchez et al., 2022]   | Replacement                      | 4       |
| Smartphones   | [Sánchez et al., 2022]   | Replacement + Repair             | 4       |
| Smartphones   | [Sánchez et al., 2022]   | Replacement                      | 6       |
| Smartphones   | [Sánchez et al., 2022]   | Smartphone, package              | 10      |
| Smartphones   | [Sánchez et al., 2022]   | Smartphone, screwdriver, package | 10      |
| Smartphones   | [Sánchez et al., 2022]   | Smartphone, charger, package     | 10      |
| Smartphones   | [Cordella et al., 2021a] | Base                             | 10      |
| Smartphones   | [Cordella et al., 2021a] | EXT 1                            | 10      |
| Smartphones   | [Cordella et al., 2021a] | EXT 2                            | 10      |
| Smartphones   | [Cordella et al., 2021a] | BC1a                             | 6       |
| Smartphones   | [Cordella et al., 2021a] | BC1b                             | 5       |
| Smartphones   | [Cordella et al., 2021a] | BC2                              | 6       |
| Smartphones   | [Cordella et al., 2021a] | DC1a                             | 9       |
| Smartphones   | [Cordella et al., 2021a] | DC1b                             | 12      |
| Smartphones   | [Cordella et al., 2021a] | DC2                              | 9       |
| Smartphones   | [Ercan et al., 2016]     | Heavy                            | 10      |
| Smartphones   | [Ercan et al., 2016]     | Representative                   | 10      |
| Smartphones   | [Ercan et al., 2016]     | Light                            | 10      |
| Smartphones   | [Proske et al., 2020]    | Low                              | 10      |
| Smartphones   | [Proske et al., 2020]    | Average                          | 7       |
| Smartphones   | [Proske et al., 2020]    | Intensive                        | 7       |
| Smartphones   | [Proske et al., 2020]    | A                                | 8       |
| Smartphones   | [Proske et al., 2020]    | B                                | 1       |

## A Anhang

### Clusterzuordnung zu Quellen (Teil 2)

| Produktgruppe  | Quelle                        | Szenario                                         | Cluster |
|----------------|-------------------------------|--------------------------------------------------|---------|
| Notebooks      | [Prakash et al., 2016b]       | 1                                                | 10      |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2016b]       | 2                                                | 10      |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2016b]       | 3                                                | 10      |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2016b]       | 4                                                | 10      |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2016b]       |                                                  | 10      |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2016b]       |                                                  | 3       |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2016b]       |                                                  | 13      |
| Notebooks      | [O'Connell und Stutz, 2010]   | US                                               | 10      |
| Notebooks      | [O'Connell und Stutz, 2010]   | Europe                                           | 10      |
| Notebooks      | [O'Connell und Stutz, 2010]   | China                                            | 10      |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2012]        | 1                                                | 11      |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2012]        | 2                                                | 11      |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2012]        | 3                                                | 11      |
| Notebooks      | [Prakash et al., 2012]        | 4                                                | 11      |
| Waschmaschinen | [Gensch und Blepp, 2015]      | Vorzeitiger Ersatz                               | 2       |
| Waschmaschinen | [Gensch und Blepp, 2015]      | Ökologisch optimale Lebensdauer                  | 2       |
| Waschmaschinen | [Rüdenauer et al., 2007]      | Baseline                                         | 10      |
| Waschmaschinen | [Rüdenauer et al., 2007]      | comparision: standard vs. large washing machines | 2       |
| Waschmaschinen | [Rüdenauer et al., 2007]      | optimal life span                                | 2       |
| Waschmaschinen | [Rüdenauer et al., 2007]      | substitution of machines in stock                | 10      |
| Waschmaschinen | [Rüdenauer und Prakash, 2020] | Status Quo                                       | 2       |
| Waschmaschinen | [Rüdenauer und Prakash, 2020] | verlängerte Lebens- bzw. Nutzungsdauer           | 2       |
| Waschmaschinen | [Rüdenauer und Prakash, 2020] | Alternatives Szenario                            | 3       |
| Pedelects      | [Rüdenauer und Prakash, 2020] | Kurze Lebensdauer                                | 10      |
| Pedelects      | [Rüdenauer und Prakash, 2020] | Durchschnittliche Lebensdauer                    | 10      |
| Pedelects      | [Rüdenauer und Prakash, 2020] | Verlängerte Lebensdauer                          | 7       |
| Fahrräder      | [Chang et al., 2012]          | Bamboo-frame                                     | 10      |
| Fahrräder      | [Chang et al., 2012]          | Aluminum-frame                                   | 10      |

### A.2.3 LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen (nominal)

#### Dendrogramm

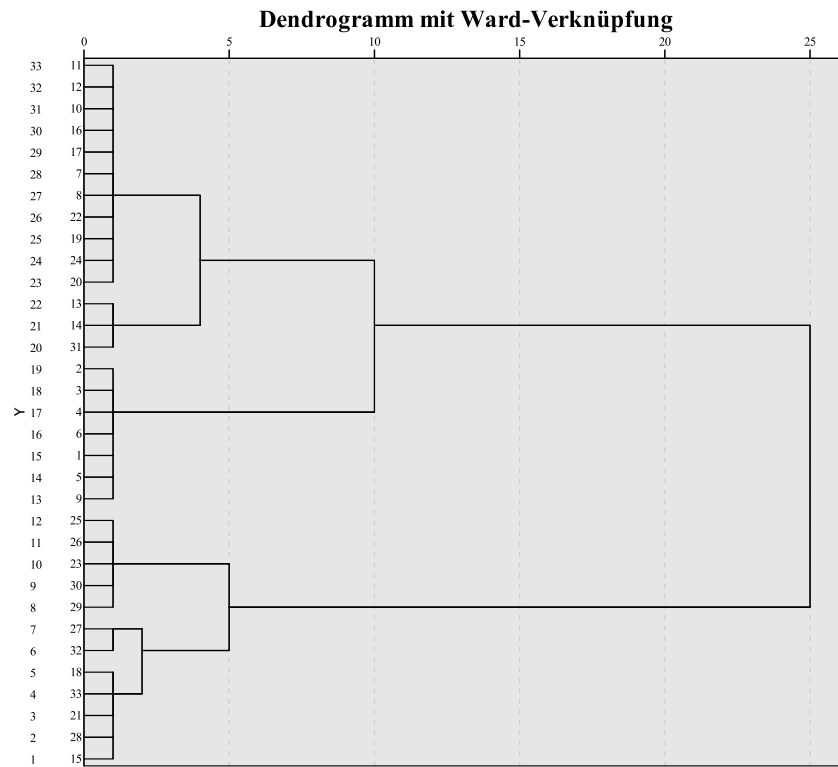


Abbildung A.3: Dendrogramm für die nominalskalierten Werte des Hauptmerkmals *LCIs der LCAs nach Phasen*

## Clusterzentren (Teil 1)

|                                       | Anfängliche Clusterzentren |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------|----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                       | 1                          | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| Rohmaterialbeschaffung                | 1                          | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 3  |
| Produktion                            | 1                          | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| Transport                             | 1                          | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| Nutzung                               | 1                          | 3  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| EOL                                   | 1                          | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| EOL Deponie                           | 0                          | 0  | 1  | 0  | 0  | 2  | 1  | 2  | 1  | 0  |
| EOL ReUse                             | 0                          | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 0  | 2  | 0  | 0  |
| EOL Recycle                           | 1                          | 0  | 1  | 0  | 0  | 2  | 0  | 2  | 1  | 1  |
| Primärdaten                           | 1                          | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  |
| GaBi Data                             | 1                          | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  |
| Idemat Database                       | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Umberto 4.2 Mix                       | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Oeko APC Kapitel                      | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| ProBas                                | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| EuP Los3                              | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| UBA FuE Vorhaben                      | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Fritsche et al 2003                   | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Boyano et al 2017                     | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Prakash et al 2016                    | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Ruedenauer et al 2020                 | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Mottschall et al 2012                 | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Stratmann et al 2019                  | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Merida 2012                           | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| GEMIS Daten                           | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| SMARD Daten                           | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Statistisches Bundesamt               | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| EduPack Data                          | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Modellierung ganze Komponente Primaer | 1                          | 1  | 2  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 2  |
| Modellierung anhand Werkstoffangaben  | 1                          | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Generische Datasets                   | 1                          | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Proxies                               | 0                          | 0  | 2  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  |
| Modellierungssoftware                 | 4                          | 4  | 11 | 4  | 4  | 12 | 2  | 2  | 4  | 4  |
| Herstellungsort                       | 2                          | 2  | 15 | 2  | 2  | 2  | 14 | 14 | 2  | 14 |
| Zielort                               | 17                         | 17 | 16 | 17 | 17 | 2  | 17 | 17 | 15 | 17 |
| Summe ecoinvent 3                     | 1                          | 1  | 8  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 2  |

## Clusterzentren (Teil 2)

|                                       | Anfängliche Clusterzentren |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------|----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                       | 11                         | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Rohmaterialbeschaffung                | 3                          | 3  | 1  | 1  | 2  | 3  | 3  | 1  | 1  | 1  |
| Produktion                            | 1                          | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Transport                             | 1                          | 0  | 3  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Nutzung                               | 1                          | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| EOL                                   | 1                          | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| EOL Deponie                           | 0                          | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| EOL ReUse                             | 0                          | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| EOL Recycle                           | 0                          | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Primärdaten                           | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  |
| GaBi Data                             | 1                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  |
| Idemat Database                       | 0                          | 0  | 2  | 2  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Umberto 4.2 Mix                       | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| Oeko APC Kapitel                      | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| ProBas                                | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| EuP Los3                              | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| UBA FuE Vorhaben                      | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Fritsche et al 2003                   | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| Boyano et al 2017                     | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Prakash et al 2016                    | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Ruedenauer et al 2020                 | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Mottschall et al 2012                 | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Stratmann et al 2019                  | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Merida 2012                           | 0                          | 1  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| GEMIS Daten                           | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| SMARD Daten                           | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Statistisches Bundesamt               | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Edupack Data                          | 0                          | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Modellierung ganze Komponente Primaer | 2                          | 0  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 0  | 1  | 2  |
| Modellierung anhand Werkstoffangaben  | 1                          | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 0  | 1  | 2  |
| Generische Datasets                   | 1                          | 0  | 2  | 2  | 2  | 1  | 2  | 1  | 1  | 2  |
| Proxies                               | 2                          | 0  | 2  | 2  | 2  | 1  | 2  | 0  | 1  | 2  |
| Modellierungssoftware                 | 4                          | 2  | 2  | 2  | 2  | 5  | 2  | 2  | 6  | 7  |
| Herstellungsort                       | 14                         | 2  | 14 | 14 | 2  | 14 | 15 | 2  | 16 | 16 |
| Zielort                               | 17                         | 2  | 15 | 15 | 2  | 16 | 16 | 2  | 16 | 16 |
| Summe ecoinvent 3                     | 2                          | 0  | 8  | 8  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  |

## Clusterzentren (Teil 3)

|                                       | Anfängliche Clusterzentren |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------|----------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                       | 21                         | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Rohmaterialbeschaffung                | 2                          | 1  | 1  | 2  | 2  | 1  | 1  | 1  | 3  | 3  |
| Produktion                            | 1                          | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Transport                             | 0                          | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 2  | 1  | 0  |
| Nutzung                               | 1                          | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| EOL                                   | 0                          | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  |
| EOL Deponie                           | 2                          | 2  | 2  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  |
| EOL ReUse                             | 2                          | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 2  | 2  |
| EOL Recycle                           | 2                          | 2  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 2  | 2  |
| Primärdaten                           | 0                          | 1  | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 0  | 2  | 2  |
| GaBi Data                             | 0                          | 1  | 2  | 0  | 2  | 2  | 1  | 0  | 2  | 2  |
| Idemat Database                       | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Umberto 4.2 Mix                       | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Oeko APC Kapitel                      | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| ProBas                                | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 2  | 2  | 2  |
| EuP Los3                              | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| UBA FuE Vorhaben                      | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Fritsche et al 2003                   | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Boyano et al 2017                     | 1                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Prakash et al 2016                    | 1                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Ruedenauer et al 2020                 | 1                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Mottschall et al 2012                 | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 1  |
| Stratmann et al 2019                  | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 1  |
| Merida 2012                           | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| GEMIS Daten                           | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 1  | 1  | 2  |
| SMARD Daten                           | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 1  | 2  | 2  |
| Statistisches Bundesamt               | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 1  | 2  | 2  |
| Edupack Data                          | 0                          | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Modellierung ganze Komponente Primaer | 2                          | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  |
| Modellierung anhand Werkstoffangaben  | 2                          | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  |
| Generische Datasets                   | 2                          | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  |
| Proxies                               | 2                          | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| Modellierungssoftware                 | 2                          | 4  | 2  | 8  | 2  | 2  | 9  | 2  | 10 | 2  |
| Herstellungsort                       | 2                          | 14 | 2  | 17 | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| Zielort                               | 2                          | 14 | 2  | 16 | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| Summe ecoinvent 3                     | 0                          | 0  | 8  | 0  | 8  | 8  | 0  | 0  | 8  | 8  |

## Clusterzentren der endgültigen Lösung (Teil 1)

|                                       | Clusterzentren der endgültigen Lösung |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------|---------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                       | 1                                     | 2  | 3  | 4  | 5  | 6  | 7  | 8  | 9  | 10 |
| Rohmaterialbeschaffung                | 1                                     | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 3  |
| Produktion                            | 1                                     | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| Transport                             | 1                                     | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| Nutzung                               | 1                                     | 3  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| EOL                                   | 1                                     | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  |
| EOL Deponie                           | 0                                     | 0  | 1  | 0  | 0  | 2  | 1  | 2  | 1  | 0  |
| EOL ReUse                             | 0                                     | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 0  | 2  | 0  | 0  |
| EOL Recycle                           | 1                                     | 0  | 1  | 0  | 0  | 2  | 0  | 2  | 1  | 1  |
| Primärdaten                           | 1                                     | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  |
| GaBi Data                             | 1                                     | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 0  | 0  | 1  | 1  |
| Idemat Database                       | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Umberto 4.2 Mix                       | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Oeko APC Kapitel                      | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| ProBas                                | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| EuP Los3                              | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| UBA FuE Vorhaben                      | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Fritsche et al 2003                   | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Boyano et al 2017                     | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Prakash et al 2016                    | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Ruedenauer et al 2020                 | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Mottschall et al 2012                 | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Stratmann et al 2019                  | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Merida 2012                           | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| GEMIS Daten                           | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| SMARD Daten                           | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Statistisches Bundesamt               | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Edupack Data                          | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Modellierung ganze Komponente Primaer | 1                                     | 1  | 2  | 1  | 1  | 0  | 0  | 0  | 1  | 2  |
| Modellierung anhand Werkstoffangaben  | 1                                     | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Generische Datasets                   | 1                                     | 1  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Proxies                               | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  |
| Modellierungssoftware                 | 4                                     | 4  | 11 | 4  | 4  | 12 | 2  | 2  | 4  | 4  |
| Herstellungsort                       | 2                                     | 2  | 15 | 2  | 2  | 2  | 14 | 14 | 2  | 14 |
| Zielort                               | 17                                    | 17 | 16 | 17 | 17 | 2  | 17 | 17 | 15 | 17 |
| Summe ecoinvent 3                     | 1                                     | 1  | 8  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 2  |

## Clusterzentren der endgültigen Lösung (Teil 2)

|                                       | Clusterzentren der endgültigen Lösung |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------|---------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                       | 11                                    | 12 | 13 | 14 | 15 | 16 | 17 | 18 | 19 | 20 |
| Rohmaterialbeschaffung                | 3                                     | 3  | 1  | 1  | 2  | 3  | 3  | 1  | 1  | 1  |
| Produktion                            | 1                                     | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Transport                             | 1                                     | 0  | 3  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Nutzung                               | 1                                     | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| EOL                                   | 1                                     | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| EOL Deponie                           | 0                                     | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  | 1  | 1  |
| EOL ReUse                             | 0                                     | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| EOL Recycle                           | 0                                     | 1  | 1  | 1  | 0  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Primärdaten                           | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 1  | 0  | 0  | 1  |
| GaBi Data                             | 1                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 1  | 0  | 1  |
| Idemat Database                       | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Umberto 4.2 Mix                       | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| Oeko APC Kapitel                      | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| ProBas                                | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 1  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| EuP Los3                              | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| UBA FuE Vorhaben                      | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Fritsche et al 2003                   | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 1  |
| Boyano et al 2017                     | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Prakash et al 2016                    | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Ruedenauer et al 2020                 | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Mottschall et al 2012                 | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Stratmann et al 2019                  | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Merida 2012                           | 0                                     | 1  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| GEMIS Daten                           | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| SMARD Daten                           | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Statistisches Bundesamt               | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Edupack Data                          | 0                                     | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  | 0  |
| Modellierung ganze Komponente Primaer | 2                                     | 0  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 0  | 1  | 2  |
| Modellierung anhand Werkstoffangaben  | 1                                     | 1  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 0  | 1  | 2  |
| Generische Datasets                   | 1                                     | 0  | 2  | 2  | 2  | 1  | 2  | 1  | 1  | 2  |
| Proxies                               | 2                                     | 0  | 2  | 2  | 2  | 1  | 2  | 0  | 1  | 2  |
| Modellierungssoftware                 | 4                                     | 2  | 2  | 2  | 2  | 5  | 2  | 2  | 6  | 7  |
| Herstellungsort                       | 14                                    | 2  | 14 | 14 | 2  | 14 | 15 | 2  | 16 | 16 |
| Zielort                               | 17                                    | 2  | 15 | 15 | 2  | 16 | 16 | 2  | 16 | 16 |
| Summe ecoinvent 3                     | 2                                     | 0  | 8  | 8  | 0  | 1  | 1  | 0  | 1  | 0  |

## Clusterzentren der endgültigen Lösung (Teil 3)

|                                       | Clusterzentren der endgültigen Lösung |    |    |    |    |    |    |    |    |    |
|---------------------------------------|---------------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|----|
|                                       | 21                                    | 22 | 23 | 24 | 25 | 26 | 27 | 28 | 29 | 30 |
| Rohmaterialbeschaffung                | 2                                     | 1  | 1  | 2  | 2  | 1  | 1  | 1  | 3  | 3  |
| Produktion                            | 1                                     | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| Transport                             | 0                                     | 1  | 0  | 1  | 1  | 0  | 0  | 2  | 1  | 0  |
| Nutzung                               | 1                                     | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  |
| EOL                                   | 0                                     | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 1  | 0  |
| EOL Deponie                           | 2                                     | 2  | 2  | 1  | 1  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  |
| EOL ReUse                             | 2                                     | 2  | 2  | 0  | 0  | 0  | 0  | 2  | 2  | 2  |
| EOL Recycle                           | 2                                     | 2  | 2  | 1  | 1  | 1  | 1  | 2  | 2  | 2  |
| Primärdaten                           | 0                                     | 1  | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 0  | 2  | 2  |
| GaBi Data                             | 0                                     | 1  | 2  | 0  | 2  | 2  | 1  | 0  | 2  | 2  |
| Idemat Database                       | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Umberto 4.2 Mix                       | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Oeko APC Kapitel                      | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| ProBas                                | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 2  | 2  | 2  |
| EuP Los3                              | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| UBA FuE Vorhaben                      | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Fritsche et al 2003                   | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Boyano et al 2017                     | 1                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Prakash et al 2016                    | 1                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Ruedenauer et al 2020                 | 1                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Mottschall et al 2012                 | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 1  |
| Stratmann et al 2019                  | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 1  |
| Merida 2012                           | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| GEMIS Daten                           | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 1  | 1  | 2  |
| SMARD Daten                           | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 1  | 2  | 2  |
| Statistisches Bundesamt               | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 1  | 2  | 2  |
| Edupack Data                          | 0                                     | 0  | 2  | 0  | 2  | 2  | 0  | 0  | 2  | 2  |
| Modellierung ganze Komponente Primaer | 2                                     | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  |
| Modellierung anhand Werkstoffangaben  | 2                                     | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  |
| Generische Datasets                   | 2                                     | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  |
| Proxies                               | 2                                     | 2  | 2  | 1  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| Modellierungssoftware                 | 2                                     | 4  | 2  | 8  | 2  | 2  | 9  | 2  | 10 | 2  |
| Herstellungsort                       | 2                                     | 14 | 2  | 17 | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| Zielort                               | 2                                     | 14 | 2  | 16 | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  | 2  |
| Summe ecoinvent 3                     | 0                                     | 0  | 8  | 0  | 8  | 8  | 0  | 0  | 8  | 8  |

## A Anhang

### ANOVA Tabelle

|                                       | ANOVA               |    | Fehler              |    | F | Sig. |
|---------------------------------------|---------------------|----|---------------------|----|---|------|
|                                       | Cluster             |    |                     |    |   |      |
|                                       | Mittel der Quadrate | df | Mittel der Quadrate | df |   |      |
| Rohmaterialbeschaffung                | ,899                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Produktion                            | ,033                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Transport                             | ,397                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Nutzung                               | ,378                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| EOL                                   | ,121                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| EOL Deponie                           | ,767                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| EOL ReUse                             | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| EOL Recycle                           | ,585                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Primärdaten                           | ,652                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| GaBi Data                             | ,617                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Idemat Database                       | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Umberto 4.2 Mix                       | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Oeko APC Kapitel                      | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| ProBas                                | ,899                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| EuP Los3                              | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| UBA FuE Vorhaben                      | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Fritsche et al 2003                   | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Boyano et al 2017                     | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Prakash et al 2016                    | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Ruedenauer et al 2020                 | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Mottschall et al 2012                 | ,765                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Stratmann et al 2019                  | ,765                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Merida 2012                           | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| GEMIS Daten                           | ,767                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| SMARD Daten                           | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Statistisches Bundesamt               | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| EduPack Data                          | ,836                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Modellierung ganze Komponente Primaer | ,585                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Modellierung anhand Werkstoffangaben  | ,309                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Generische Datasets                   | ,341                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Proxies                               | ,792                | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Modellierungssoftware                 | 8,899               | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Herstellungsort                       | 44,884              | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Zielort                               | 54,301              | 29 | ,000                | 3  | . | .    |
| Summe ecoinvent 3                     | 11,592              | 29 | ,000                | 3  | . | .    |

## Clusterzuordnung

| Anzahl der Fälle in jedem Cluster |    |    |
|-----------------------------------|----|----|
| Cluster                           | 1  | 1  |
|                                   | 2  | 2  |
|                                   | 3  | 1  |
|                                   | 4  | 2  |
|                                   | 5  | 1  |
|                                   | 6  | 1  |
|                                   | 7  | 1  |
|                                   | 8  | 1  |
|                                   | 9  | 1  |
|                                   | 10 | 1  |
|                                   | 11 | 2  |
|                                   | 12 | 1  |
|                                   | 13 | 1  |
|                                   | 14 | 1  |
|                                   | 15 | 1  |
|                                   | 16 | 1  |
|                                   | 17 | 1  |
|                                   | 18 | 1  |
|                                   | 19 | 1  |
|                                   | 20 | 1  |
|                                   | 21 | 1  |
|                                   | 22 | 1  |
|                                   | 23 | 1  |
|                                   | 24 | 1  |
|                                   | 25 | 1  |
|                                   | 26 | 1  |
|                                   | 27 | 1  |
|                                   | 28 | 1  |
|                                   | 29 | 1  |
|                                   | 30 | 1  |
| Gültig                            |    | 33 |
| Fehlend                           |    | 0  |

## A.2.4 LCAs nach Werkstoffen

### Dendrogramm hoher Deponieanteil

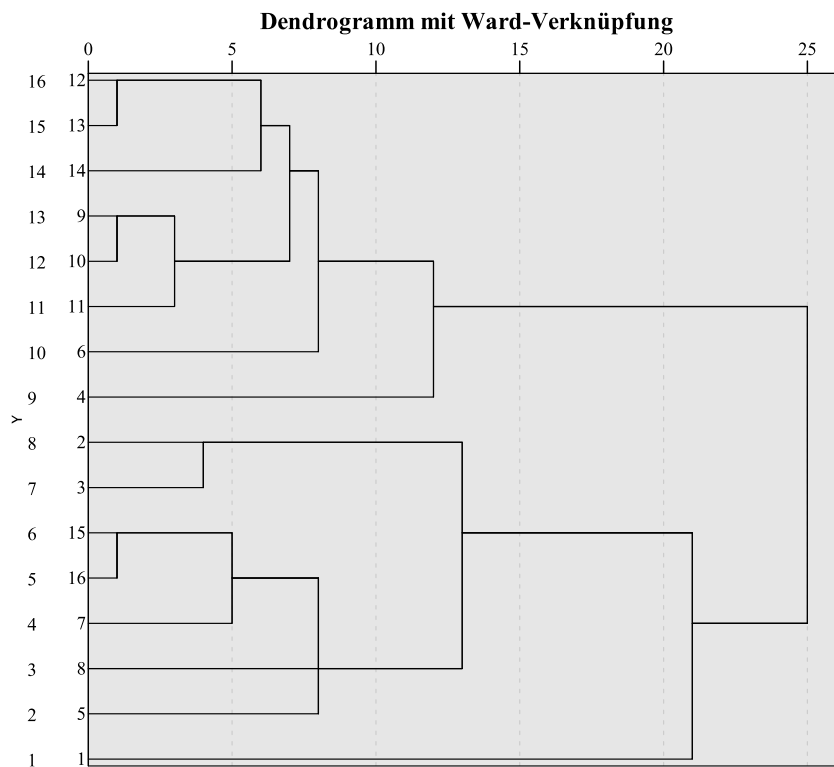


Abbildung A.4: Dendrogramm für die selbst berechneten Werte des Merkmals *LCAs nach Werkstoffen* mit reinem Deponieanteil

### Dendrogramm hoher Recyclinganteil

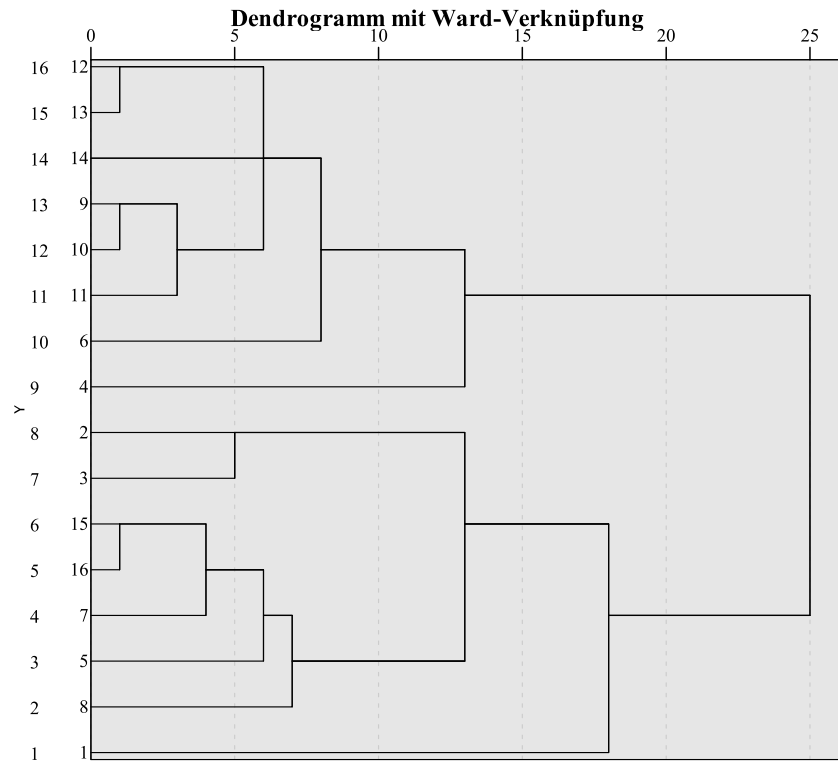


Abbildung A.5: Dendrogramm für die selbst berechneten Werte des Merkmals *LCA*s nach Werkstoffen mit möglichst großem Recyclinganteil

**Anfängliche Clusterzentren (Teil 1)**

|                     | Anfängliche Clusterzentren |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 1                          | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| z-Faktorwert(Fe)    | -0,77                      | -0,78 | -0,78 | -0,59 | -0,76 | -0,01 | 2,87  | 1,15  |
| z-Faktorwert(Si)    | 0,15                       | -0,90 | -0,90 | -0,90 | -0,67 | 0,84  | -0,90 | -0,90 |
| z-Faktorwert(Mg)    | 1,93                       | -0,45 | 1,32  | -0,45 | 2,62  | -0,45 | -0,45 | -0,45 |
| z-Faktorwert(Al)    | -0,85                      | -0,88 | -0,78 | -0,20 | -0,86 | -0,08 | -0,88 | -0,11 |
| z-Faktorwert(Cu)    | -0,83                      | -1,02 | -0,60 | 1,41  | -0,76 | 0,46  | -1,02 | 2,16  |
| z-Faktorwert(Ni)    | 1,83                       | -0,94 | -0,94 | -0,61 | -0,72 | 0,82  | -0,94 | -0,94 |
| z-Faktorwert(Cr)    | 3,75                       | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Sn)    | -0,73                      | -1,03 | -0,45 | 0,34  | -0,52 | 0,74  | -1,03 | -1,03 |
| z-Faktorwert(Zn)    | -0,22                      | -0,89 | -0,89 | -0,85 | -0,66 | 1,02  | -0,89 | -0,89 |
| z-Faktorwert(W)     | 1,63                       | -0,35 | 3,26  | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 |
| z-Faktorwert(Mn)    | 3,75                       | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Ti)    | 3,75                       | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Co)    | -0,32                      | 3,40  | 1,35  | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 |
| z-Faktorwert(Ta)    | 3,36                       | -0,34 | 1,44  | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 |
| z-Faktorwert(Mo)    | 3,75                       | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Zr)    | 3,75                       | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Au)    | -1,08                      | 0,51  | -0,24 | 2,04  | -0,88 | 0,45  | -1,08 | -1,08 |
| z-Faktorwert(Ag)    | -0,99                      | 2,05  | 0,63  | 1,35  | -0,82 | 0,26  | -0,99 | -0,99 |
| z-Faktorwert(Pd)    | -1,02                      | 0,81  | -0,13 | 0,69  | -0,79 | 0,70  | -1,02 | -1,02 |
| z-Faktorwert(Nd)    | -0,36                      | 3,28  | 1,58  | -0,12 | -0,36 | -0,36 | -0,36 | -0,36 |
| z-Faktorwert(Pr)    | -0,35                      | 3,28  | 1,59  | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 |
| z-Faktorwert(In)    | -0,25                      | -0,25 | -0,24 | -0,25 | 3,75  | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Pb)    | -0,93                      | -0,93 | -0,93 | 0,21  | -0,74 | 0,47  | -0,93 | -0,93 |
| z-Faktorwert(Sb)    | -0,39                      | -0,39 | -0,39 | -0,39 | -0,01 | 2,57  | -0,39 | -0,39 |
| z-Faktorwert(ABS)   | -0,57                      | -0,57 | -0,57 | 2,96  | -0,23 | 1,32  | -0,57 | -0,57 |
| z-Faktorwert(PC)    | -0,29                      | -0,29 | -0,29 | 3,70  | 0,38  | -0,29 | -0,29 | -0,29 |
| z-Faktorwert(LDPE)  | -0,70                      | -0,70 | -0,70 | -0,70 | -0,19 | 0,49  | -0,70 | -0,70 |
| z-Faktorwert(PP)    | -0,61                      | -0,61 | -0,61 | -0,61 | -0,59 | 0,17  | -0,61 | -0,61 |
| z-Faktorwert(PS)    | -0,26                      | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | 3,75  |
| z-Faktorwert(EPS)   | -0,26                      | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,14 | -0,26 | -0,26 | 3,75  |
| z-Faktorwert(PVC)   | -0,30                      | -0,30 | -0,30 | -0,30 | -0,27 | -0,27 | -0,30 | 0,11  |
| z-Faktorwert(PA6)   | -0,63                      | -0,63 | -0,63 | -0,63 | 1,81  | -0,39 | -0,63 | -0,63 |
| z-Faktorwert(PMMA)  | -0,44                      | -0,44 | -0,44 | -0,44 | 1,92  | -0,44 | -0,44 | -0,44 |
| z-Faktorwert(EPDM)  | -0,25                      | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | 3,75  | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(POM)   | -0,25                      | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | 3,75  | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Epoxy) | -0,42                      | -0,42 | -0,42 | 3,68  | -0,37 | -0,12 | -0,42 | 0,07  |
| z-Faktorwert(Glas)  | -0,10                      | -0,67 | -0,67 | 0,75  | -0,24 | 0,21  | 3,12  | -0,67 |

## Anfängliche Clusterzentren (Teil 2)

|                     | Anfängliche Clusterzentren |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|----------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 9                          | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| z-Faktorwert(Fe)    | 0,55                       | 0,37  | 0,33  | -0,69 | -0,51 | -0,72 | -0,49 | 0,84  |
| z-Faktorwert(Si)    | 0,52                       | 0,55  | 0,50  | 1,58  | 2,05  | 0,79  | -0,90 | -0,90 |
| z-Faktorwert(Mg)    | -0,45                      | -0,45 | -0,45 | -0,45 | -0,45 | -0,45 | -0,45 | -0,45 |
| z-Faktorwert(Al)    | -0,18                      | -0,08 | 0,02  | 0,29  | -0,44 | 0,66  | 2,90  | 1,47  |
| z-Faktorwert(Cu)    | 0,38                       | 0,95  | 1,07  | -0,01 | 0,18  | -0,33 | -1,02 | -1,02 |
| z-Faktorwert(Ni)    | 0,32                       | 0,32  | 0,28  | 1,23  | 1,64  | 0,54  | -0,94 | -0,94 |
| z-Faktorwert(Cr)    | -0,25                      | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Sn)    | 0,48                       | 0,48  | 0,43  | 1,58  | 2,08  | 0,73  | -1,03 | -1,03 |
| z-Faktorwert(Zn)    | 0,52                       | 0,59  | 0,54  | 1,56  | 2,02  | 0,80  | -0,89 | -0,89 |
| z-Faktorwert(W)     | -0,35                      | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 |
| z-Faktorwert(Mn)    | -0,25                      | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Ti)    | -0,25                      | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Co)    | -0,34                      | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 |
| z-Faktorwert(Ta)    | -0,34                      | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 |
| z-Faktorwert(Mo)    | -0,25                      | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Zr)    | -0,25                      | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Au)    | 0,20                       | 0,20  | 0,15  | 1,08  | 1,49  | 0,42  | -1,08 | -1,08 |
| z-Faktorwert(Ag)    | 0,09                       | 0,07  | -0,91 | 0,82  | 1,16  | 0,25  | -0,99 | -0,99 |
| z-Faktorwert(Pd)    | 0,42                       | 0,43  | -1,02 | 1,44  | 1,90  | 0,67  | -1,02 | -1,02 |
| z-Faktorwert(Nd)    | -0,36                      | -0,36 | -0,36 | -0,36 | -0,36 | -0,36 | -0,36 | -0,36 |
| z-Faktorwert(Pr)    | -0,35                      | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 |
| z-Faktorwert(In)    | -0,25                      | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Pb)    | 0,83                       | 1,42  | 1,33  | 1,10  | 1,48  | 0,46  | -0,93 | -0,93 |
| z-Faktorwert(Sb)    | -0,39                      | -0,39 | -0,39 | -0,39 | -0,39 | 2,53  | -0,39 | -0,39 |
| z-Faktorwert(ABS)   | 0,49                       | 0,10  | 1,00  | -0,57 | -0,57 | -0,55 | -0,57 | -0,57 |
| z-Faktorwert(PC)    | -0,29                      | -0,29 | -0,28 | -0,29 | -0,29 | -0,29 | -0,29 | -0,29 |
| z-Faktorwert(LDPE)  | 0,50                       | -0,70 | 2,64  | 1,03  | 1,35  | 0,46  | -0,70 | -0,70 |
| z-Faktorwert(PP)    | 0,81                       | 1,30  | 1,50  | -0,45 | -0,42 | 2,58  | -0,61 | -0,61 |
| z-Faktorwert(PS)    | -0,21                      | -0,19 | -0,19 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 |
| z-Faktorwert(EPS)   | -0,26                      | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 |
| z-Faktorwert(PVC)   | -0,27                      | -0,23 | -0,23 | -0,25 | -0,24 | 3,73  | -0,30 | -0,30 |
| z-Faktorwert(PA6)   | 1,09                       | 1,64  | 1,91  | -0,63 | -0,63 | 0,22  | -0,63 | -0,63 |
| z-Faktorwert(PMMA)  | 0,94                       | 2,82  | -0,44 | -0,44 | -0,44 | -0,44 | -0,44 | -0,44 |
| z-Faktorwert(EPDM)  | -0,25                      | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(POM)   | -0,25                      | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Epoxy) | -0,16                      | -0,16 | -0,42 | 0,02  | 0,11  | -0,11 | -0,42 | -0,42 |
| z-Faktorwert(Glas)  | 0,53                       | 0,46  | 0,66  | -0,67 | -0,67 | -0,67 | -0,67 | -0,67 |

## Clusterzentren der endgültigen Lösung (Teil 1)

|                     | Clusterzentren der endgültigen Lösung |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 1                                     | 2     | 3     | 4     | 5     | 6     | 7     | 8     |
| z-Faktorwert(Fe)    | -0,77                                 | -0,78 | -0,78 | -0,59 | -0,76 | -0,01 | 2,87  | 1,15  |
| z-Faktorwert(Si)    | 0,15                                  | -0,90 | -0,90 | -0,90 | -0,67 | 0,84  | -0,90 | -0,90 |
| z-Faktorwert(Mg)    | 1,93                                  | -0,45 | 1,32  | -0,45 | 2,62  | -0,45 | -0,45 | -0,45 |
| z-Faktorwert(Al)    | -0,85                                 | -0,88 | -0,78 | -0,20 | -0,86 | -0,08 | -0,88 | -0,11 |
| z-Faktorwert(Cu)    | -0,83                                 | -1,02 | -0,60 | 1,41  | -0,76 | 0,46  | -1,02 | 2,16  |
| z-Faktorwert(Ni)    | 1,83                                  | -0,94 | -0,94 | -0,61 | -0,72 | 0,82  | -0,94 | -0,94 |
| z-Faktorwert(Cr)    | 3,75                                  | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Sn)    | -0,73                                 | -1,03 | -0,45 | 0,34  | -0,52 | 0,74  | -1,03 | -1,03 |
| z-Faktorwert(Zn)    | -0,22                                 | -0,89 | -0,89 | -0,85 | -0,66 | 1,02  | -0,89 | -0,89 |
| z-Faktorwert(W)     | 1,63                                  | -0,35 | 3,26  | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 |
| z-Faktorwert(Mn)    | 3,75                                  | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Ti)    | 3,75                                  | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Co)    | -0,32                                 | 3,40  | 1,35  | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 |
| z-Faktorwert(Ta)    | 3,36                                  | -0,34 | 1,44  | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 |
| z-Faktorwert(Mo)    | 3,75                                  | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Zr)    | 3,75                                  | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Au)    | -1,08                                 | 0,51  | -0,24 | 2,04  | -0,88 | 0,45  | -1,08 | -1,08 |
| z-Faktorwert(Ag)    | -0,99                                 | 2,05  | 0,63  | 1,35  | -0,82 | 0,26  | -0,99 | -0,99 |
| z-Faktorwert(Pd)    | -1,02                                 | 0,81  | -0,13 | 0,69  | -0,79 | 0,70  | -1,02 | -1,02 |
| z-Faktorwert(Nd)    | -0,36                                 | 3,28  | 1,58  | -0,12 | -0,36 | -0,36 | -0,36 | -0,36 |
| z-Faktorwert(Pr)    | -0,35                                 | 3,28  | 1,59  | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 |
| z-Faktorwert(In)    | -0,25                                 | -0,25 | -0,24 | -0,25 | 3,75  | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Pb)    | -0,93                                 | -0,93 | -0,93 | 0,21  | -0,74 | 0,47  | -0,93 | -0,93 |
| z-Faktorwert(Sb)    | -0,39                                 | -0,39 | -0,39 | -0,39 | -0,01 | 2,57  | -0,39 | -0,39 |
| z-Faktorwert(ABS)   | -0,57                                 | -0,57 | -0,57 | 2,96  | -0,23 | 1,32  | -0,57 | -0,57 |
| z-Faktorwert(PC)    | -0,29                                 | -0,29 | -0,29 | 3,70  | 0,38  | -0,29 | -0,29 | -0,29 |
| z-Faktorwert(LDPE)  | -0,70                                 | -0,70 | -0,70 | -0,70 | -0,19 | 0,49  | -0,70 | -0,70 |
| z-Faktorwert(PP)    | -0,61                                 | -0,61 | -0,61 | -0,61 | -0,59 | 0,17  | -0,61 | -0,61 |
| z-Faktorwert(PS)    | -0,26                                 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | 3,75  |
| z-Faktorwert(EPS)   | -0,26                                 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,14 | -0,26 | -0,26 | 3,75  |
| z-Faktorwert(PVC)   | -0,30                                 | -0,30 | -0,30 | -0,30 | -0,27 | -0,27 | -0,30 | 0,11  |
| z-Faktorwert(PA6)   | -0,63                                 | -0,63 | -0,63 | -0,63 | 1,81  | -0,39 | -0,63 | -0,63 |
| z-Faktorwert(PMMA)  | -0,44                                 | -0,44 | -0,44 | -0,44 | 1,92  | -0,44 | -0,44 | -0,44 |
| z-Faktorwert(EPDM)  | -0,25                                 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | 3,75  | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(POM)   | -0,25                                 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | 3,75  | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Epoxy) | -0,42                                 | -0,42 | -0,42 | 3,68  | -0,37 | -0,12 | -0,42 | 0,07  |
| z-Faktorwert(Glas)  | -0,10                                 | -0,67 | -0,67 | 0,75  | -0,24 | 0,21  | 3,12  | -0,67 |

## Clusterzentren der endgültigen Lösung (Teil 2)

|                     | Clusterzentren der endgültigen Lösung |       |       |       |       |       |       |       |
|---------------------|---------------------------------------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
|                     | 9                                     | 10    | 11    | 12    | 13    | 14    | 15    | 16    |
| z-Faktorwert(Fe)    | 0,55                                  | 0,37  | 0,33  | -0,69 | -0,51 | -0,72 | -0,49 | 0,84  |
| z-Faktorwert(Si)    | 0,52                                  | 0,55  | 0,50  | 1,58  | 2,05  | 0,79  | -0,90 | -0,90 |
| z-Faktorwert(Mg)    | -0,45                                 | -0,45 | -0,45 | -0,45 | -0,45 | -0,45 | -0,45 | -0,45 |
| z-Faktorwert(Al)    | -0,18                                 | -0,08 | 0,02  | 0,29  | -0,44 | 0,66  | 2,90  | 1,47  |
| z-Faktorwert(Cu)    | 0,38                                  | 0,95  | 1,07  | -0,01 | 0,18  | -0,33 | -1,02 | -1,02 |
| z-Faktorwert(Ni)    | 0,32                                  | 0,32  | 0,28  | 1,23  | 1,64  | 0,54  | -0,94 | -0,94 |
| z-Faktorwert(Cr)    | -0,25                                 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Sn)    | 0,48                                  | 0,48  | 0,43  | 1,58  | 2,08  | 0,73  | -1,03 | -1,03 |
| z-Faktorwert(Zn)    | 0,52                                  | 0,59  | 0,54  | 1,56  | 2,02  | 0,80  | -0,89 | -0,89 |
| z-Faktorwert(W)     | -0,35                                 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 |
| z-Faktorwert(Mn)    | -0,25                                 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Ti)    | -0,25                                 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Co)    | -0,34                                 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 |
| z-Faktorwert(Ta)    | -0,34                                 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 | -0,34 |
| z-Faktorwert(Mo)    | -0,25                                 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Zr)    | -0,25                                 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Au)    | 0,20                                  | 0,20  | 0,15  | 1,08  | 1,49  | 0,42  | -1,08 | -1,08 |
| z-Faktorwert(Ag)    | 0,09                                  | 0,07  | -0,91 | 0,82  | 1,16  | 0,25  | -0,99 | -0,99 |
| z-Faktorwert(Pd)    | 0,42                                  | 0,43  | -1,02 | 1,44  | 1,90  | 0,67  | -1,02 | -1,02 |
| z-Faktorwert(Nd)    | -0,36                                 | -0,36 | -0,36 | -0,36 | -0,36 | -0,36 | -0,36 | -0,36 |
| z-Faktorwert(Pr)    | -0,35                                 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 | -0,35 |
| z-Faktorwert(In)    | -0,25                                 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Pb)    | 0,83                                  | 1,42  | 1,33  | 1,10  | 1,48  | 0,46  | -0,93 | -0,93 |
| z-Faktorwert(Sb)    | -0,39                                 | -0,39 | -0,39 | -0,39 | -0,39 | 2,53  | -0,39 | -0,39 |
| z-Faktorwert(ABS)   | 0,49                                  | 0,10  | 1,00  | -0,57 | -0,57 | -0,55 | -0,57 | -0,57 |
| z-Faktorwert(PC)    | -0,29                                 | -0,29 | -0,28 | -0,29 | -0,29 | -0,29 | -0,29 | -0,29 |
| z-Faktorwert(LDPE)  | 0,50                                  | -0,70 | 2,64  | 1,03  | 1,35  | 0,46  | -0,70 | -0,70 |
| z-Faktorwert(PP)    | 0,81                                  | 1,30  | 1,50  | -0,45 | -0,42 | 2,58  | -0,61 | -0,61 |
| z-Faktorwert(PS)    | -0,21                                 | -0,19 | -0,19 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 |
| z-Faktorwert(EPS)   | -0,26                                 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 | -0,26 |
| z-Faktorwert(PVC)   | -0,27                                 | -0,23 | -0,23 | -0,25 | -0,24 | 3,73  | -0,30 | -0,30 |
| z-Faktorwert(PA6)   | 1,09                                  | 1,64  | 1,91  | -0,63 | -0,63 | 0,22  | -0,63 | -0,63 |
| z-Faktorwert(PMMA)  | 0,94                                  | 2,82  | -0,44 | -0,44 | -0,44 | -0,44 | -0,44 | -0,44 |
| z-Faktorwert(EPDM)  | -0,25                                 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(POM)   | -0,25                                 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 | -0,25 |
| z-Faktorwert(Epoxy) | -0,16                                 | -0,16 | -0,42 | 0,02  | 0,11  | -0,11 | -0,42 | -0,42 |
| z-Faktorwert(Glas)  | 0,53                                  | 0,46  | 0,66  | -0,67 | -0,67 | -0,67 | -0,67 | -0,67 |

## A Anhang

### ANOVA Tabelle

|                     | Cluster             |       | Fehler              |      | F | Sig. |
|---------------------|---------------------|-------|---------------------|------|---|------|
|                     | Mittel der Quadrate | df    | Mittel der Quadrate | df   |   |      |
| z-Faktorwert(Fe)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Si)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Mg)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Al)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Cu)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Ni)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Cr)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Sn)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Zn)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(W)     | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Mn)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Ti)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Co)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Ta)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Mo)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Zr)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Au)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Ag)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Pd)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Nd)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Pr)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(In)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Pb)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Sb)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(ABS)   | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(PC)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(LDPE)  | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(PP)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(PS)    | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(EPS)   | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(PVC)   | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(PA6)   | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(PMMA)  | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(EPDM)  | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(POM)   | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Epoxy) | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |
| z-Faktorwert(Glas)  | 1,00                | 15,00 | .                   | 0,00 | . | .    |

## Clusterzuordnung

| Anzahl der Fälle in jedem Cluster |    |    |
|-----------------------------------|----|----|
| Cluster                           | 1  | 1  |
|                                   | 2  | 1  |
|                                   | 3  | 1  |
|                                   | 4  | 1  |
|                                   | 5  | 1  |
|                                   | 6  | 1  |
|                                   | 7  | 1  |
|                                   | 8  | 1  |
|                                   | 9  | 1  |
|                                   | 10 | 1  |
|                                   | 11 | 1  |
|                                   | 12 | 1  |
|                                   | 13 | 1  |
|                                   | 14 | 1  |
|                                   | 15 | 1  |
|                                   | 16 | 1  |
| Gültig                            |    | 16 |
| Fehlend                           |    | 0  |



## B Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                                                                                         |    |
|------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1  | Zeitstrahl der Nachhaltigkeitsgeschichte (Eigene Darstellung) . . . . .                                                                 | 6  |
| 2.2  | Drei-Säulen-Modell, in Anlehnung an Pufé 2020 (Eigene Darstellung)                                                                      | 9  |
| 2.3  | Mittlere atmosphärische CO <sub>2</sub> -Konzentration. Datenbasis Lüthi et al.<br>2008, in Anlehnung an UN Environment 2019 . . . . .  | 12 |
| 2.4  | Rekonstruierte und beobachtete globale Temperaturentwicklung auf<br>der Erde. Datenbasis [IPCC, 2001] und [Mann, 2021] . . . . .        | 13 |
| 2.5  | Einzelne Bausteine des Maßnahmenplans des „European Green De-<br>al’s“. Eigene Darstellung in Anlehnung an [European Union, 2021] . .   | 25 |
| 2.6  | Phasen einer Ökobilanz. Eigene Darstellung in Anlehnung an [DIN e.<br>V., 2021a] . . . . .                                              | 27 |
| 2.7  | Konzept der Wirkungsindikatoren. Eigene Darstellung in Anlehnung<br>an [DIN e. V., 2021b] . . . . .                                     | 30 |
| 2.8  | Lebensweg eines Produktes. Eigene Darstellung in Anlehnung an [Klöp-<br>fer und Grahl, 2009] . . . . .                                  | 33 |
| 2.9  | Darstellung von Kreis- und Linearwirtschaft. Eigene Darstellung in<br>Anlehnung an [Walcher und Leube, 2017] . . . . .                  | 37 |
| 2.10 | Umgekehrte Pyramide der 5Rs. Eigene Darstellung in Anlehnung an<br>[Balwan et al., 2022] . . . . .                                      | 44 |
| 2.11 | Hierarchiestufen der Wiederverwendung. Eigene Darstellung in An-<br>lehnung an [Gharfalkar et al., 2016] . . . . .                      | 46 |
| 2.12 | Iterativer Ansatz zur Erstellung einer Lebenszyklusanalyse. Eigene<br>Darstellung in Anlehnung an [European Commission, 2010] . . . . . | 51 |
| 4.1  | Verkaufte Einheiten für die Produktkategorien Smartphones und Wasch-<br>maschinen in Deutschland. . . . .                               | 78 |
| 5.1  | Forschungsfrage und daraus abgeleitete Hypothesen . . . . .                                                                             | 95 |

## B Abbildungsverzeichnis

|      |                                                                                                                                             |     |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2  | Boxplots der analysierten Daten für die Phasen der Produktion und Nutzung des Hauptmerkmals <i>LCAs nach Phasen</i> . . . . .               | 103 |
| 5.3  | Boxplots der analysierten Daten für die Phase der Nutzung des Hauptmerkmals <i>LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen</i> . . . . .      | 106 |
| 5.4  | Boxplots der analysierten Daten für die Phase der Nutzung des Hauptmerkmals <i>LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen</i> . . . . .      | 106 |
| 5.5  | Schematischer Ablauf der in dieser Arbeit durchgeführten Clusteranalysen . . . . .                                                          | 115 |
| 5.6  | Beispielhaftes Dendrogramm (Eigene Darstellung) . . . . .                                                                                   | 118 |
| 5.7  | Berechnete Cluster für das Hauptmerkmal <i>LCAs nach Phasen</i> . . . .                                                                     | 120 |
| 5.8  | Zuordnung der drei Hauptgruppen zu den umfangreichsten Clustern in der Clusteranalyse der <i>LCAs nach Phasen</i> . . . . .                 | 121 |
| 5.9  | Abhängigkeit der z-transformierten Werte der Produktions- und Nutzungsphase voneinander des Hauptmerkmals <i>LCAs nach Phasen</i> . . .     | 122 |
| 5.10 | Zuordnung der drei Hauptgruppen zu den umfangreichsten Clustern in der Clusteranalyse der <i>LCIs der Lebenszyklusanalyse nach Phasen</i> . | 125 |
| A.1  | Dendrogramm mit Ward-Verknüpfung der z-transformierten Werte für das Hauptmerkmal <i>LCAs nach Phasen</i> . . . . .                         | 201 |
| A.2  | Dendrogramm für die metrisch Werte des Hauptmerkmals <i>LCIs der LCAs nach Phasen</i> . . . . .                                             | 205 |
| A.3  | Dendrogramm für die nominalskalierten Werte des Hauptmerkmals <i>LCIs der LCAs nach Phasen</i> . . . . .                                    | 211 |
| A.4  | Dendrogramm für die selbst berechneten Werte des Merkmals <i>LCAs nach Werkstoffen</i> mit reinem Deponieanteil . . . . .                   | 220 |
| A.5  | Dendrogramm für die selbst berechneten Werte des Merkmals <i>LCAs nach Werkstoffen</i> mit möglichst großem Recyclinganteil . . . . .       | 221 |

## C Tabellenverzeichnis

|     |                                                                                                                                                 |    |
|-----|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 2.1 | Teilweiser Auszug der Wachstumsfaktoren von menschlichen Aktivitäten im 20. Jahrhundert, nach [McNeill, 2000] . . . . .                         | 14 |
| 2.2 | Zuordnung der beobachteten Klimaveränderungen als Folge des menschlichen Einflusses, [Team et al., 2023] . . . . .                              | 15 |
| 2.3 | Sechs Design-for-X Prinzipien, entwickelt von [Bakker et al., 2014b] .                                                                          | 42 |
| 3.1 | Midpoints des ILCD-Handbuchs, entwickelt von [European Commission, 2010] . . . . .                                                              | 61 |
| 3.2 | Auszug aus den GRI-Standards, nach [GRI, 2024a] . . . . .                                                                                       | 62 |
| 4.1 | Betrachtete Merkmale bei der Produktauswahl . . . . .                                                                                           | 68 |
| 4.2 | Ausgewählte Produktgruppen . . . . .                                                                                                            | 71 |
| 4.3 | Ausgewählte Hauptmerkmale für die betrachteten Produktgruppen .                                                                                 | 75 |
| 4.4 | Beispielhafte Darstellung der erfassten <i>stofflichen Zusammensetzung</i> aus zwei Quellen (Teil 1), alle Angaben in Prozent vom Gesamtgewicht | 76 |
| 4.5 | Beispielhafte Darstellung der erfassten <i>stofflichen Zusammensetzung</i> aus zwei Quellen (Teil 2), alle Angaben in Prozent vom Gesamtgewicht | 77 |
| 4.6 | Vergleich von zwei Smartphone <i>LCAs nach Phasen</i> . . . . .                                                                                 | 80 |
| 4.7 | Vergleich von drei <i>LCAs nach Phasen</i> aus der Hauptgruppe Fahrzeuge                                                                        | 81 |
| 4.8 | Life Cycle Inventory aus [Proske et al., 2020]. Zur besseren Lesbarkeit wurden nicht verwendete Quellen exkludiert. . . . .                     | 85 |
| 4.9 | Prozentualer Anteil kritischer Rohstoffe in verschiedenen Veröffentlichungen zu der <i>stofflichen Zusammensetzung</i> von Smartphones . . . .  | 90 |
| 5.1 | 15 IQ-Dimensionen, nach [Hildebrand et al., 2025] . . . . .                                                                                     | 92 |

## C Tabellenverzeichnis

|      |                                                                                                                                                                                                                                                   |     |
|------|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 5.2  | Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent der <i>stofflichen Zusammensetzung</i> ausgewählter Werkstoffe aller Produkte der Hauptgruppe Smartphones und Notebooks . . . . .                                                                 | 99  |
| 5.3  | Mittelwerte und Standardabweichung in Prozent der <i>stofflichen Zusammensetzung</i> ausgewählter Werkstoffe aller Produkte der Hauptgruppe Fahrzeuge . . . . .                                                                                   | 100 |
| 5.4  | Auszug der Mittelwerte und Standardabweichungen aller Produkte des Hauptmerkmals <i>Absatzzahlen</i> in absoluten verkauften Einheiten .                                                                                                          | 101 |
| 5.5  | Errechnete Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent aller Produkte für das Hauptmerkmal <i>LCAs nach Phasen</i> . . . . .                                                                                                                  | 102 |
| 5.6  | Errechnete Mittelwerte und Standardabweichungen aller Produkte für das Hauptmerkmal <i>LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen</i> . . .                                                                                                        | 105 |
| 5.7  | Auszug der Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent des Hauptmerkmals <i>LCAs nach Bauteilen</i> für alle Produkte der Hauptgruppe Smartphones und Notebooks . . . . .                                                                     | 107 |
| 5.8  | Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent für die selbsterstellten <i>LCAs nach Werkstoffen</i> der Hauptgruppe Smartphones und Notebooks (Teil 1) . . . . .                                                                                | 109 |
| 5.9  | Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent für die selbsterstellten <i>LCAs nach Werkstoffen</i> der Hauptgruppe Smartphones und Notebooks (Teil 2) . . . . .                                                                                | 110 |
| 5.10 | Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent für die <i>LCAs nach Werkstoffen</i> der Produktgruppen Fahrzeuge (Teil 1) . . . . .                                                                                                              | 111 |
| 5.11 | Mittelwerte und Standardabweichungen in Prozent für die <i>LCAs nach Werkstoffen</i> der Produktgruppen Fahrzeuge (Teil 2) . . . . .                                                                                                              | 111 |
| 5.12 | Errechnete Mittelwerte und Standardabweichungen aller Produkte für das Hauptmerkmal <i>Kritische Rohstoffe</i> . . . . .                                                                                                                          | 113 |
| 5.13 | Errechnete Clusterzentren in absoluten Werten für die metrisch skalierten Daten des Hauptmerkmals <i>LCIs der Lebenszyklusanalysen nach Phasen</i> . Zu jedem Cluster ist in runden Klammern die jeweils enthaltene Fallanzahl angegeben. . . . . | 124 |

|     |                                                                                                                                                                     |     |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 6.1 | Von der Software Granta Selector verwendete Quellen und Wertebereiche für die Modellierung in Lebenszyklusanalysen. Eigene Darstellung nach [Ansys, 2025] . . . . . | 142 |
|-----|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|



## D Literaturverzeichnis

- [Alt, 2018] Alt, M. (2018). *Ökodesign und Kreislaufwirtschaft*. Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG.
- [Ansys, 2025] Ansys (2025). Ansys Granta Selector | Materials Selection Software. <https://www.ansys.com/de-de/products/materials/granta-selector>. Abgerufen am 21.11.2025.
- [Apple, 2022] Apple (2022). Zertifiziert Refurbished. <https://www.apple.com/de/shop/refurbished/about>. Abgerufen am 20.05.2025.
- [Apple, 2025] Apple (2025). Apple Product Environmental Report. <https://www.apple.com/uk/environment/>. Abgerufen am 02.10.2025.
- [Arzoumanidis et al., 2020] Arzoumanidis, I., D'Eusanio, M., Raggi, A., und Petti, L. (2020). Functional Unit Definition Criteria in Life Cycle Assessment and Social Life Cycle Assessment: A Discussion. In Traverso, M., Petti, L., und Zamagni, A., Herausgeber, *Perspectives on Social LCA: Contributions from the 6th International Conference*, SpringerBriefs in Environmental Science, Seiten 1–10. Springer International Publishing, Cham.
- [Ashby et al., 2021] Ashby, M., Melia, H., Figuerola, M., Philips, L., und Gorse, S. (2021). Granta EduPack White Paper The Granta EduPack Materials Science and Engineering Package.
- [Bakker et al., 2014a] Bakker, C., Wang, F., Huisman, J., und den Hollander, M. (2014a). Products That Go Round: Exploring Product Life Extension through Design. *Journal of Cleaner Production*, 69:10–16.
- [Bakker et al., 2014b] Bakker, CA., den Hollander, MC., van Hinte, E., und Zijlstra, Y. (2014b). *Products That Last: Product Design for Circular Business Models*. TU Delft Library, Delft.

## D Literaturverzeichnis

- [Balderjahn, 2013] Balderjahn, I. (2013). *Nachhaltiges Management und Konsumentenverhalten*. Nummer 3902 in UTB Wirtschaftswissenschaften. UVK-Verlagsoges, Konstanz.
- [Balwan et al., 2022] Balwan, W. K., Singh, A., und Kour, S. (2022). 5R's of Zero Waste Management to Save Our Green Planet: A Narrative Review. *European Journal of Biotechnology and Bioscience*.
- [Bankhofer und Vogel, 2008] Bankhofer, U. und Vogel, J. (2008). *Datenanalyse und Statistik*. Gabler, Wiesbaden.
- [Barros und Dimla, 2021] Barros, M. und Dimla, E. (2021). FROM PLANNED OBSOLESCENCE TO THE CIRCULAR ECONOMY IN THE SMARTPHONE INDUSTRY: AN EVOLUTION OF STRATEGIES EMBODIED IN PRODUCT FEATURES. *Proceedings of the Design Society*, 1:1607–1616.
- [Bender und Gericke, 2021] Bender, B. und Gericke, K., Herausgeber (2021). *Pahl/-Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Benner et al., 2021] Benner, S., Lax, G., Crutzen, P. J., Pöschl, U., Lelieveld, J., und Brauch, H. G., Herausgeber (2021). *Paul J. Crutzen and the Anthropocene: A New Epoch in Earth's History*, Band 1 in *The Anthropocene: Politik—Economics—Society—Science*. Springer International Publishing, Cham.
- [Berger et al., 2012] Berger, A., Mesinger, F., und Sijacki, D., Herausgeber (2012). *Climate Change: Inferences from Paleoclimate and Regional Aspects*. Springer, Vienna.
- [Berwald et al., 2020] Berwald, A., Clemm, C., und Prewitz, C. (2020). Environmental Evaluation of Current and Future Design Rules.
- [Bhari et al., 2021] Bhari, B., Yano, J., und Sakai, S.-i. (2021). Comparison of End-of-Life Vehicle Material Flows for Reuse, Material Recycling, and Energy Recovery between Japan and the European Union. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(2):644–663.

- [Bieker, 2021] Bieker, G. (2021). A Global Comparison of the Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions of Combustion Engine and Electric Passenger Cars.
- [Bitkom, 2025] Bitkom (2025). Verkaufszahlen von Smartphones in Deutschland bis 2025. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/77637/umfrage/absatzmenge-fuer-smartphones-in-deutschland-seit-2008/>. Abgerufen am 03.07.2025.
- [BMUV, 2021] BMUV (2021). Tag der Ozonschicht: Ausstieg aus FCKW und Halonen schützt die Ozonschicht und das Klima- BMUV - Pressemitteilung. <https://www.bmuv.de/PM9797>. Abgerufen am 03.08.2025.
- [Bookhagen et al., 2020] Bookhagen, B., Bastian, D., Buchholz, P., Faulstich, M., Oppen, C., Irrgeher, J., Prohaska, T., und Koeberl, C. (2020). Metallic Resources in Smartphones. *Resources Policy*, 68:101750.
- [Bortz und Schuster, 2010] Bortz, J. und Schuster, C. (2010). *Statistik Für Human- Und Sozialwissenschaftler*. Springer-Lehrbuch. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Bracquené et al., 2018] Bracquené, E., Brusselaers, J., Dams, Y., Peeters, J., Schepper, K., Duflou, J., und Dewulf, W. (2018). *Repairability Criteria for Energy Related Products Study in the BeNeLux Context to Evaluate the Options to Extend the Product Life Time Final Report*. KU Leuven.
- [Bracquené et al., 2021] Bracquené, E., Peeters, J., Alfieri, F., Sanf  lix, J., Duflou, J., Dewulf, W., und Cordella, M. (2021). Analysis of Evaluation Systems for Product Repairability: A Case Study for Washing Machines. *Journal of cleaner production*, 281:125122.
- [Braungart et al., 2007] Braungart, M., McDonough, W., und Bollinger, A. (2007). Cradle-to-Cradle Design: Creating Healthy Emissions – a Strategy for Eco-Effective Product and System Design. *Journal of Cleaner Production*, 15(13):1337–1348.
- [British Standard, 2009] British Standard (2009). Design for Manufacture, Assembly, Disassembly and End-of-Life Processing (MADE): Terms and Definitions.

## D Literaturverzeichnis

- [Buberger et al., 2022] Buberger, J., Kersten, A., Kuder, M., Eckerle, R., Weyh, T., und Thiringer, T. (2022). Total CO<sub>2</sub>-equivalent Life-Cycle Emissions from Commercially Available Passenger Cars. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 159:112158.
- [Buchert, 2012] Buchert, M. (2012). *Recycling kritischer Rohstoffe aus Elektronik-Altgeräten*. LANUV-Fachbericht ; 38. LANUV, Recklinghausen, 1. Auflage.
- [Bundesregierung, 2015] Bundesregierung (2015). Gesetz Über Das Inverkehrbringen, Die Rücknahme Und Die Umweltverträgliche Entsorgung von Elektro- Und Elektronikgeräten (Elektro- Und Elektronikgerätegesetz - ElektroG).
- [Bundesregierung, 2020] Bundesregierung (2020). Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie Weiterentwicklung 2021.
- [c2ccertified.org, 2024] c2ccertified.org (2024). The Institute - Cradle to Cradle Products Innovation Institute. <https://c2ccertified.org/the-institute>. Abgerufen am 16.01.2024.
- [Cambridge Dictionary, 2022] Cambridge Dictionary (2022). Definition Refurbish. <https://dictionary.cambridge.org/de/worterbuch/englisch/refurbish>. Abgerufen am 10.10.2024.
- [Chang et al., 2012] Chang, Y.-J., Schau, E., und Finkbeiner, M. (2012). Application of Life Cycle Sustainability Assessment to the Bamboo and Aluminum Bicycle in Surveying Social Risks of Developing Countries. In *2nd World Sustainability Forum*, Seite 953.
- [Cohen, 2004] Cohen, L. (2004). A Consumers' Republic: The Politics of Mass Consumption in Postwar America. *Journal of Consumer Research*, 31(1):236–239.
- [Cooper und Gutowski, 2015] Cooper, D. und Gutowski, T. (2015). The Environmental Impacts of Reuse: A Review. *Journal of Industrial Ecology*, 21:n/a–n/a.
- [Cordella et al., 2021a] Cordella, M., Alfieri, F., Clemm, C., und Berwald, A. (2021a). Durability of Smartphones: A Technical Analysis of Reliability and Repairability Aspects. *Journal of cleaner production*, 286:125388.

- [Cordella et al., 2021b] Cordella, M., Alfieri, F., und Sanfelix, J. (2021b). Reducing the Carbon Footprint of ICT Products through Material Efficiency Strategies: A Life Cycle Analysis of Smartphones. *Journal of Industrial Ecology*, 25(2):448–464.
- [Crowther, 1999] Crowther, P. (1999). Design for Disassembly to Recover Embodied Energy. In *Sustaining the Future: Energy Ecology Architecture PLEA '99*, Seiten 95–100. PLEA International, Brisbane, Australia.
- [Crutzen, 1974] Crutzen, P. J. (1974). Estimates of Possible Future Ozone Reductions from Continued Use of Fluoro-Chloro-Methanes (CF<sub>2</sub>Cl<sub>2</sub>, CFCl<sub>3</sub>). *Geophysical Research Letters*, 1(5):205–208.
- [Crutzen und Stoermer, 2000] Crutzen, P. J. und Stoermer, E. F. (2000). “The ‘Anthropocene’ (2000). In *“The ‘Anthropocene’ (2000)*, Seiten 479–490. Yale University Press.
- [Dahl, 2014] Dahl, A. L. (2014). Agenda 21. In Freedman, B., Herausgeber, *Global Environmental Change*, Handbook of Global Environmental Pollution, Seiten 527–531. Springer Netherlands, Dordrecht.
- [Danilecki et al., 2017] Danilecki, K., Mrozik, M., und Smurawski, P. (2017). Changes in the Environmental Profile of a Popular Passenger Car over the Last 30 Years – Results of a Simplified LCA Study. *Journal of Cleaner Production*, 141:208–218.
- [Dannoritzer, 2010] Dannoritzer, C. (2010). Kaufen Für Die Müllhalde.
- [Dao et al., 2021] Dao, T., Cooper, T., und Watkins, M. (2021). Business Innovation for Product Repairability: Implications for Future Policies.
- [De Fazio, 2019] De Fazio, F. (2019). Enhancing Consumer Product Repairability: A Case Study on Vacuum Cleaners.
- [Del Duce, 2011] Del Duce, A. (2011). Life Cycle Assessment of Conventional and Electric Bicycles. In *EMPA Materials Science & Technology*, Eurobike 2011.
- [Deng et al., 2011] Deng, L., Babbitt, C. W., und Williams, E. D. (2011). Economic-Balance Hybrid LCA Extended with Uncertainty Analysis: Case Study of a Laptop Computer. *Journal of Cleaner Production*, 19(11):1198–1206.

## D Literaturverzeichnis

- [Didham, 2025] Didham, R. J. (2025). Reframing Sustainability Learning: From Net-zero to Net-positive. *Journal of Education for Sustainable Development*, Seite 09734082251336303.
- [DIN e. V., 2015] DIN e. V. (2015). DIN EN ISO 14001 - Umweltmanagementsysteme – Anforderungen Mit Anleitung Zur Anwendung (ISO 14001:2015); Deutsche Und Englische Fassung EN ISO 14001:2015.
- [DIN e. V., 2019] DIN e. V. (2019). DIN EN ISO 14067 - Treibhausgase – Carbon Footprint von Produkten – Anforderungen an Und Leitlinien Für Quantifizierung (ISO 14067:2018); Deutsche Und Englische Fassung EN ISO 14067:2018.
- [DIN e. V., 2021a] DIN e. V. (2021a). DIN EN ISO 14040:2021-02: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze Und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006 + Amd 1:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14040:2006 + A1:2020.
- [DIN e. V., 2021b] DIN e. V. (2021b). DIN EN ISO 14044 - Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen Und Anleitungen (ISO 14044:2006 + Amd 1:2017 + Amd 2:2020); Deutsche Fassung EN ISO 14044:2006 + A1:2018 + A2:2020.
- [DIN e.V. et al., 2001] DIN e.V., Kiehl, P., Breutmann, N., Goethe, W., Grode, H.-P., Liess, E., Machert, D., Wehrstedt, A., Wende, I., und Zentner, F., Herausgeber (2001). *Klein Einführung in die DIN-Normen*. Vieweg+Teubner Verlag, Wiesbaden.
- [Döring, 2023] Döring, N. (2023). *Forschungsmethoden und Evaluation in den Sozial- und Humanwissenschaften*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [Dowsett et al., 1994] Dowsett, H., Thompson, R., Barron, J., Cronin, T., Fleming, F., Ishman, S., Poore, R., Willard, D., und Holz, T. (1994). Joint Investigations of the Middle Pliocene Climate I: PRISM Paleoenvironmental Reconstructions. *Global and Planetary Change*, 9:169–195.
- [Eckart et al., 2022] Eckart, J., Hupfer, C., Kriesten, R., Nenniger, P., und Riel, J. (2022). Fahrradlabor Hochschule Karlsruhe.

- [EDGAR/JRC, 2024] EDGAR/JRC (2024). CO<sub>2</sub>-Ausstoß weltweit nach Sektoren 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/167957/umfrage/verteilung-der-co-emissionen-weltweit-nach-bereich/>. Abgerufen am 23.09.2025.
- [Eisenriegler et al., 2020] Eisenriegler, S., Stahel, W., und Bocken, N. (2020). *Kreislaufwirtschaft in der EU*. Springer Gabler Wiesbaden, 1. Auflage.
- [Ekardt, 2016] Ekardt, F. (2016). *Theorie der Nachhaltigkeit : ethische, rechtliche, politische und transformative Zugänge - am Beispiel von Klimawandel, Ressourcenknappheit und Welthandel*. Baden-Baden : Nomos, 2. Auflage.
- [Ellen McArthur Foundation, 2013] Ellen McArthur Foundation (2013). Towards the Circular Economy Vol. 1: An Economic and Business Rationale for an Accelerated Transition.
- [Ercan et al., 2016] Ercan, M., Malmudin, J., und Bergmark, P. (2016). Life Cycle Assessment of a Smartphone. In *4th International Conference on ICT for Sustainability*, Band 2016.
- [Europäischer Rat, 2023] Europäischer Rat (2023). „Fit für 55“. <https://www.consilium.europa.eu/de/policies/green-deal/fit-for-55-the-eu-plan-for-a-green-transition/>. Abgerufen am 17.08.2023.
- [Europäisches Parlament, 2021] Europäisches Parlament (2021). Verordnung (EU) 2021/1119 des Europäischen Parlaments und des Rates vom 30. Juni 2021 zur Schaffung des Rahmens für die Verwirklichung der Klimaneutralität und zur Änderung der Verordnungen (EG) Nr. 401/2009 und (EU) 2018/1999 („Europäisches Klimagesetz“).
- [European Comission, 2015] European Comission (2015). Kommission verabschiedet ehrgeiziges neues Maßnahmenpaket zur Kreislaufwirtschaft. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP\\_15\\_6203](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/de/IP_15_6203). Abgerufen am 07.09.2024.
- [European Commission, 2010] European Commission (2010). *General Guide for Life Cycle Assessment: Provisions and Action Steps*. Publications Office, Luxembourg, 1.. Auflage.

## *D Literaturverzeichnis*

- [European Commission, 2015] European Commission (2015). COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Closing the Loop - An EU Action Plan for the Circular Economy.
- [European Commission, 2019] European Commission (2019). The New Ecodesign Measures Explained. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/QANDA\\_19\\_5889](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/QANDA_19_5889). Abgerufen am 01.12.2023.
- [European Commission, 2020] European Commission (2020). MITTEILUNG DER KOMMISSION AN DAS EUROPÄISCHE PARLAMENT, DEN RAT, DEN EUROPÄISCHEN WIRTSCHAFTS- UND SOZIALAUSSCHUSS UND DEN AUSSCHUSS DER REGIONEN Ein neuer Aktionsplan für die Kreislaufwirtschaft Für ein saubereres und wettbewerbsfähigeres Europa.
- [European Commission, 2022] European Commission (2022). Ecodesign for Sustainable Products. [https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation\\_en](https://commission.europa.eu/energy-climate-change-environment/standards-tools-and-labels/products-labelling-rules-and-requirements/sustainable-products/ecodesign-sustainable-products-regulation_en). Abgerufen am 29.08.2023.
- [European Commission, 2023a] European Commission (2023a). COMMISSION STAFF WORKING DOCUMENT IMPACT ASSESSMENT REPORT Accompanying the Document Directive of the European Parliament and of the Council Amending Directive 2008/98/EC on Waste.
- [European Commission, 2023b] European Commission (2023b). Proposal for a REGULATION OF THE EUROPEAN PARLIAMENT AND OF THE COUNCIL Establishing a Framework for Ensuring a Secure and Sustainable Supply of Critical Raw Materials and Amending Regulations (EU) 168/2013, (EU) 2018/858, 2018/1724 and (EU) 2019/1020.
- [European Commission, 2023c] European Commission (2023c). Proposal for a Targeted Revision of the Waste Framework Directive.

- [European Commission, 2024] European Commission (2024). Regulation (EU) 2024/1781 of the European Parliament and of the Council of 13 June 2024 Establishing a Framework for the Setting of Ecodesign Requirements for Sustainable Products, Amending Directive (EU) 2020/1828 and Regulation (EU) 2023/1542 and Repealing Directive 2009/125/EC (Text with EEA Relevance).
- [European Union, 2009] European Union (2009). Richtlinie 2009/125/EG des Europäischen Parlaments und des Rates vom 21. Oktober 2009 zur Schaffung eines Rahmens für die Festlegung von Anforderungen an die umweltgerechte Gestaltung energieverbrauchsrelevanter Produkte (Neufassung) (Text von Bedeutung für den EWR).
- [European Union, 2012] European Union (2012). Richtlinie 2012/19/EU des Europäischen Parlaments und des Rates vom 4. Juli 2012 über Elektro- und Elektronik-Altgeräte (Neufassung) Text von Bedeutung für den EWR.
- [European Union, 2021] European Union (2021). Architecture Factsheet - Delivering the European Green Deal. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs\\_21\\_3671](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/fs_21_3671). Abgerufen am 31.10.2023.
- [European Union, 2022] European Union (2022). Directive (EU) 2022/2464 of the European Parliament and of the Council of 14 December 2022 Amending Regulation (EU) No 537/2014, Directive 2004/109/EC, Directive 2006/43/EC and Directive 2013/34/EU, as Regards Corporate Sustainability Reporting (Text with EEA Relevance).
- [European Union, 2023] European Union (2023). THE EUROPEAN GREEN DEAL – DELIVERING THE EU’S 2030 CLIMATE TARGETS. [https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS\\_23\\_4813](https://ec.europa.eu/commission/presscorner/detail/en/FS_23_4813). Abgerufen am 16.10.2023.
- [Eurostat, 2021] Eurostat (2021). Waste Treatment by Type of Recovery and Disposal, 2018 (% of Total Treatment). <https://tinyurl.com/42jm6wkj>. Abgerufen am 07.02.2025.

## D Literaturverzeichnis

- [Fairbridge und Agenbroad, 2023] Fairbridge, R. W. und Agenbroad, L. D. (2023). Holocene Epoch | Causes, Effects, & Facts | Britannica. <https://www.britannica.com/science/Holocene-Epoch>. Abgerufen am 01.08.2023.
- [Forti et al., 2020] Forti, V., Baldé, C. P., Kuehr, R., und Bel, G. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020: Quantities, Flows, and the Circular Economy Potential*, Band 2020. United Nations University.
- [Fowler, 2022] Fowler, G. A. (2022). Electronics Are Built with Death Dates. Let's Not Keep Them a Secret. *Washington Post*.
- [Fraunhofer ISE, 2025a] Fraunhofer ISE (2025a). Stromerzeugung nach Energieträgern in Norwegen 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/1292636/umfrage/struktur-der-stromerzeugung-in-norwegen/>. Abgerufen am 13.09.2025.
- [Fraunhofer ISE, 2025b] Fraunhofer ISE (2025b). Stromerzeugung nach Energieträgern in Spanien 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/182175/umfrage/struktur-der-bruttostromerzeugung-in-spanien/>. Abgerufen am 13.09.2025.
- [Frei, 1999] Frei, M. (1999). *Öko-effektive Produktentwicklung*. Gabler Verlag, Wiesbaden.
- [Gehin et al., 2008] Gehin, A., Zwolinski, P., und Brissaud, D. (2008). A Tool to Implement Sustainable End-of-Life Strategies in the Product Development Phase. *Journal of Cleaner Production*, 16(5):566–576.
- [Geisendorf und Pietrulla, 2018] Geisendorf, S. und Pietrulla, F. (2018). The Circular Economy and Circular Economic Concepts-a Literature Analysis and Redefinition. *Thunderbird International Business Review*, 60(5):771–782.
- [Gensch und Blepp, 2015] Gensch, C.-O. und Blepp, M. (2015). *Betrachtungen Zu Produktlebensdauer Und Ersatzstrategien von Miele-Haushaltsgeräten Reflections on Product Lifetime and Replacement Strategies for Miele Domestic Appliances*. Öko-Institut e.V., Freiburg.

- [gfu, 2025] gfu (2025). Desktop-PCs und Notebooks - Absatz 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/28292/umfrage/absatzzahlen-fuer-desktop-pcs-und-notebooks-seit-2005/>. Abgerufen am 14.03.2025.
- [Gharfalkar et al., 2016] Gharfalkar, M., Ali, Z., und Hillier, G. (2016). Clarifying the Disagreements on Various Reuse Options: Repair, Recondition, Refurbish and Remanufacture. *Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 34(10):995–1005.
- [GRI, 2024a] GRI (2024a). *Konsolidierte GRI-Standards - German*. Global Sustainability Standards Board (GSSB).
- [GRI, 2024b] GRI (2024b). Ten Questions on GRI and the ESRS. <https://www.globalreporting.org/media/onmmmsg5n/gri-and-the-esrs-top-questions.pdf>. Abgerufen am 16.09.2025.
- [Grober, 2013] Grober, U. (2013). *Die Erfindung der Nachhaltigkeit: Leben, Werk und Wirkung des Hans Carl von Carlowitz*. oekom-Verlag, München.
- [Grossarth, 2024] Grossarth, J. (2024). Verbraucherrecht: Was Das Recht Auf Reparatur Kaputtmacht - WELT. <https://www.welt.de/kultur/plus251488042/Verbraucherrecht-Was-das-Recht-auf-Reparatur-kaputtmacht.html>. Abgerufen am 14.11.2025.
- [Gunn, 2014] Gunn, G., Herausgeber (2014). *Critical Metals Handbook*. John Wiley & Sons ; American Geophysical Union, Hoboken, New Jersey ; Chichester, West Sussex, UK.
- [Gutiérrez et al., 2011] Gutiérrez, E., Adenso-Díaz, B., Lozano, S., und González-Torre, P. (2011). Lifetime of Household Appliances: Empirical Evidence of Users Behaviour. *Waste management & research: the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA*, 29(6):622–633.
- [Gutowski et al., 2009] Gutowski, T. G., Branham, M. S., Dahmus, J. B., Jones, A. J., Thiriez, A., und Sekulic, D. P. (2009). Thermodynamic Analysis of Resources Used in Manufacturing Processes. *Environmental Science & Technology*, 43(5):1584–1590.

## D Literaturverzeichnis

- [Halte à l’Obsolescence Programmée, 2022] Halte à l’Obsolescence Programmée (2022). The French repairability index A first assessment – one year after its implementation.
- [Hatcher et al., 2011] Hatcher, G. D., Ijomah, W. L., und Windmill, J. (2011). Design for Remanufacture: A Literature Review and Future Research Needs. *Journal of cleaner production*, 19(17-18):2004–2014.
- [Hauschild et al., 2018] Hauschild, M. Z., Rosenbaum, R. K., und Olsen, S. I. (2018). *Life Cycle Assessment*. Springer International Publishing, Cham.
- [Hildebrand et al., 2025] Hildebrand, K., Mielke, M., und Gebauer, M., Herausgeber (2025). *Daten- und Informationsqualität: Die Grundlage der Digitalisierung*. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden, 6.. Auflage.
- [Huang, 1996] Huang, G. Q., Herausgeber (1996). *Design for X: Concurrent Engineering Imperatives*. Springer Netherlands, Dordrecht.
- [Huisman et al., 2012] Huisman, J., van der Maesen, M., Eijsbouts, R., Wang, F., Baldé, C., und Wielanga (2012). The Dutch WEEE Flows.
- [IDC, 2025] IDC (2025). Smartphones - Absatz weltweit bis 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/173049/umfrage/weltweiter-absatz-von-smartphones-seit-2009/>. Abgerufen am 19.09.2025.
- [iFixit, 2025] iFixit (2025). Reparierbarkeit. <https://de.ifixit.com/reparierbarkeit>. Abgerufen am 23.09.2025.
- [IPCC, 2001] IPCC, Herausgeber (2001). *Climate Change 2001: The Scientific Basis*. Cambridge univ. press, Cambridge.
- [Jin et al., 2016] Jin, Y., Kim, J., und Guillaume, B. (2016). Review of Critical Material Studies. *Resources, Conservation and Recycling*, 113:77–87.
- [Johnson et al., 2014] Johnson, R., Kodama, A., und Willensky, R. (2014). The Complete Impact of Bicycle Use: Analyzing the Environmental Impact and Initiative of the Bicycle Industry.

- [Kanz et al., 2018] Kanz, O., May, J., und Waffenschmidt, E. (2018). Ökobilanzieller Vergleich von Elektrofahrzeugen und Fahrzeugen mit Verbrennungsmotor.
- [Kappas, 2009] Kappas, M. (2009). *Klimatologie - Klimaforschung im 21. Jahrhundert - Herausforderung für Natur- und Sozialwissenschaften*. Spektrum Akademischer Verlag Heidelberg, 1. Auflage.
- [Kastanaki und Giannis, 2021] Kastanaki, E. und Giannis, A. (2021). Dynamic Estimation of Future Obsolete Laptop Flows and Embedded Critical Raw Materials: The Case Study of Greece. *Waste Management*, 132:74–85.
- [KBA, 2024] KBA (2024). Fahrzeugalter von Pkw bis 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154506/umfrage/durchschnittliches-alter-von-pkw-in-deutschland/>. Abgerufen am 27.02.2025.
- [King, 2015] King, R. (2015). Carbon Emissions and Income Inequality: Technical Note. *Oxfam Technical Briefing*, Seite 12.
- [Kissling et al., 2012] Kissling, R., Fitzpatrick, C., Boeni, H., Luepschen, C., Andrew, S., und Dickenson, J. (2012). Definition of Generic Re-Use Operating Models for Electrical and Electronic Equipment. *Resources, Conservation and Recycling*, 65:85–99.
- [Klöpper, 1997] Klöpper, W. (1997). Life Cycle Assessment - From the Beginning to the Current State. *Environmental Science and Pollution Research*, 4(4):223–228.
- [Klöpper und Grahl, 2009] Klöpper, W. und Grahl, B. (2009). Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf - Einleitung. In *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*, Kapitel 1, Seiten 1–26. John Wiley & Sons, Ltd.
- [Kortmann und Piller, 2016] Kortmann, S. und Piller, F. (2016). Open Business Models and Closed-Loop Value Chains: Redefining the Firm-Consumer Relationship. *California Management Review*, 58:88–108.
- [Kurth und Oexle, 2022] Kurth, P. und Oexle, A. (2022). *Praxishandbuch der Kreislauf- und Rohstoffwirtschaft*. Springer Vieweg, Wiesbaden, 2. Auflage.

## D Literaturverzeichnis

- [Lange, 2017] Lange, U. (2017). *Kurzanalyse Nr. 18: Ressourceneffizienz Durch Remanufacturing - Industrielle Aufarbeitung von Altteilen*. VDI Zentrum Ressourceneffizienz.
- [Le Quéré et al., 2016] Le Quéré, C., Andrew, R. M., Canadell, J. G., Sitch, S., Korsbakken, J. I., Peters, G. P., Manning, A. C., Boden, T. A., Tans, P. P., Houghton, R. A., Keeling, R. F., Alin, S., Andrews, O. D., Anthoni, P., Barbero, L., Bopp, L., Chevallier, F., Chini, L. P., Ciais, P., Currie, K., Delire, C., Doney, S. C., Friedlingstein, P., Gkritzalis, T., Harris, I., Hauck, J., Haverd, V., Hoppema, M., Klein Goldewijk, K., Jain, A. K., Kato, E., Körtzinger, A., Landschützer, P., Lefèvre, N., Lenton, A., Lienert, S., Lombardozzi, D., Melton, J. R., Metzl, N., Millero, F., Monteiro, P. M. S., Munro, D. R., Nabel, J. E. M. S., Nakaoka, S.-i., O’Brien, K., Olsen, A., Omar, A. M., Ono, T., Pierrot, D., Poulter, B., Rödenbeck, C., Salisbury, J., Schuster, U., Schwinger, J., Séférian, R., Skjelvan, I., Stocker, B. D., Sutton, A. J., Takahashi, T., Tian, H., Tilbrook, B., Van Der Laan-Luijkx, I. T., Van Der Werf, G. R., Viovy, N., Walker, A. P., Wiltshire, A. J., und Zaehle, S. (2016). Global Carbon Budget 2016. *Earth System Science Data*, 8(2):605–649.
- [M. King, 2006] M. King, A. (2006). Reducing Waste: Repair, Recondition, Remanufacture or Recycle? *Sustainable Development*, 14:257–267.
- [Manhart et al., 2016] Manhart, A., Blepp, M., Fischer, C., und Graulich, K. (2016). Resource Efficiency in the ICT Sector. *Oeko-Institut e.V.*, Seite 85.
- [Mann, 2021] Mann, M. E. (2021). Beyond the Hockey Stick: Climate Lessons from the Common Era. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 118(39):e2112797118.
- [McDonough, 2003] McDonough, W. (2003). Applying the Principles of Green Engineering to Cradle-to-Cradle Design. *Environmental Science & Technology*.
- [McDonough und Braungart, 2002] McDonough, W. und Braungart, M. (2002). *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*. Turtleback.
- [McKeesick, 2025] McKeesick, M. (2025). ‘We’ve Been Dumbed-down’: Australian Farmers Want the Right to Repair Their Own Tractors Again. *The Guardian*.

- [McNeill, 2000] McNeill, J. R. (2000). *Something New under the Sun : An Environmental History of the Twentieth-Century World*. New York : W.W. Norton & Company.
- [Meadows, 1972] Meadows, D. H. (1972). *The Limits to Growth: A Report for the Club of Rome's Project on the Predicament of Mankind*. Universe Books, New York.
- [Mills, 2012] Mills, R. (2012). What It Means to Go Green: Reduce, Reuse, Repurpose and Recycle. *USU - Families and Communities*.
- [Ministère de la Transition écologique, 2022] Ministère de la Transition écologique (2022). Instructions Manual for the Display and the Calculation of the Repairability Index of Electrical and Electronic Equipments.
- [Molina und Rowland, 1974] Molina, M. J. und Rowland, F. S. (1974). Stratospheric Sink for Chlorofluoromethanes: Chlorine Atom-Catalysed Destruction of Ozone. *Nature*, 249(5460):810–812.
- [Mottschall, 2012] Mottschall, M. (2012). PROSA Fahrräder. Technischer bericht, Öko-Institut e.V., Berlin.
- [Münger, 2021] Münger, A. (2021). *Kreislaufwirtschaft Als Strategie Der Zukunft*. Haufe.
- [Nendza, 2026] Nendza, F. (2026). Eine Grünere Wahl - Outdoor Blog für Beratung, Know How und Inspiration. <https://www.globetrotter.de/magazin/eine-gruenere-wahl/>. Abgerufen am 10.01.2026.
- [Nickel, 2023] Nickel, L. (2023). Cradle-to-Gate: What Is It & How Does It Work in LCA?
- [Nygren und Antikainen, 2010] Nygren, J. und Antikainen, R. (2010). Use of Life Cycle Assessment (LCA) in Global Companies. *Reports of the Finnish Environment Institute*, 16:32.
- [O'Connell und Stutz, 2010] O'Connell, S. und Stutz, M. (2010). Product Carbon Footprint (PCF) Assessment of Dell Laptop - Results and Recommendations.

## D Literaturverzeichnis

- Proceedings of the 2010 IEEE International Symposium on Sustainable Systems and Technology*, Seiten 1–6.
- [Ogunniyi et al., 2009] Ogunniyi, I. O., Vermaak, M. K. G., und Groot, D. R. (2009). Chemical Composition and Liberation Characterization of Printed Circuit Board Comminution Fines for Beneficiation Investigations. *Waste Management*, 29(7):2140–2146.
- [Packard, 1960] Packard, V. (1960). *Die Große Verschwendung*. Econ, Hamburg.
- [Paul, 2020] Paul, M. (2020). z-Transformation einfach erklärt! Standardisierung leicht gemacht!
- [Pauly und Traufetter, 2016] Pauly, C. und Traufetter, G. (2016). Der Kreis ist heiß. *Der Spiegel*.
- [Paz et al., 2024] Paz, F. A. G., Heibeck, M., Parvez, A. M., Torrubia, J., van den Boogaart, K. G., und Raatz, S. (2024). Recovery of Materials from Refrigerator: A Study Focused on Product Distribution, Recyclability and LCA Evaluation. *Sustainability*, 16(3):1082.
- [Pero et al., 2018] Pero, F. D., Delogu, M., und Pierini, M. (2018). Life Cycle Assessment in the Automotive Sector: A Comparative Case Study of Internal Combustion Engine (ICE) and Electric Car. *Procedia Structural Integrity*, 12:521–537.
- [Pfanmüller, 2018] Pfanmüller, J. (2018). Geplante Obsoleszenz. In Pfanmüller, J., Herausgeber, *Kreative Volkswirtschaftslehre: Eine handlungs- und praxisorientierte Einführung in die Volkswirtschaftslehre*, Seiten 225–233. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- [Poppe, 2014] Poppe, E. (2014). *Reparaturpolitik in Deutschland, Zwischen Produktverschleiß Und Ersatzteilnot, SUSTAINUM Berlin 2014*. SUSTAINUM - Institut für zukunftsfähiges Wirtschaften, Berlin.
- [Poppe und Longmuß, 2019] Poppe, E. und Longmuß, J. (2019). Zu Begriff Und Theorie Der Geplanten Obsoleszenz. In *Geplante Obsoleszenz*, Seiten 17–38. transcript Verlag, Bielefeld.

- [Pörtner et al., 2022] Pörtner, H.-O., Roberts, D., Poloczanska, E., Mintenbeck, K., Tignor, M., Alegría, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S., und Möller, V. (2022). IPCC, 2022: Zusammenfassung Für Die Politische Entscheidungsfindung. Technischer Bericht 6, Deutsche IPCC-Koordinierungsstelle, Bonn; Die Luxemburger Regierung, Luxemburg; Bundesministerium für Klimaschutz, Umwelt, Energie, Mobilität, Innovation und Technologie, Wien; Akademie der Naturwissenschaften Schweiz SCNAT, ProClim.
- [Potting et al., 2017] Potting, J., Hekkert, M., Worrell, E., und Hanemaaijer, A. (2017). *Circular Economy: Measuring Innovation in Product Chains*. PBL Netherlands Environmental Assessment Agency.
- [Prakash et al., 2016a] Prakash, S., Antony, F., Köhler, D. A., und Liu, R. (2016a). *Ökologische und ökonomische Aspekte beim Vergleich von Arbeitsplatzcomputern für den Einsatz in Behörden unter Einbeziehung des Nutzerverhaltens (Öko-APC)*. Texte | 66/2016. Umweltbundesamt.
- [Prakash et al., 2016b] Prakash, S., Dehoust, G., Gsell, M., Schleicher, T., und Stamminger, D. R. (2016b). Einfluss der Nutzungsdauer von Produkten auf ihre Umweltwirkung: Schaffung einer Informationsgrundlage und Entwicklung von Strategien gegen „Obsoleszenz“. Technischer bericht, Umweltbundesamt.
- [Prakash et al., 2012] Prakash, S., Liu, R., Schischke, K., und Stobbe, D. L. (2012). *Zeitlich optimierter Ersatz eines Notebooks unter ökologischen Gesichtspunkten*. Texte | 44/2012. Umweltbundesamt.
- [Proske et al., 2020] Proske, M., Sánchez, D., Clemm, C., und Baur, S.-J. (2020). LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE FAIRPHONE 3. *Fraunhofer IZM*, Seite 69.
- [Pufé, 2020] Pufé, I. (2020). I. Teil von Der Theorie Zum Konzept. In *Nachhaltigkeit*, Utb-Titel Ohne Reihe, Seiten 17–142. UVK Verlag, 3.. Auflage.
- [Rapske und Stomporowski, 2017] Rapske, R. und Stomporowski, S. (2017). Nachhaltigkeit im Spiegel didaktischer Zugänge und ordnungspolitischer Vorgaben aus berufspädagogischer Perspektive. In *19. Hochschultage*, Köln.

## D Literaturverzeichnis

- [Reike et al., 2018] Reike, D., Vermeulen, W. J., und Witjes, S. (2018). The Circular Economy: New or Refurbished as CE 3.0? — Exploring Controversies in the Conceptualization of the Circular Economy through a Focus on History and Resource Value Retention Options. *Resources, Conservation and Recycling*, 135:246–264.
- [Riese & Müller, 2025] Riese & Müller (2025). Verantwortungsbericht 05. <https://www.r-m.de/de/verantwortung/>. Abgerufen am 08.07.2025.
- [Rockström et al., 2009] Rockström, J., Steffen, W., Noone, K., Persson, A., Chapin, F. S., Lambin, E. F., Lenton, T. M., Scheffer, M., Folke, C., Schellnhuber, H. J., Nykvist, B., de Wit, C. A., Hughes, T., van der Leeuw, S., Rodhe, H., Sörlin, S., Snyder, P. K., Costanza, R., Svedin, U., Falkenmark, M., Karlberg, L., Corell, R. W., Fabry, V. J., Hansen, J., Walker, B., Liverman, D., Richardson, K., Crutzen, P., und Foley, J. A. (2009). A Safe Operating Space for Humanity. *Nature*, 461(7263):472–475.
- [Rüdenauer et al., 2005] Rüdenauer, I., Gensch, C.-O., und Quack, D. (2005). *Eco-Efficiency Analysis of Washing Machines*. Öko-Institut e.V.
- [Rüdenauer und Prakash, 2020] Rüdenauer, I. und Prakash, S. (2020). *Ökonomische und ökologische Auswirkungen einer Verlängerung der Nutzungsdauer von elektrischen und elektronischen Geräten*. Öko-Institut e.V.
- [Rüdenauer et al., 2007] Rüdenauer, I., Seifried, D., und Gensch, C.-O. (2007). *Kosten und Nutzen eines Prämienprogramms für besonders effiziente Kühl- und Gefriergeräte*. Öko-Institut e.V.
- [Sánchez et al., 2022] Sánchez, D., Proske, M., und Baur, S.-J. (2022). *LIFE CYCLE ASSESSMENT OF THE FAIRPHONE 4*. Fraunhofer IZM.
- [Santarius, 2012] Santarius, T. (2012). Der Rebound-Effekt: Über Die Unerwünschten Folgen Der Erwünschten Energieeffizienz. *Wuppertal Institut*.
- [Schaffeld und Ruppach, 2023] Schaffeld, T. und Ruppach, T. (2023). Gigaset AG - Berichtsjahr 2023. <https://datenbank2.deutscher-nachhaltigkeitskodex.de/Profile/CompanyProfile/13377/de/2023/dnk>. Abgerufen am 05.06.2025.

- [Schupak, 2024] Schupak, A. (2024). Marketing a Tote Bag as Reusable Is Silly. Let's Say No to More Stuff. *The Guardian*.
- [Seifert, 2025] Seifert, F. (2025). Das große Reparatur-Defizit der Deutschen - WELT. <https://www.welt.de/wirtschaft/article68be8b8a0755415a0da973bc/Das-grosse-Reparatur-Defizit-der-Deutschen.html>. Abgerufen am 14.11.2025.
- [Sherman, 1998] Sherman, R. (1998). Before You Recycle, Choose to Reuse. <https://content.ces.ncsu.edu/before-you-recycle-choose-to-reuse>. Abgerufen am 12.11.2024.
- [Skolaut, 2018] Skolaut, W., Herausgeber (2018). *Maschinenbau: Ein Lehrbuch für das ganze Bachelor-Studium*. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [Soo et al., 2017] Soo, V. K., Peeters, J., Compston, P., Doolan, M., und Duflou, J. R. (2017). Comparative Study of End-of-Life Vehicle Recycling in Australia and Belgium. *Procedia CIRP*, 61:269–274.
- [Stahel, 2016] Stahel, W. R. (2016). The Circular Economy. *Nature*, 531(7595):435–438.
- [Statista Research Department, 2016] Statista Research Department (2016). Smartphones - Umfrage zu aufgetretenen Schäden Deutschland 2016. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/663298/umfrage/umfrage-zu-schaeden-an-smartphones-in-deutschland/>. Abgerufen am 21.02.2025.
- [Statistisches Bundesamt, 2021] Statistisches Bundesamt (2021). Umwelt: Abfallbilanz (Abfallaufkommen/-Verbleib, Abfallintensität, Abfallaufkommen Nach Wirtschaftszweigen). <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/197703/umfrage/recyclingquoten-der-hauptstroeme-von-abfaellen/>. Abgerufen am 21.02.2025.
- [Steiner et al., 2005] Steiner, R., Emmenegger, M. F., und Frischknecht, R. (2005). *Ökobilanz Kombi-Kühlschrank Electrolux ERB3105*. ESU - services.
- [Stendel et al., 2021] Stendel, M., Francis, J., White, R., Williams, P. D., und Woolings, T. (2021). Chapter 15 - The Jet Stream and Climate Change. In Letcher, T. M., Herausgeber, *Climate Change (Third Edition)*, Seiten 327–357. Elsevier.

## D Literaturverzeichnis

- [Stock, 2025] Stock, P. (2025). Appliances Were Once Built to Last - Now They're Built to Break. How Do We Fix It? *The Guardian*.
- [Subramanian, 2019] Subramanian, M. (2019). Anthropocene Now: Influential Panel Votes to Recognize Earth's New Epoch. *Nature*.
- [Suckling und Lee, 2015] Suckling, J. und Lee, J. (2015). Redefining Scope: The True Environmental Impact of Smartphones? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(8):1181–1196.
- [Sung et al., 2019] Sung, K., Cooper, T., und Kettley, S. (2019). Factors Influencing Upcycling for UK Makers. *Sustainability*, 11(3):870.
- [Sztangret, 2021] Sztangret, I. (2021). The Reuse Points in the Re-value Waste Concept of The Municipal Waste Sector. In *Conference Proceedings*, Cordoba, Spain.
- [Tans, 2023] Tans, D. P. (2023). Global Monitoring Laboratory - Carbon Cycle Greenhouse Gases. <https://gml.noaa.gov/ccgg/trends/mlo.html>. Abgerufen am 02.08.2023.
- [Team et al., 2023] Team, C. W., Lee, H., und Romero, J. (2023). IPCC, 2023: Summary for Policymakers.
- [Thiemann und Schneider, 2020] Thiemann, M. und Schneider, G. (2020). Smartphone- Reparatur- Studie 2020 Mit Schadendaten zu mehr als einer Million Smartphones. *WERTGARANTIE Beteiligungen GmbH*.
- [Tiemann und Wallbott, 2021] Tiemann, N. und Wallbott, T. (2021). Reparieren Statt Wegwerfen: Eine Studie Im Auftrag Der WERTGARANTIE SE Zur Entstehung von Elektroschrott.
- [Trek Bicycle, 2022] Trek Bicycle (2022). Trek Bicycle - Trek Bicycle 2021 Sustainability Report - Page 1. <https://view.publitas.com/trek-bicycle/trek-bicycle-2021-sustainability-report/page/1>. Abgerufen am 28.03.2025.
- [Trek Bicycle, 2024] Trek Bicycle (2024). Trek Bicycle - 2023 Sustainability\_ReportEdition\_EU\_DE-DE -

- Page 1. [https://view.publitas.com/trek-bicycle/2023-sustainability\\_reportedition\\_eu\\_de-de/page/1](https://view.publitas.com/trek-bicycle/2023-sustainability_reportedition_eu_de-de/page/1). Abgerufen am 28.03.2025.
- [Trinh et al., 2023] Trinh, L. T. K., Dan, T. H., und Giao, N. T. (2023). Ecological and Health Risks in the Life Cycle of Notebook Computers: A Review. *Journal of Energy Technology and Environment*.
- [Umweltbundesamt, 2012] Umweltbundesamt (2012). Der Blaue Engel, glaubwürdig und kompetent. <https://www.umweltbundesamt.de/sites/default/files/medien/publikation/long/4278.pdf>. Abgerufen am 10.01.2026.
- [Umweltbundesamt, 2025] Umweltbundesamt (2025). Emissionen des Verkehrs. <https://www.umweltbundesamt.de/daten/verkehr/emissionen-des-verkehrs>. Abgerufen am 23.09.2025.
- [UN Environment, 2019] UN Environment, Herausgeber (2019). *Global Environment Outlook – GEO-6: Healthy Planet, Healthy People*. Cambridge University Press, Cambridge.
- [UNEP, 2021] UNEP (2021). *Making Peace with Nature: A Scientific Blueprint to Tackle the Climate, Biodiversity and Pollution Emergencies*. United Nations.
- [United Nations, 1972] United Nations (1972). United Nations Conference on Environment and Development, Stockholm, Sweden, 5-16 June 1972. <https://www.un.org/en/conferences/environment/stockholm1972>. Abgerufen am 05.07.2023.
- [United Nations, 1992] United Nations (1992). United Nations Conference on Environment and Development, Rio de Janeiro, Brazil, 3-14 June 1992. <https://www.un.org/en/conferences/environment/rio1992>. Abgerufen am 05.07.2023.
- [United Nations, 2002] United Nations (2002). *Report of the World Summit on Sustainable Development: Johannesburg, South Africa, 26 August-4 September 2002*. United Nations, New York.

## D Literaturverzeichnis

- [United Nations, 2012] United Nations (2012). United Nations Conference on Sustainable Development, Rio+20 ... Sustainable Development Knowledge Platform - Future We Want - Outcome Document. <https://sustainabledevelopment.un.org/rio20>. Abgerufen am 05.07.2023.
- [United Nations, 2016] United Nations (2016). Report of the Conference of the Parties on Its Twenty-First Session, Held in Paris from 30 November to 11 December 2015. Addendum. Part Two: Action Taken by the Conference of the Parties at Its Twenty-First Session.
- [United Nations, 2022] United Nations (2022). *The Sustainable Development Goals Report 2022*. Nummer 22 in The Sustainable Development Goals Report. United Nations.
- [United Nations, 2023] United Nations (2023). THE 17 GOALS | Sustainable Development. <https://sdgs.un.org/goals>. Abgerufen am 05.07.2023.
- [Universität Zürich, 2025] Universität Zürich (2025). Datenanalyse mit SPSS. [https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse\\_spss.html](https://www.methodenberatung.uzh.ch/de/datenanalyse_spss.html). Abgerufen am 31.10.2025.
- [Van Eygen et al., 2016] Van Eygen, E., De Meester, S., Tran, H. P., und Dewulf, J. (2016). Resource Savings by Urban Mining: The Case of Desktop and Laptop Computers in Belgium. *Resources, Conservation and Recycling*, 107:53–64.
- [VDA, 2024] VDA (2024). Pkw-Neuzulassungen 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/74433/umfrage/neuzulassungen-von-pkw-in-deutschland/>. Abgerufen am 03.07.2025.
- [VDI, 2022] VDI (2022). *Emissionsminderung Behandlungsanlagen für Kühlgeräte und andere Wärmeübertrager-Geräte*. Nummer 2292 in VDI-Richtlinien. VDI-Richtlinien, Düsseldorf.
- [Vezzoli, 2018] Vezzoli, C. A. (2018). *Design for Environmental Sustainability*. Springer London, 2. Auflage.
- [von Carlowitz et al., 2012] von Carlowitz, H. C., Huss, J., und von Gadow, F. (2012). *Sylvicultura oeconomica: hausswirthliche Nachricht und naturmäßige Anweisung zur wilden Baum-Zucht*. Kessel, Remagen-Oberwinter.

- [Wagner, 2019] Wagner, A. (2019). Robert Bosch GmbH - Berichtsjahr 2019. <https://datenbank2.deutscher-nachhaltigkeitskodex.de/Profile/CompanyProfile/5108/de/2019/dnk>. Abgerufen am 05.06.2025.
- [Walcher und Leube, 2017] Walcher, D. und Leube, M. (2017). *Kreislaufwirtschaft in Design Und Produktmanagement*. Essentials. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- [Wang et al., 2013] Wang, F., Huisman, J., Stevels, A., und Baldé, C. P. (2013). Enhancing E-Waste Estimates: Improving Data Quality by Multivariate Input–Output Analysis. *Waste Management*, 33(11):2397–2407.
- [WCED, 1987] WCED (1987). Report of the World Commission on Environment and Development: Our Common Future.
- [Welfens, 2013] Welfens, Dr. M. (2013). Nachhaltige Nutzung der Mobiltelefone.
- [Wellbrock und Ludin, 2021] Wellbrock, W. und Ludin, D., Herausgeber (2021). *Nachhaltiger Konsum: Best Practices aus Wissenschaft, Unternehmenspraxis, Gesellschaft, Verwaltung und Politik*. Springer Fachmedien, Wiesbaden.
- [Welter und Fink, 2024] Welter, R. und Fink, H. (2024). Siemens AG - Nachhaltigkeitsbericht 2024. <https://tinyurl.com/mtyc6der>. Abgerufen am 05.06.2025.
- [Wernet et al., 2016] Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E., und Weidema, B. (2016). The Ecoinvent Database Version 3 (Part I): Overview and Methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9):1218–1230.
- [Wernink und Strahl, 2015] Wernink, T. und Strahl, C. (2015). Fairphone: Sustainability from the Inside-Out and Outside-In. In D’heur, M., Herausgeber, *Sustainable Value Chain Management: Delivering Sustainability Through the Core Business*, CSR, Sustainability, Ethics & Governance, Seiten 123–139. Springer International Publishing, Cham.
- [Wiedenbeck und Züll, 2001] Wiedenbeck, M. und Züll, C. (2001). Klassifikation mit Clusteranalyse: Grundlegende Techniken hierarchischer und K-means-Verfahren.

## D Literaturverzeichnis

- [Wieser und Troeger, 2015] Wieser, H. und Troeger, N. (2015). *Die Nutzungsdauer Und Obsoleszenz von Gebrauchsgütern Im Zeitalter Der Beschleunigung*. Kammer für Arbeiter und Angestellte für Wien.
- [Wilhelm und Kalcsics, 2023] Wilhelm, M. und Kalcsics, K. (2023). Diskussion einer Didaktik der Nachhaltigkeitswissenschaft. Auf der Suche nach einer Professionskompetenz zu BNE. *Journal für LehrerInnenbildung jlb 03-2023 Bildung für nachhaltige Entwicklung BNE*, Seiten 16–25.
- [Winograd, 2022] Winograd, T. (2022). Auf dem Weg in eine nachhaltige Zukunft. <https://www.bosch-presse.de/pressportal/de/de/auf-dem-weg-in-eine-nachhaltige-zukunft-243201.html>. Abgerufen am 03.04.2025.
- [WMO, 2022] WMO (2022). *State of the Global Climate 2021*, Band State of the Global Climate. Publications Board, WMO, Geneva, Switzerland.
- [Wolff B., 2025] Wolff B., K. A. (2025). Nachhaltigkeitsdidaktik. Universitäre Beiträge zu nachhaltiger Entwicklung (NE) und Bildung für nachhaltige Entwicklung (BNE). In Keil A., H. A., Herausgeber, *BNE in der Lehrkräftebildung - Erkenntnisse aus Forschung und Praxis*, Seiten 19–33. Dietze J.
- [Xiao et al., 2015] Xiao, R., Zhang, Y., Liu, X., und Yuan, Z. (2015). A Life-Cycle Assessment of Household Refrigerators in China. *Journal of Cleaner Production*, 95:301–310.
- [Xiao et al., 2016] Xiao, R., Zhang, Y., und Yuan, Z. (2016). Environmental Impacts of Reclamation and Recycling Processes of Refrigerators Using Life Cycle Assessment (LCA) Methods. *Journal of Cleaner Production*, 131:52–59.
- [Zink et al., 2014] Zink, T., Maker, F., Geyer, R., Amirtharajah, R., und Akella, V. (2014). Comparative Life Cycle Assessment of Smartphone Reuse: Repurposing vs. Refurbishment. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19.
- [Ziout et al., 2014] Ziout, A., Azab, A., und Atwan, M. (2014). A Holistic Approach for Decision on Selection of End-of-Life Products Recovery Options. *Journal of Cleaner Production*, 65:497–516.

- [ZIV, 2025a] ZIV (2025a). E-Bikes - Absatz in Deutschland 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/152721/umfrage/absatz-von-e-bikes-in-deutschland/>. Abgerufen am 03.04.2025.
- [ZIV, 2025b] ZIV (2025b). Fahrradabsatz in Deutschland 2024. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/154146/umfrage/fahrradabsatz-in-deutschland-seit-2000/>. Abgerufen am 03.04.2025.
- [ZVEI, 2024a] ZVEI (2024a). Kühlgeräte - Absatz in Deutschland bis 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/557159/umfrage/absatz-von-kuehlgeraeten-in-deutschland/>. Abgerufen am 10.03.2025.
- [ZVEI, 2024b] ZVEI (2024b). Waschmaschinen - Absatz in Deutschland 2023. <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/556824/umfrage/absatz-von-waschmaschinen-in-deutschland/>. Abgerufen am 10.03.2025.

## Lebenslauf

*Der Lebenslauf ist aus Datenschutzgründen nur in der gedruckten Version enthalten.*