

Herrmann, Tayla

**LCA und EoL – Zur Behandlung des Produktlebensendes  
in Ökobilanzen und dessen tatsächlichen Einfluss auf die  
Gesamtbilanz**

**Thesis zur Erlangung des akademischen Grades eines Bachelor of  
Science der Hochschule Pforzheim im Studiengang BW / Ressour-  
ceneffizienz-Management im Sommersemester 2022**

Erstkorrektor:

Prof. Dr. Tobias Viere

Zweitkorrektor:

Dipl. Ing. Heidi Hottenroth

Betreuer am Fraunhofer ICT:

M. Sc. Michael Dieterle

Renningen, den 01.07.2022

Ich versichere, die beiliegende Bachelorthesis selbständig verfasst, keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie alle wörtlich oder sinngemäß übernommenen Stellen in der Arbeit gekennzeichnet zu haben.

Renningen, den 01.07.2022

*Tayla Herrmann*  
Tayla Herrmann

Danksagung

Ein großer Dank ist an Michael Dieterle auszusprechen, welcher mich über die drei Monate Verfassungszeitraum meiner Bachelorarbeit bestens betreut hat! Darüber hinaus bedanke ich mich für die Möglichkeit meine Bachelorarbeit am Fraunhofer-Institut für Chemische Technologie verfasst haben zu können.

## **Kurzfassung**

Die folgende Bachelorarbeit untersucht 50 Ökobilanzstudien, welche bezüglich ihrer Betrachtung des Produktlebensendes (auch EoL genannt) analysiert werden. Das Ziel ist es, hierbei Motivationsgründe abzuleiten, weshalb dem EoL in verschiedenen Produkt Ökobilanzen eine unterschiedliche Bedeutung zukommt und welche Konsequenzen dies für die jeweilige Gesamtbilanz hat. Mehr als 50 % dieser Studien betrachten das EoL nicht im Detail. Das EoL wird in 14 Studien lediglich vereinfacht betrachtet und in 14 weiteren Studien vollständig vernachlässigt. Für die Vereinfachte Betrachtung des EoLs lassen sich insgesamt vier Gründe identifizieren. Den größten Anteil mit 40 % der Studien ohne EoL Betrachtung begründen die Vernachlässigung durch Unwissenheit oder mangelnde Datenverfügbarkeit. Die Vernachlässigung bzw. vereinfachte Betrachtung des Produktlebensendes hat zur Folge, dass das EoL keinen oder nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis der Gesamtbilanz hat.

Es können verschiedene Möglichkeiten abgeleitet werden, wie Gründe für eine vernachlässigte bzw. vereinfachte EoL Betrachtung entkräftet werden können. Diese reichen von einfachen Lösungen, wie die Erweiterung der Systemgrenze, über konkrete Maßnahmen, wie die Anwendung der Life Cycle Gap Analysis. Diese Arbeit dient vor allem als Grundlagenuntersuchung für weitere wissenschaftliche Ausarbeitungen und ist als Motivationstreiber für diese zu sehen.

## **Abstract**

The following bachelor thesis examines 50 LCA studies, regarding their consideration of the end-of-life (EoL) phase. The goal of this work is to derive the reasons why EoL is of different importance in different product LCAs and what consequences this has for the overall balance. More than 50 % of these studies do not consider the EoL in detail. The EoL is only considered in a simplified way in 14 studies and completely neglected in 14 other studies. Four reasons can be identified for the simplified consideration of EoL. With 40 %, the largest proportion of the studies that neglect the EoL phase, justify their EoL consideration through missing knowledge or lack of available data. The neglect or simplified consideration of the product's EoL has the consequence that the EoL phase has no or only a minor influence on the result of the overall balance. Various possibilities are examined how reasons for a neglected or simplified EoL consideration can be invalidated. These range from simple solutions, such as extending the system boundary, to concrete measures, such as applying the Life Cycle Gap analysis. This work serves primarily as a basic investigation for further scientific work and is to be seen as a motivation driver for future analyses.

## **Inhaltsverzeichnis**

Abkürzungsverzeichnis .....	VI
Abbildungsverzeichnis .....	VII
Tabellenverzeichnis .....	VIII
1 Einleitung .....	1
2 Motivation .....	2
2.1 Motivation und Problemstellung .....	2
2.2 Forschungsfragen .....	3
2.3 Aufbau der Arbeit .....	4
3 Das Produktlebensende in Ökobilanzen .....	5
4 Methoden und geplante Vorgehensweise .....	7
4.1 Methodische Vorgehensweise zur Identifizierung geeigneter Studien .....	7
4.2 Methodische Vorgehensweise zur Auswertung geeigneter Studien .....	10
5 Ergebnisse .....	15
5.1 Auswertung geeigneter LCA Studien .....	15
5.2 Mögliche Gründe für eine vernachlässigte EoL Betrachtung .....	22
5.2.1 Methodische Gründe .....	24
5.2.2 Zielbezogene Gründe .....	26
5.2.3 Wirtschaftliche Gründe .....	27
5.3 Einflüsse auf die Gesamtbilanz .....	28
5.3.1 Einfluss des EoLs in Studien mit detaillierter EoL Betrachtung .....	29
5.3.2 Einfluss des EoLs in Studien mit vereinfachter EoL Betrachtung ....	31
5.3.3 Einfluss des EoLs in Studien mit vernachlässigter EoL Betrachtung	33
6 Diskussion und kritische Würdigung .....	36
6.1 Erste Empfehlungen zur Überwindung bestehender Gründe für eine vernachlässigte oder vereinfachte EoL Betrachtung .....	37
6.2 Einschränkungen der Arbeit .....	40
7 Zusammenfassung und Ausblick .....	43
<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>45</b>
<b>Anhang .....</b>	<b>52</b>

## Abkürzungsverzeichnis

IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
UN	United Nations
ISO	International Organization for Standardization
EoL	End-of-life
LCA	Life cycle assessment
PLA	Poly lactide
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
THG	Treibhausgas
KrWG	Kreislaufwirtschaftsgesetz
LCC	Life cycle costing
IT	Informationstechnik
k. A.	keine Angabe
PEFCR	Product Environmental Footprint Category Rules
MgO	Magnesium Oxid
SIP	Structural insulated panel
VRFB	Vanadium Redox Flow Battery
LCGA	Life cycle gap analysis
LCG	Life cycle gap

## Abbildungsverzeichnis

Abb. 1: Aufbau der Bachelorarbeit .....	4
Abb. 2: Abfallhierarchie gem. §6 KrWG.....	6
Abb. 3: Entscheidungsdiagramm zur Identifizierung geeigneter Studien .....	8
Abb. 4: Verteilung der untersuchten Studien bezüglich ihren Systemgrenzen ...	16
Abb. 5: Verteilung der Studien gemäß der EoL Betrachtung.....	17
Abb. 6: Aufteilung der Studien mit einer vereinfachten EoL Betrachtung gemäß den Begründungen .....	21
Abb. 7: Verteilung der Ökobilanzen gemäß ihren Einschränkungen in Bezug auf die EoL Betrachtung .....	23
Abb. 8: Genauere Betrachtung der methodischen Gründe .....	25
Abb. 9: Rückschlüsse aus der EoL Betrachtung auf die Gesamtbilanz bei Studien mit einer detaillierten EoL Betrachtung .....	29
Abb. 10: Rückschlüsse aus der EoL Betrachtung auf die Gesamtbilanz bei Studien mit einer vereinfachten EoL Betrachtung .....	32
Abb. 11: Rückschlüsse aus der EoL Betrachtung auf die Gesamtbilanz bei Studien mit einer vernachlässigten EoL Betrachtung .....	34
Abb. 12: Zusammenhang zwischen der EoL Betrachtung und dem Rückschluss auf dessen Relevanz für die Gesamtbilanz.....	36
Abb. 13: Möglicher Ablauf der Recherche mittels Nutzung der Literaturdatenbank Web of Science .....	41

## Tabellenverzeichnis

Tab. 1: Suchstrings und Suchmaschinen für die Recherche von LCA Studien....	9
Tab. 2: Überblick über die wichtigsten Daten aus der Auswertung der Studien....	14
Tab. 3: Branchen der untersuchten Produktsysteme .....	15
Tab. 4: Identifizierte Ökobilanzstudien mit einer detaillierten EoL Betrachtung .....	18
Tab. 5: Identifizierte Ökobilanzstudien mit einer vereinfachten EoL Betrachtung .....	20
Tab. 6: Studien ohne Informationen über die vernachlässigte EoL Betrachtung ...	23
Tab. 7: Studien mit vernachlässigter EoL Betrachtung aufgrund methodischer Gründe .....	24
Tab. 8: Studien mit vernachlässigter EoL Betrachtung aufgrund zielbezogener Gründe .....	26
Tab. 9: Studien mit detaillierter EoL Betrachtung, die keinen oder einen geringen Einfluss des EoLs auf die Gesamtbilanz wahrnehmen .....	30
Tab. 10: Studien mit detaillierter EoL Betrachtung, die einen relevanten Einfluss des EoLs auf die Gesamtbilanz wahrnehmen .....	31
Tab. 11: Studien mit vereinfachter EoL Betrachtung, die keinen oder einen geringen Einfluss des EoLs auf die Gesamtbilanz wahrnehmen .....	33
Tab. 12: Studien mit vereinfachter EoL Betrachtung, ohne einen Rückschluss auf die Gesamtbilanz.....	33
Tab. 13: Studien mit vernachlässigter EoL Betrachtung, ohne einen Rückschluss auf die Gesamtbilanz .....	35
Tab. 14: Studien ohne Angaben zur Behandlung des EoLs.....	37

## 1 Einleitung

Im April dieses Jahres ist der neue und letzte Teilbericht des IPCCs (Intergovernmental Panel on Climate Change) zum Thema Klimaschutz veröffentlicht worden. Eine der Hauptaussagen des Berichtes ist, dass sofortige Maßnahmen getroffen werden müssen, um die globale Erwärmung gemäß dem Ziel des Pariser Klimaabkommen von 2015 auf möglichst unter 1,5 °C zu beschränken (vgl. IPCC, 2022, S. 21). Dieses Ziel zur Senkung der globalen Erwärmung ist ein Schritt zur nachhaltigen Entwicklung, welche seit der UN Klimakonferenz 1992 in Rio international als globales Leitbild akzeptiert wird (vgl. BMZ, URL). Zusätzlich zum Pariser Klimaabkommen von 2015 wurden im selben Jahr im Rahmen der 2030 Agenda für nachhaltige Entwicklung die 17 Sustainable Development Goals beschlossen. Mittels diesen 17 Zielen soll ein Leben in Frieden und Wohlstand für alle Menschen und den Planeten sichergestellt werden (vgl. UN, URL). Nachhaltige Entwicklung bedeutet, dass die Bedürfnisse der heutigen Zeit gestillt werden, ohne dabei zukünftige Generationen in ihrer Möglichkeit zur Befriedigung ihrer Bedürfnisse einzuschränken (vgl. World Commission on Environment and Development, 1987). Nachhaltigkeit und Umweltschutz liegen nahe beieinander: ohne eine funktionierende Umwelt haben zukünftigen Generationen nicht die Möglichkeiten in demselben Wohlstand zu leben, wie es heutige Generationen können (vgl. Moltesen und Bjorn, 2018, S. 46). Damit dies möglich ist, braucht es Bewertungsmethoden, die bis auf Produktebene als Entscheidungsunterstützung für mehr Nachhaltigkeit dienen.

Die Ökobilanzierung, im Englischen Life Cycle Assessment genannt, ist ein solches Instrument, welches prinzipiell alle relevanten Einflüsse miteinbezieht (vgl. Hauschild, Rosenbaum und Irving Olsen, 2018, S. 3). Eine Produktökobilanz untersucht dabei die Umweltaspekte und die potentiellen Umweltwirkungen eines Produktes über dessen gesamten Lebenszyklus, von der Rohstoffgewinnung über die Produktion, die Nutzung bis zum Produktlebensende. Je nach Setzung des Ziels und Untersuchungsrahmens einer Ökobilanz kann die Tiefe und Breite verschiedener Ökobilanzen schwanken (vgl. DIN EN ISO 14040:2006, S. 7). Dementsprechend gibt es auch verschiedene Ansätze, wie das Produktlebensende in einer Ökobilanz betrachtet werden kann. Zwar gibt der ISO Standard eine ganzheitliche Betrachtung

des Produktlebenszyklus in einer Ökobilanz vor, jedoch wird dieser Anspruch nicht immer erfüllt. Häufig sind komplexe Zusammenhänge und ein immer höher werdender Detaillierungsgrad Grund dafür (vgl. Bültmann, 1997, S. 13).

Auffallend ist, dass viele Studien, vor allem im Vergleich zu anderen Lebenszyklusphasen, keinen Fokus auf das Produktlebensende, im Englischen auch als „end-of-life (EoL)“ bezeichnet, legen. He et al. (2020), Dias-Ramirez et al. (2020), und Jirapornvaree, Suppadit und Kumar (2021) sind Beispiele dafür. In anderen Studien wiederum wird das EoL im Detail betrachtet, teilweise sogar obwohl andere Lebenszyklusphasen einen erheblich höheren Einfluss auf die Gesamtbilanz haben. Ein Beispiel hierfür ist die unternehmenseigene LCA-Studie für Nespresso Kapseln von Nestlé: Kaffeeanbau und Zubereitung haben lebenszyklusübergreifend den größten Beitrag am Treibhauspotential. Gleichzeitig steht die Aluminium-Kapsel seit geraumer Zeit in der Öffentlichkeit aufgrund ihres hohen Abfallaufkommens in der Kritik (vgl. Nestlé, URL). Um weitere Gründe und Handlungsmuster herausfinden, weshalb es in diesem Zusammenhang unterschiedliche Betrachtungsformen gibt, wird in dieser Bachelorarbeit das Produktlebensende und dessen Rolle in Ökobilanzstudien genauer untersucht und analysiert.

## **2 Motivation**

### **2.1 Motivation und Problemstellung**

Eine klassische Vorgehensweise bei der Auswertung in Produktökobilanzen ist die Hotspotanalyse. Hierbei werden die Lebenszyklusphasen eines Produktes, die den größten Beitrag zu den Umweltwirkungen aufzeigen (Ergebnisse bspw. mittels Balkendiagramm dargestellt), genauer untersucht. Das Problem bei der Hotspotanalyse ist, dass Phasen, die zunächst aus einer Einzelbetrachtung heraus einen geringen Beitrag zu den Umweltwirkungen aufzeigen, bei genauerem Hinsehen ebenfalls eine relevante Rolle spielen können. Hierzu zählt insbesondere das Produktlebensende, welches isoliert betrachtet vermehrt als wenig einflussreich eingestuft wird. Dass dies oftmals eine Fehleinschätzung ist, kann durch eine detailliertere Betrachtung des EoLs aufgezeigt werden. So kann das gesamte Treibhausgaspotential eines PLA Trinkbechers durch eine alternative EoL Behandlung beispielsweise von 28,1 g CO<sub>2</sub> auf 11,1 g CO<sub>2</sub> gesenkt werden. Die EoL Phase des Bechers würde in

einem Balkendiagramm einzeln betrachtet jedoch nicht als Hotspot identifiziert werden, da sie nur circa 1 % zum gesamten THG Potential des Bechers beiträgt. Letztlich wird aber durch die genaue bzw. verknüpfte Betrachtung der Ergebnisse des Produktlebensendes und der Herstellung (im Sinne möglichst geschlossener Kreisläufe) eine deutliche Verbesserung erzielt (vgl. Dieterle und Ginter, 2022, S. 15 ff.). Wie bereits erwähnt, befindet sich das EoL von Produkten in Ökobilanzen oftmals nicht innerhalb der Systemgrenze und wird nicht betrachtet. Basierend darauf und auf den Annahmen, dass verschiedene Ökobilanzen unterschiedliche EoL Betrachtungen modellieren und dass die Produktions- und/oder Nutzungsphase meist die Hotspots in den Studien bilden, wird angenommen, dass dem Produktlebensende in Ökobilanzstudien generell vergleichsweise zu wenig Aufmerksamkeit gewidmet wird. Dass das Produktlebensende dennoch einen Einfluss auf das Ergebnis der Ökobilanz haben kann, zeigt beispielsweise die Studie von Dieterle und Ginter (2022). Dementsprechend liegt dieser Bachelorarbeit folgende These zu Grunde: Das Produktlebensende wird in verschiedenen Ökobilanzstudien unterschiedlich betrachtet und speziell dem Produktlebensende wird vergleichsweise zu wenig Relevanz für das Ergebnis der Studie zugeschrieben. Daher kann es von hohem Wert sein, das Produktlebensende detaillierter zu betrachten und zu untersuchen. Zur Prüfung dieser These werden im Rahmen dieser Arbeit 50 Produktökobilanzstudien gesichtet und bezüglich ihres Umgangs mit dem Produktlebensende analysiert. Des Weiteren lassen sich aus der These Forschungsfragen ableiten, welche in Kapitel 2.2 genannt werden.

Das Ziel dieser Bachelorarbeit ist es, Motivationsgründe und mögliche Handlungsmuster abzuleiten, weshalb dem EoL in verschiedenen Produktökobilanzen eine unterschiedliche Bedeutung zukommt und welche Konsequenzen dies für die jeweilige Gesamtbilanz hat.

## **2.2 Forschungsfragen**

Basierend auf der in Kapitel 2.1 genannten These lassen sich folgende Forschungsfragen ableiten:

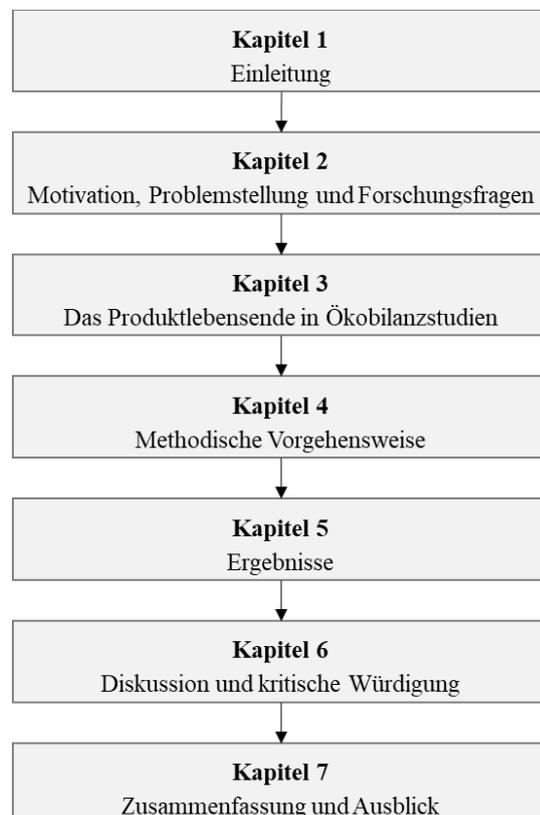
1. Weshalb wird dem Produktlebensende eine unterschiedliche Bedeutung in verschiedenen Ökobilanzstudien eingeräumt?
2. Lassen sich Gründe und mögliche Handlungsmuster für die unterschiedliche Bedeutung ableiten?
3. Wird dem Produktlebensende im Vergleich zu anderen Lebenszyklusphasen mehrheitlich wenig Relevanz zugeschrieben?
4. Welche Konsequenz hat eine vernachlässigte oder vereinfachte Betrachtung des Produktlebensendes für die Gesamtbilanz?
5. Wie lassen sich die Gründe und Handlungsmuster für die Betrachtung des Produktlebensendes verändern und welche Verbesserungspotentiale lassen sich im Umgang mit dem Produktlebensende in Ökobilanzstudien ableiten?

Diese Fragen gilt es im Verlauf der folgenden Arbeit zu beantworten.

### 2.3 Aufbau der Arbeit

Das Flussdiagramm in Abbildung 1 zeigt den Aufbau der Bachelorarbeit.

Abbildung 1. Aufbau der Bachelorarbeit



Die Einleitung bildet das erste Kapitel, während in Kapitel 2 die Motivation, Problemstellung und die Forschungsfragen thematisiert werden. In Kapitel 3 wird zunächst eine Übersicht über das Produktlebensende in Ökobilanzen und dessen möglichen Betrachtungsformen gegeben. Anschließend werden in Kapitel 4 die Methoden behandelt, wie bei der Recherche und Auswertung von Produktökobilanzen vorgegangen wird. Kapitel 5 zeigt dann die Ergebnisse inklusive Ableitung möglicher Gründe und Handlungsmuster bezüglich verschiedener EoL Betrachtungen. Eine Diskussion und kritische Würdigung der Methodik und Ergebnisse erfolgt in Kapitel 6. Teil dieses Kapitels ist ebenfalls das Aufzeigen von möglichen Verbesserungspotentialen im Umgang mit dem Produktlebensende. Abschließend folgt das Fazit und der Ausblick in Kapitel 7.

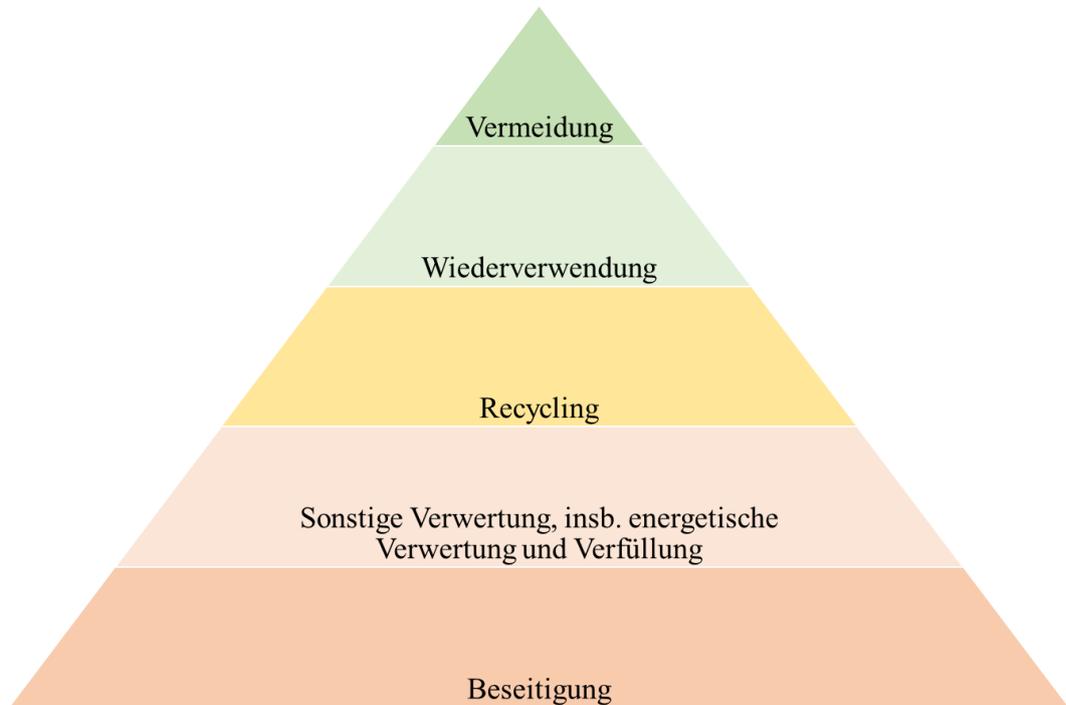
### **3 Das Produktlebensende in Ökobilanzen**

Es gibt verschiedene Ansätze, wie mit dem Produktlebensende in Ökobilanzen umgegangen wird. Durch den Untersuchungsrahmen und die Systemgrenze wird festgelegt, ob und inwiefern es in eine Studie mit einbezogen wird. Bei einer cradle-to-gate oder cradle-to-operation Betrachtung wird die EoL Phase beispielsweise vollständig vernachlässigt und ist nicht innerhalb der Systemgrenze. Cradle-to-gate, im Deutschen von der Wiege bis zum Tor, bedeutet, dass ein Produkt nur von der Rohstoffbereitstellung bis zum Verlassen der Werkstore bewertet wird. Cradle-to-operation bedeutet von der Wiege bis zum Betrieb und unterscheidet sich vom cradle-to-gate nur insofern, dass die Nutzungsphase eines Produktes noch innerhalb der Systemgrenze liegt (vgl. Ecochain, URL). Des Weiteren gibt es den cradle-to-grave (dt. von der Wiege bis zur Bahre) und den cradle-to-cradle (dt. von der Wiege bis zur Wiege) Ansatz, bei welchen das Produktlebensende innerhalb der Systemgrenze liegt. Im Unterschied zum cradle-to-grave Ansatz ist der cradle-to-cradle Ansatz eher als eine Art visionäre Strategie bzw. Utopie zu verstehen, dessen Ziel es ist, technische und biologische Kreisläufe vollständig zu schließen (vgl. McDonough und Braungart, 2002).

Das Kreislaufwirtschaftsgesetz (KrWG) beschreibt verschiedene Methoden, wie mit einem Produkt in dessen Lebensende, also einem Abfall, umgegangen werden kann bzw. muss. Ein Abfall ist laut §3 KrWG jeder Stoff oder Gegenstand, dessen

sich der Besitzer entledigt, entledigen will oder entledigen muss. Die Abfallhierarchie bestimmt hier die gewünschte Reihenfolge im Umgang mit Abfällen. Sie ist in Abbildung 2 dargestellt.

Abbildung 2. Abfallhierarchie gem. §6 KrWG



Die Pyramide ist von oben nach unten zu lesen. An erster Stelle ist die Abfallvermeidung, d.h. im besten Fall ist ein Abfallaufkommen zu vermeiden. Die Wiederverwendung im Sinne des Gesetzes ist, wenn ein Produkt oder dessen Bestandteile für denselben Zweck wiederverwendet werden können, für den sie ursprünglich gedacht waren. Das Recycling beschreibt jedes Verwertungsverfahren, durch das Abfälle durch Erzeugnisse, Stoffe, oder Materialien für den ursprünglichen oder für andere Zwecke aufbereitet werden. Die energetische Verwertung wird hierbei ausgeschlossen. Diese findet sich an vierter Stelle der Hierarchie, der sonstigen Verwertung, wieder. Bei der energetischen Verwertung werden Materialien als Brennstoff verwendet, um Energie zu erzeugen. Die Verfüllung ist ebenfalls eine Möglichkeit der sonstigen Verwertung, bei welcher ungefährliche Abfälle für die Rekultivierung von Abgrabungen oder für die Landschaftsgestaltung genutzt werden (z.B. Schuttberge). An letzter Stelle der Abfallhierarchie folgt die Beseitigung. Als Beseitigung wird jedes Verfahren bezeichnet, welches keine Verwertung ist. Zu den

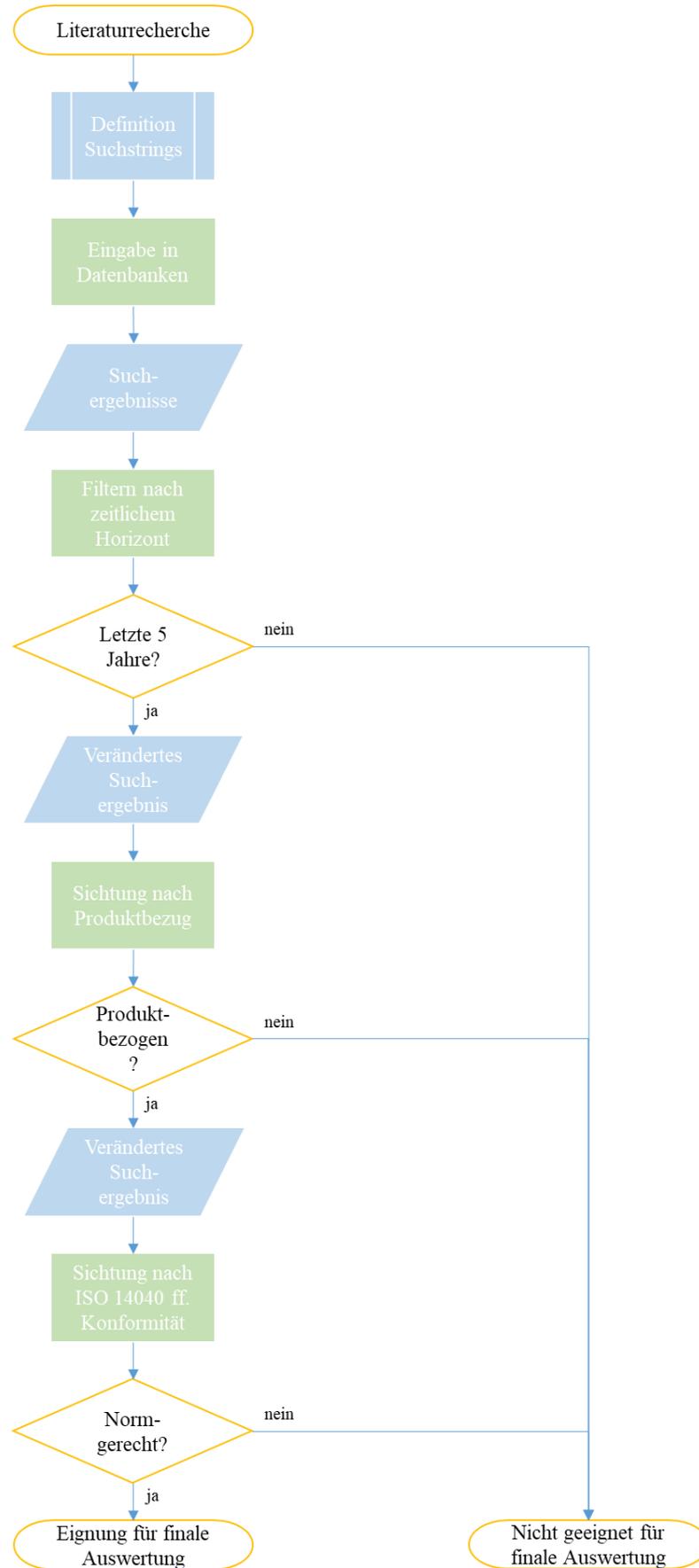
Beseitigungsverfahren zählen beispielsweise Lagerungen auf Deponien, Verpressung, Einleitung in Gewässer, und Verbrennungen an Land (vgl. KrWG, §3 ff.). Theoretisch können alle in der Abfallhierarchie genannten möglichen Behandlungsarten von Abfällen in einer Ökobilanz betrachtet werden. Die Frage ist lediglich, ob das Produktlebensende überhaupt innerhalb der Systemgrenze liegt und wenn ja, wie detailliert es betrachtet wird.

## **4 Methoden und geplante Vorgehensweise**

### **4.1 Methodische Vorgehensweise zur Identifizierung geeigneter Studien**

Der Ausgangspunkt für die Identifizierung geeigneter Studien ist eine Literaturrecherche. In folgender Abbildung 3 ist die genaue Vorgehensweise der Literaturrecherche in Form eines Flussdiagramms nachzuvollziehen. Der Aufbau und die Darstellung entsprechen dem Standard DIN 6601 (vgl. DIN 6601, 1983).

Abbildung 3. Entscheidungsdiagramm zur Identifizierung geeigneter Studien



Im ersten Schritt wird für die Recherche von geeigneten Ökobilanzstudien eine Suchwortliste mit verschiedenen Suchstrings, Suchmaschinen und Datenbanken erstellt. Die Formulierung der Suchstrings erfolgt weitläufiger und genereller, da die Recherche viele unterschiedliche Branchen und Produktgruppen abdecken soll. Zudem müssen die Suchstrings so gewählt werden, dass die Suchergebnisse bezüglich der EoL Betrachtung nicht eingeschränkt werden. So besteht beispielsweise die Gefahr, dass ein Suchstring mit den Elementen „EoL“ oder „end-of-life“ Studien, die das Produktlebensende nicht betrachten, nicht identifiziert. Für das Ziel dieser Bachelorarbeit sind jedoch genau diese Studien relevant. Da vermehrt Studien auf Englisch veröffentlicht werden, werden die Suchstrings außerdem in Englisch definiert. Die Suchstrings und die genutzte Suchmaschine oder Datenbank sind in Tabelle 1 zu sehen. Falls bei der Recherche ein Zeitraum eingegrenzt wird, ist dieser ebenfalls in der Tabelle 1 angegeben.

Tabelle 1. Suchstrings und Suchmaschinen für die Recherche von LCA Studien

Nr.	Suchstring	Suchmaschine	Zeitraum
1	“LCA study pdf”	Google	
2	“product LCA” AND study	Google	
3	“life cycle assessment” AND study	Google Scholar	2017 – 2022
4	“life cycle assessment”	Science direct	2021 – 2022
5	lca	Science direct	2020 – 2022
6	lca	Springer Link	2017 – 2022
7	“carbon footprint report”	Google	
8	lca AND study	EconBiz	2017 – 2022
9	lca AND “life cycle assessment”	Web of Science	2017 - 2022

Aus der Eingabe der Suchstrings in die Datenbanken resultiert eine hohe Anzahl an Suchergebnissen, welche anschließend nach drei verschiedenen Entscheidungsmerkmalen eingeschränkt wird. Diese Entscheidungsmerkmale dienen dazu, eine Studie für die weitere Auswertung als geeignet einzustufen. Entsprechend dem Flussdiagramm in Abbildung 3 sind die Merkmale durch eine Raute dargestellt. Um die Aktualität und Relevanz abbilden zu können, filtert das erste Merkmal nach einem zeitlichen Horizont der letzten fünf Jahre. Nach der ersten Einschränkung der Suchergebnisse durch den zeitlichen Horizont, erfolgt zum ersten Mal eine

Sichtung von Studien. Diese erfolgt gemäß dem zweiten Entscheidungskriterium, welches untersucht, ob eine Studie ein konkretes Produkt(-system) betrachtet. Eine Ökobilanz gemäß den ISO Normen 14040 und 14044 zur Erstellung von Ökobilanzen beurteilt die potentiellen Umweltwirkungen eines Produktsystems, wobei jede Ware oder Dienstleistung, die einen Nutzen erfüllt, als Produkt gilt (vgl. DIN EN ISO 14040:2006, S. 10). Letztlich folgt die Sichtung nach dem dritten Merkmal, welches zu Qualitätszwecken prüft, ob eine Studie gemäß der oben genannten ISO Normen aufgebaut und durchgeführt wurde. Eine Studie ist nicht für die weitere Auswertung geeignet, wenn sie nicht den Merkmalen entspricht.

Anzumerken ist, dass der erste Prozess, nämlich die Eingabe der Suchstrings in die Datenbanken, zum Teil mehrere 100.000 Suchergebnisse liefert. Durch das Filtern nach dem zeitlichen Horizont wird die Trefferanzahl zwar reduziert, jedoch ist sie immer noch im höheren Tausenderbereich. Daraufhin folgt eine willkürliche Auswahl von Studien, was vorwiegend dem Faktor Zeit dieser Bachelorarbeit geschuldet ist. Das Vorgehen der Literaturrecherche ist damit nicht vollständig methodisch stringent und folglich eingeschränkt in der Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit. Dieser Aspekt wird später in Kapitel 6, einschließlich der Ableitung von Handlungsempfehlungen für zukünftige Untersuchungen, aufgegriffen und diskutiert.

#### **4.2 Methodische Vorgehensweise zur Auswertung geeigneter Studien**

Nach der Auswahl und dem Sichten der Studien bezüglich den ausgewählten Entscheidungsmerkmalen, gilt es die zentralen Elemente der LCA Studien auszuwerten. Hierfür wird eine Tabelle mit der Auflistung aller, für diese Arbeit zentralen Elementen erstellt. Zu diesen Elementen gehören:

- Autor und Erscheinungsjahr
- Titel der Studie
- Betrachtetes Produkt und Branche
- Motivation und Zielsetzung
- Untersuchungsrahmen mit Systemgrenze
- Funktionelle Einheit

- Zielgruppe
- Geografischer Bezug
- Mögliche Indikatoren für die EoL Betrachtung
- Behandlung des EoL
- Rückschlüsse, welchen Einfluss das EoL auf die Gesamtbilanz hat

Diese Elemente, die in Teilen dem Ziel- und Untersuchungsrahmen der jeweiligen Studie entsprechen, werden gewählt, da sie für die Auswertung der Studien bezüglich der Behandlung des Produktlebensendes als wichtig erscheinen. Des Weiteren sind zwei Elemente in der Tabelle aufgelistet, welche die Dokumentation vervollständigen. Hierzu gehören, ob die Lebenszykluskostenrechnung, im Englischen auch als „Life Cycle Costing (LCC)“ bezeichnet, ebenfalls ein Bestandteil einer Studie ist und welche Backgrounddatenbank beim Erstellen der Ökobilanz genutzt wird. Die komplette Tabelle ist unter „Recherche“ im Begleitmaterial dieser Arbeit zu finden dieser Arbeit enthalten.

Zum geografischen Bezug ist anzumerken, dass damit der geografische Kontext gemeint ist, in welchem sich das untersuchte Produkt der Studie einordnet. D.h., dass dieser nicht zwingend mit dem geografischen Bezug der gewählten Backgrounddaten übereinstimmen muss. Ein Beispiel für EoL Indikatoren ist die Life Cycle Gap (vgl. Dieterle, Schäfer und Viere, 2018).

Bei der Behandlung des EoLs werden die Studien bezüglich ihrer Betrachtung des Produktlebensendes eingeordnet. Für die Einordnung gibt es drei mögliche Szenarien.

1. Das Produktlebensende wird vernachlässigt,
2. Das Produktlebensende wird vereinfacht betrachtet,
3. Das Produktlebensende wird detailliert betrachtet.

Wichtig hierbei ist eine klare Definition, wann eine Betrachtung als vernachlässigt, vereinfacht oder detailliert gilt. Das Kreislaufwirtschaftsgesetz und die darin enthaltene Abfallhierarchie bilden eine gute Basis für diese Einordnung. Die Hierarchie ist wie folgt definiert:

1. Vermeidung,
2. Vorbereitung zur Wiederverwendung,
3. Recycling,

4. Sonstige Verwertung, insbesondere energetische Verwertung und Verfüllung,
5. Beseitigung.

Das erste Gebot im Umgang mit Abfall ist die Abfallvermeidung, wobei die Beseitigung die niedrigste Stufe der Hierarchie darstellt (vgl. KrWG, §6). Dementsprechend können die Terme „vernachlässigt“, „vereinfacht“, und „detailliert“ genau definiert werden.

*Vernachlässigt:* Die Behandlung des Produktlebensendes ist nicht im Untersuchungsrahmen der Studie enthalten. Das Produktlebensende liegt außerhalb der Systemgrenze.

*Vereinfachte Betrachtung:* Die Behandlung des Produktlebensendes ist im Untersuchungsrahmen der Studie enthalten. Sie erfolgt in Form der unteren zwei Stufen der Abfallhierarchie, d.h. es wird vor allem eine energetische Verwertung, Verfüllung oder Beseitigung des Produktes angenommen.

*Detaillierte Betrachtung:* Die Behandlung des Produktlebensendes ist im Untersuchungsrahmen der Studie enthalten. Sie erfolgt in Form der oberen drei Stufen der Abfallhierarchie, d.h. es wird eine Vermeidung, Vorbereitung zur Wiederverwendung oder Recycling angenommen.

Dennoch ist die Einteilung in die Kategorien nicht immer eindeutig. Manche Studien betrachten nicht nur ein Produktsystem, sondern mehrere und vergleichen die ermittelten Ergebnisse miteinander. Die verglichenen Produkte erwarten nicht immer dieselbe Behandlung im Produktlebensende, was die Einteilung in eine vernachlässigte, vereinfachte oder detaillierte Betrachtung erschwert. In diesem Fall gilt: sobald eines der untersuchten Produkte im Produktlebensende (teilweise oder vollständig) gemäß der ersten drei Möglichkeiten der Abfallhierarchie behandelt wird, ist die EoL Betrachtung als detailliert einzustufen. Beispiele hierfür liefern Del Pero, Delogu und Pierini (2018) und Lombardi et al. (2017). Eine Ausnahme ist jedoch, wenn es ein klares Hauptprodukt gibt. Dann erfolgt die Einstufung gemäß der EoL Betrachtung des Hauptproduktes. Ein Beispiel hierfür bietet Agyekum, Fortuin und van der Harst (2017). Das Hauptziel dieser Studie ist die Ermittlung des ökologischen Fußabdrucks eines Fahrradrahmens aus Bambus. Lediglich

in einem weiteren Schritt soll dieser mit dem ökologischen Fußabdruck von konventionellen Fahrradrahmen verglichen werden. Somit ist der Rahmen aus Bambus das Hauptprodukt, nach welchem die Einstufung der EoL Betrachtung erfolgt (vgl. Agyekum, Fortuin und van der Harst, 2017).

Ein weiterer Grund für eine erschwerte Einstufung kann sein, dass ein Produkt demontiert wird und die verschiedenen Materialien unterschiedlich behandelt werden. Beispielstudien hierfür sind unter anderem Morales-Mora et al. (2021), L'Abbate, Dassisti und Olabi (2018), und Rossi et al. (2020). Auch hier gilt: sobald ein Material recycelt, wiederverwendet oder gar nicht erst als Abfall entsteht, wird eine detaillierte Betrachtung des EoLs definiert. Ein letzter Punkt ist die Möglichkeit, dass mehrere Optionen für die Betrachtung des EoLs eines Produktes in Frage kommen und demnach auch verschiedene EoL Szenarien in einer Studie modelliert und verglichen werden. So beispielsweise bei Fieschi und Pretato (2018), Jones, Gilbert und Stamford (2020), und Sözer und Sözen (2020). In diesem Fall gilt das Produktlebensende ebenfalls als detailliert betrachtet.

Nach einer ersten detaillierten Auswertung der Ökobilanzstudien mittels der oben genannten zentralen Elemente können erste Gründe und Handlungsmuster im Umgang mit dem Produktlebensende abgeleitet werden. Da die Erstfassung der Tabelle aller 50 Studien als sehr detailliert angesehen werden kann, werden in Tabelle 2 die wichtigsten Daten noch einmal anhand von zehn Beispielstudien zusammengefasst. Die vollständige Tabelle ist unter „Übersicht“ im Begleitmaterial der Arbeit zu finden.

Tabelle 2. Überblick über die wichtigsten Daten aus der Auswertung der Studien

Nr.	Autor:in	Jahr	Titel	Branche	Scope	Geo- grafie	EoL Be- trachtung
1	Baumann et al.	2017	CO2 Footprint and Life-Cycle Costs of Electrochemical Energy Storage for Stationary Grid Applications	Energiespeichersysteme/Batterien	cradle to operation	k. A.	vernachlässigt
2	Dieterle, Ginter	2022	Life cycle (gap) analysis for advanced material recycling of PLA cups	Nahrungsmittel-/Getränke-Branche	cradle to grave/cradle	EU, US	detailliert
3	Koch, Toedter, Weber	2020	Ökobilanz von Pkws mit verschiedenen Antriebssystemen	Kraftfahrzeuge/Transport	cradle to operation	CN, EU	vernachlässigt
4	da Silva Lima et al.	2021	Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems	Energiespeichersysteme/Batterien	cradle to cradle	GLO	detailliert
5	Weber et al.	2018	Life cycle assessment of a Vanadium Redox Flow Battery	Energiespeichersysteme/Batterien	cradle to grave	GLO	detailliert
6	Morales-Mora et al.	2021	Life cycle assessment of a novel bipolar electrodiagnosis-based flow battery concept and its potential use to mitigate the intermittency of renewable energy generation	Energiespeichersysteme/Batterien	cradle to grave	MEX	detailliert
7	Herausgeber: IBU	2019	Umwelt-Produktdeklaration - Betonpflastersteine GONDELDMANN GmbH & Co. KG	Bauwesen/Baustoffe	cradle to gate	DE	vernachlässigt
8	Bekel, Pauliuk	2019	Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany	Kraftfahrzeuge/Transport	cradle to grave	DE	vereinfacht
9	Siret et al.	2018	PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications	Energiespeichersysteme/Batterien	cradle to cradle	EU, EFTA	detailliert
10	Dell Technologies, thinkstep AG	2019	Life Cycle Assessment of Dell Latitude 7300 25th Anniversary Edition	IT Ausstattung	cradle to grave	EU, US	detailliert

Die Tabelle gibt eine Übersicht über den Autor und Titel und in welchem Jahr die Studien veröffentlicht wurden. Darüber hinaus ist die Branche und die Systemgrenze nachzuvollziehen. Die Geografie und die Tiefe der EoL Betrachtung sind ebenfalls aufgelistet. Für die Auswertung der Studien wird die Tabelle in einem weiteren Schritt um eine Spalte erweitert. In dieser wird zusätzlich die Begründung

für die entsprechende Tiefe der EoL Betrachtung festgehalten. Dies ist ebenfalls in der Tabelle „Übersicht“ im Begleitmaterial zu sehen.

## 5 Ergebnisse

### 5.1 Auswertung geeigneter LCA Studien

Insgesamt werden 50 geeignete Studien identifiziert. Diese können gemäß den untersuchten Produktsystemen in zehn verschiedene Branchen eingeordnet werden. Die Branchen sind in folgender Tabelle 3 zu sehen.

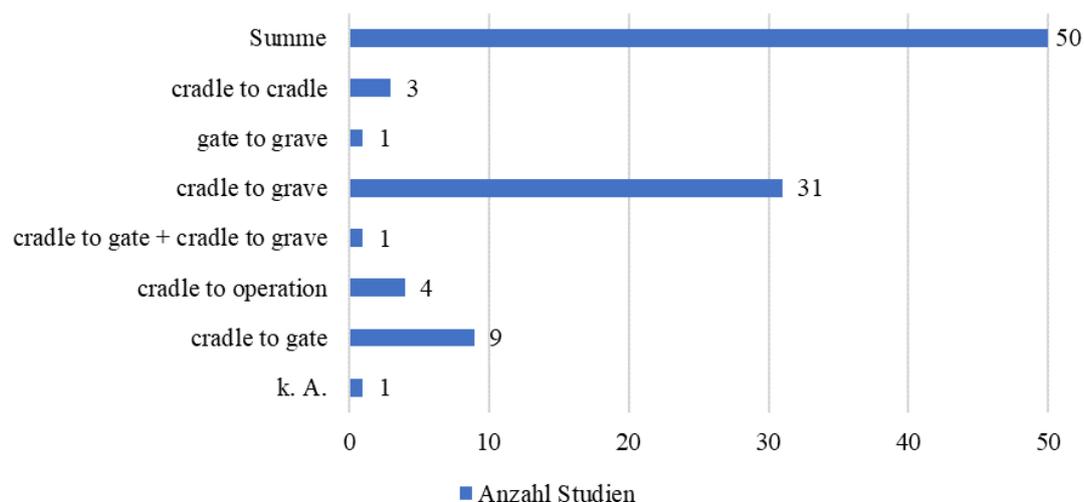
Tabelle 3. Branchen der untersuchten Produktsysteme

Nr.	Branche	Anzahl Studien
1	Energiespeicherung	16
2	Transport	12
3	Bauwesen/Baustoffe	7
4	Verpackungssysteme	2
5	IT Ausstattung	2
6	Textil	1
7	Nahrungsmittel-/Getränkebranche	6
8	Licht	1
9	Stromversorgung	1
10	Finanzen	2

Ferner zu den verschiedenen Branchen sieht man in der Tabelle 3 die Anzahl der Studien, die in die jeweilige Branche eingeordnet werden. Mit 16 Studien untersuchen die meisten Studien Produktsysteme zur Energiespeicherung. Danach folgt der Transportsektor mit 12 Studien, das Bauwesen bzw. die Baustoffe mit 7 Studien und die Nahrungsmittel- und Getränkebranche mit 6 Studien. Die Verpackungsbranche, die IT Ausstattung und der Finanzsektor sind mit jeweils 2 Studien vertreten. Mit jeweils einer Studie sind die Branchen Stromversorgung, Licht und Textil am schwächsten vertreten. Bezüglich der Verteilung gemäß der Branche ist anzumerken, dass sie durch die eher willkürliche Auswahl der Studien in der Literaturrecherche ebenfalls zufällig ist.

Die 50 identifizierten Studien können zusätzlich zur Branche ebenfalls bezüglich den gesetzten Systemgrenzen eingeteilt werden. In folgender Abbildung 4 ist die Verteilung der Ökobilanzstudien nach den definierten Systemgrenzen veranschaulicht.

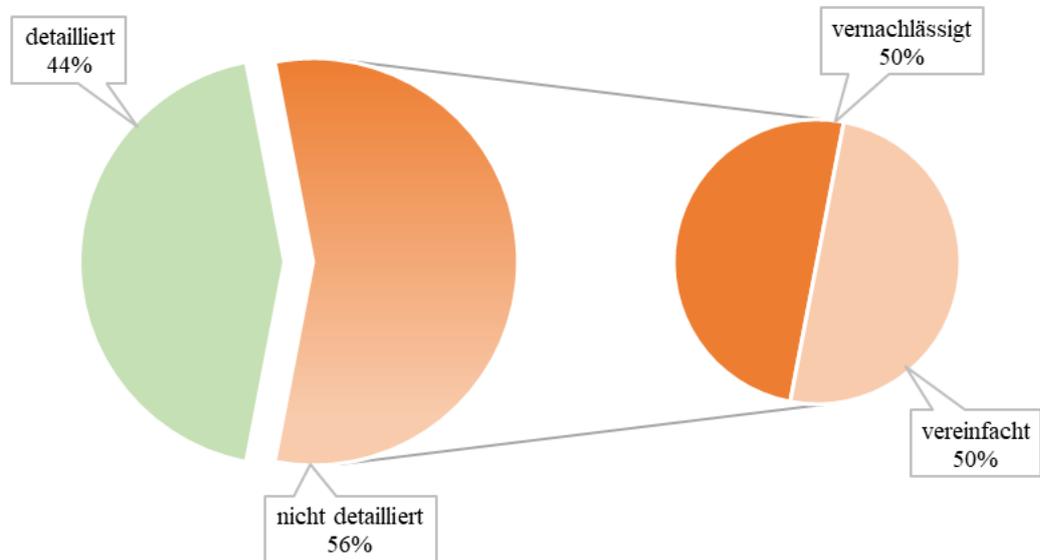
Abbildung 4. Verteilung der untersuchten Studien bezüglich ihren Systemgrenzen



Insgesamt werden sieben verschiedene Systemgrenzen ermittelt. 14 Studien, in welchen die EoL Phase vollständig vernachlässigt wird, spiegeln sich in den Werten für die Systemgrenzen cradle-to-operation und cradle-to-gate wider. Zudem liefert eine der Studien keine Information zur gesetzten Systemgrenze. Diese ist ebenfalls Teil der 14 Studien mit vernachlässigter EoL Betrachtung. Darüber hinaus wird jeweils eine Studie identifiziert, in welcher das Produktsystem mittels zwei verschiedener Systemgrenzen untersucht wird und in welcher eine gate to grave Systemgrenze gewählt wird. Die cradle-to-grave Systemgrenze wird mit einer Anzahl von 31 bei 62 % der Studien gesetzt. Die Tiefe der Detaillierung in der EoL Betrachtung wird durch diese Zahl nicht deutlich. Drei Studien weisen eine cradle-to-cradle Systemgrenze auf, durch welche eine detaillierte EoL Betrachtung in diesen Studien angenommen werden kann.

Des Weiteren können die Ökobilanzstudien gemäß den Kategorien vernachlässigte, vereinfachte und detaillierte Betrachtung der EoL Phase eingeordnet werden. Wie die Anteile der Einordnung verteilt sind, ist in Abbildung 5 zu sehen.

Abbildung 5. Verteilung der Studien gemäß der EoL Betrachtung



Mit einem Anteil von 44 % erfolgt bei 22 der insgesamt 50 gesichteten Studien eine detaillierte Betrachtung des Produktlebensendes. Bei den restlichen 28 Studien und einem Anteil von 56 % wird jedoch keine detaillierte Betrachtung des Produktlebensendes durchgeführt. In Studien ohne detaillierter EoL Betrachtung wird das Produktlebensende entweder vollständig vernachlässigt oder vereinfacht betrachtet. Dies erfolgt bei jeweils 14 Studien und spiegelt sich in Anteilen von jeweils 50 % der Studien ohne detaillierte EoL Betrachtung wider.

Die detaillierte Betrachtung des Produktlebensendes wird in den meisten Fällen in der gewünschten Ganzheitlichkeit der Studien begründet. Andere Studien wiederum definieren eine detaillierte Betrachtung in der Motivation der Studie. Diese Studien fokussieren sich auf das Produktlebensende und werden in erster Linie durchgeführt, um den Einfluss des Produktlebensendes auf die Gesamtbilanz zu untersuchen. In folgender Tabelle 4 sind die Ökobilanzstudien mit einer detaillierten Betrachtung des Produktlebensendes aufgelistet. Zusätzlich ist die jeweilige Begründung für eine detaillierte Betrachtung dargestellt.

Tabelle 4. Identifizierte Ökobilanzstudien mit einer detaillierten EoL Betrachtung

Nr.	Autor:in	Jahr	Titel	EoL Betrachtung	Begründung
1	Dieterle, Ginter	2022	Life cycle (gap) analysis for advanced material recycling of PLA cups	detailliert	Einfluss d. EoLs aufzeigen
2	da Silva Lima et al.	2021	Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems	detailliert	Ganzheitlichkeit
3	Weber et al.	2018	Life cycle assessment of a Vanadium Redox Flow Battery	detailliert	Ganzheitlichkeit
4	Morales-Mora et al.	2021	Life cycle assessment of a novel bipolar electrodiagnosis-based flow battery concept and its potential use to mitigate the intermittency of renewable energy generation	detailliert	Ganzheitlichkeit
5	Siret et al.	2018	PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications	detailliert	Ganzheitlichkeit
6	Dell Technologies, thinkstep AG	2019	Life Cycle Assessment of Dell Latitude 7300 25th Anniversary Edition	detailliert	Ganzheitlichkeit
7	Kauertz et al.	2018	Ökobilanzieller Vergleich von Getränkeverbundkartons mit PET-Einweg- und Glas-Mehrwegflaschen in den Getränkesegmenten Saft/Nektar, H-Milch und Frischmilch	detailliert	Ganzheitlichkeit
8	Markwardt et al.	2017	Comparative Life Cycle Assessment of Tetra Pak® carton packages and alternative packaging systems for liquid food on the Nordic market	detailliert	Ganzheitlichkeit
9	k. A.	2018	Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) for still and sparkling wine	detailliert	Ganzheitlichkeit
10	k. A.	2018	Product Environmental Footprint Category Rule - IT equipment	detailliert	Ganzheitlichkeit
11	Fieschi, Pretato	2018	Role of compostable tableware in food service and waste management. A life cycle assessment study	detailliert	Ganzheitlichkeit
12	Del Pero, De-logu, Pierini	2018	Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car	detailliert	Ganzheitlichkeit
13	Evangelisti et al.	2017	Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles	detailliert	Ganzheitlichkeit
14	Liu et al.	2022	Impact of recycling effect in comparative life cycle assessment for materials selection - A case study of light-weighting vehicles	detailliert	Einfluss d. EoLs aufzeigen
15	Wu, Su	2021	LCA of an industrial luminaire using product environmental footprint method	detailliert	Ganzheitlichkeit
16	Bushi, Skszek, Re-aburn	2019	New ultralight automotive door life cycle assessment	detailliert	Ganzheitlichkeit
17	Piotrowska et al.	2019	Assessment of the Environmental Impact of a Car Tire throughout Its Lifecycle Using the LCA Method	detailliert	Ganzheitlichkeit
18	L'Abbate, Dassisti, Olabi	2018	Small-Size Vanadium Redox Flow Batteries: An Environmental Sustainability Analysis via LCA	detailliert	Ganzheitlichkeit
19	Jones, Gilbert, Stamford	2020	Assessing the Climate Change Mitigation Potential of Stationary Energy Storage for Electricity Grid Services	detailliert	Einfluss d. EoLs aufzeigen

20	Rossi et al.	2020	Life Cycle Assessment of Classic and Innovative Batteries for Solar Home Systems in Europe	detailliert	Ganzheitlichkeit
21	Gouveia et al.	2020	Life cycle assessment of a renewable energy generation system with a vanadium redox flow battery in a NZEB household	detailliert	Ganzheitlichkeit
22	Sözer, Sözen	2020	Waste capacity and its environmental impact of a residential district during its life cycle	detailliert	Ganzheitlichkeit

Mit 19 von insgesamt 22 Studien, wird die detaillierte Betrachtung des EoLs bei 86 % mit der gewünschten Ganzheitlichkeit der Studien begründet. Del Pero, De-  
logu und Pierini (2018) betonen beispielsweise die Wichtigkeit, alle Lebenszyklus-  
phasen in eine Studie einzubeziehen, da die alleinige Betrachtung der Herstellung  
zu irrtümlichen Ergebnissen führt. Mit 14 % wird bei drei Studien eine detaillierte  
EoL Betrachtung gewählt, da es in der Motivation der Studie liegt, aufzuzeigen,  
dass das Produktlebensende einen Einfluss auf das Ergebnis der Gesamtbilanz hat.  
Zu diesen Studien gehören Dieterle und Ginter (2022), Liu et al. (2022), und Jones,  
Gilbert und Stamford (2020). Sie sind in der Tabelle grün hervorgehoben.

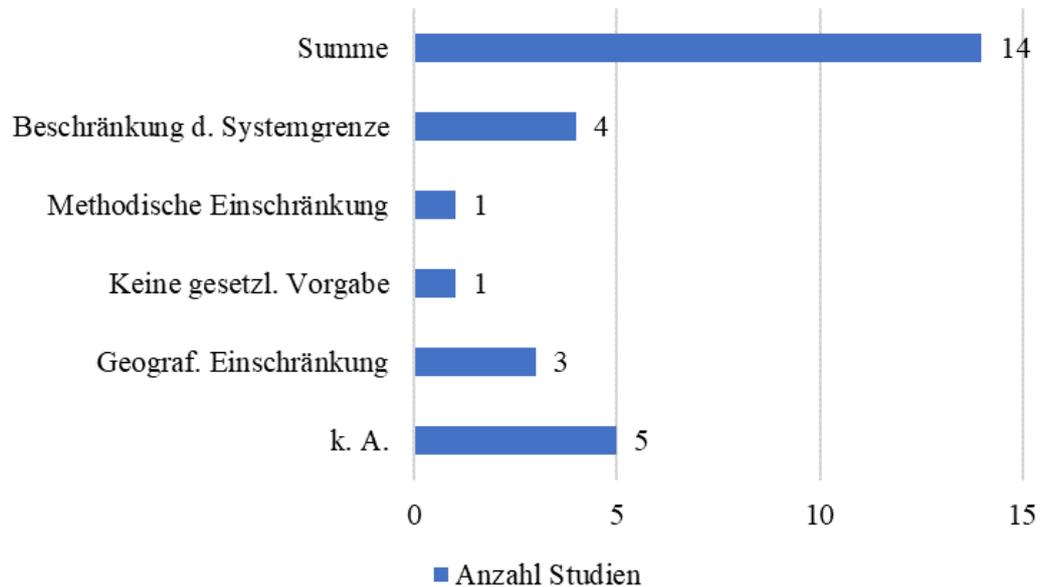
Es gibt verschiedene Gründe, weshalb das Produktlebensende in Ökobilanzen ver-  
einfacht behandelt wird. In folgender Tabelle 5 sind die Studien mit einer verein-  
fachten Betrachtung sowie die jeweilige Begründung aufgelistet.

Tabelle 5. Identifizierte Ökobilanzstudien mit einer vereinfachten EoL Betrachtung

Nr.	Autor:in	Jahr	Titel	EoL Betrachtung	Begründung
1	Bekel, Pauliuk	2019	Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany	vereinfacht	Beschränkung d. Systemgrenze
2	Evrard et al.	2021	Carbon footprint report - Volvo C40 Recharge	vereinfacht	Beschränkung d. Systemgrenze
3	Lombardi et al.	2017	Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA	vereinfacht	Beschränkung d. Systemgrenze
4	Abdulka-reem et al.	2021	Life cycle assessment of a low-height noise barrier for railway traffic noise	vereinfacht	k. A.
5	Yudhistira, Khati-wada, Sanchez	2022	A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage	vereinfacht	Methodische Einschränkung
6	Arzoumanidis, Raggi, Petti	2019	Life Cycle Assessment of Honey: Considering the Pollination Service	vereinfacht	k. A.
7	Weber et al.	2022	Environmental Impact Evaluation of a European High Speed Railway Network along the 'European Silk Road'	vereinfacht	k. A.
8	Hanegraaf et al.	2018	Life cycle assessment of cash payments	vereinfacht	Beschränkung d. Systemgrenze
9	Sierra et al.	2020	Life cycle analysis of a building integrated photovoltaic system operating in Bogotá, Colombia	vereinfacht	k. A.
10	Lindgreen et al.	2017	Evaluating the environmental impact of debit card payments	vereinfacht	Keine gesetzl. Vorgabe
11	Egeskog et al.	2020	Carbon footprint report - Battery electric XC40 Recharge and the XC40 ICE	vereinfacht	Geograf. Einschränkung
12	Agyekum, Fortuin, van der Harst	2017	Environmental and social life cycle assessment of bamboo bicycle frames made in Ghana	vereinfacht	k. A.
13	Evangelista et al.	2018	Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA)	vereinfacht	Geograf. Einschränkung
14	Morales et al.	2019	Regionalized inventory data in LCA of public housing: A comparison between two conventional typologies in southern Brazil	vereinfacht	Geograf. Einschränkung

Zusätzlich ist in Abbildung 6 die Aufteilung der Studien gemäß der jeweiligen Begründung zu sehen.

Abbildung 6. Aufteilung der Studien mit einer vereinfachten EoL Betrachtung gemäß den Begründungen



Mit fünf Studien wird bei dem größten Anteil nicht angegeben, weshalb eine vereinfachte Betrachtung des Produktlebensendes gewählt wird. Sie sind in der Tabelle 5 weiß hervorgehoben. Eine weitere Begründung zur Wahl einer vereinfachten Betrachtung ist die Einschränkung durch die Systemgrenze. Diese ist in vier Studien wiederzufinden, welche in der Tabelle 5 grau markiert sind. In einer dieser Studien wird unter anderen angenommen, dass Teile des Produktes am Lebensende recycelt werden. Da das Recycling aber nicht mehr innerhalb der Systemgrenze liegt, wird es nicht weiter betrachtet (vgl. Evrard et al., 2021). In einer weiteren dieser Studien wird das Recycling von Münzgeld nicht betrachtet, da das recycelte Material anschließend nicht wieder in die Produktion von Münzgeld, sondern in der Produktion anderer Produkte eingesetzt wird (vgl. Hanegraaf et al., 2018, S. 14). Bei den übrigen zwei Studien wird das Produkt demontiert und es werden lediglich die Entsorgungswege einzelner Teile des Produktes betrachtet (vgl. Bekel und Pauliuk, 2019; Lombardi et al., 2017). In drei Studien wird das EoL aufgrund geografischer Einschränkungen vereinfacht betrachtet. Sie sind in der Tabelle 5 grün hervorgehoben. So werden in der Studie von Egeskog et al. (2020, S. 16) beispielsweise keine Gutachten für die Energiegewinnung aus den Entsorgungsverfahren einbezogen. Da

die Studie einer globalen Betrachtung unterliegt und in vielen Ländern keine Systeme zur Energierückgewinnung vorhanden sind, erfolgt eine vereinfachte Annahme. Bei Evangelista et al. (2018, S. 751) und Morales et al. (2019, S. 4) wird im EoL eine Deponierung angenommen, da der geografische Bezug der Studien Brasilien ist und dies dort dem üblichen Entsorgungsweg von Bau- und Abrissabfällen entspricht. Jeweils eine Studie folgt einer vereinfachten Betrachtung des EoLs, da sie durch die methodische Vorgehensweise bei der Durchführung der Studie eingeschränkt wird und es keine gesetzliche Vorgabe für eine detaillierte Betrachtung gibt (Lindgreen et al., 2017, S. 8). Diese Studien sind in gelber Markierung in der Tabelle 5 zu finden. Die Studie von Yudhistira, Khatiwada und Sanchez (2022) ist methodisch eingeschränkt, da sie auf Primärdaten verzichtet und stattdessen auf Daten der PEFCR (product environmental category rules) zurückgreift. Demnach kann das Produktlebensende nur vereinfacht betrachtet werden.

Aus den untersuchten Studien mit vernachlässigter EoL Betrachtung lassen sich drei übergeordnete Gründe und Handlungsmuster ableiten, weshalb die Betrachtung des Produktlebensendes nicht Teil des Untersuchungsrahmens der Studien ist. Diese werden im folgenden Kapitel 5.2 genauer untersucht.

## **5.2 Mögliche Gründe für eine vernachlässigte EoL Betrachtung**

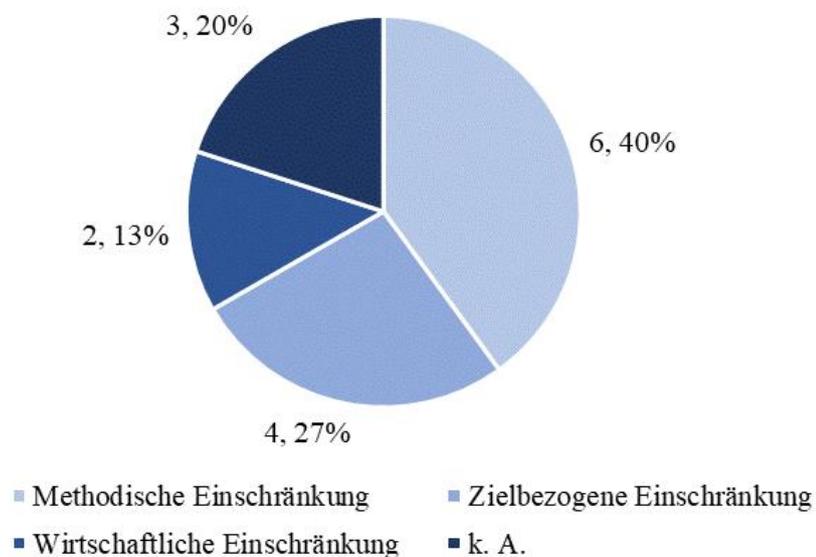
Drei übergeordnete Gründe und Handlungsmuster, weshalb das Produktlebensende in 14 der insgesamt 50 identifizierten Studien vollständig vernachlässigt wird, können festgestellt werden. Dazu gehören die methodischen, zielbezogenen und wirtschaftlichen Einschränkungen. Darüber hinaus ist bei drei Studien keine Begründung für die vernachlässigte Betrachtung des EoLs aufzufinden oder es wird keine Information darüber geliefert, wie die Studie durchgeführt wird. Dementsprechend sind auch keine weiteren Informationen zur Betrachtung des EoLs vorhanden. Diese drei Studien sind in folgender Tabelle 6 aufgelistet.

Tabelle 6. Studien ohne Informationen über die vernachlässigte EoL Betrachtung

Nr.	Autor:in	Jahr	Titel	EoL Betrachtung
1	Zhang et al.	2022	Life cycle assessment of an all-organic battery: Hotspots and opportunities for improvement	vernachlässigt
2	Fernandez-Merchante et al.	2020	Environmental and Preliminary Cost Assessments of Redox Flow Batteries for Renewable Energy Storage	vernachlässigt
3	Rasul, Arutla	2020	Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment	vernachlässigt

Des Weiteren ist in folgender Abbildung 7 eine Übersicht über die Verteilung der Studien gemäß den Gründen für die vernachlässigte Betrachtung des Produktlebensendes dargestellt.

Abbildung 7. Verteilung der Ökobilanzen gemäß ihren Einschränkungen in Bezug auf die EoL Betrachtung



Mit sechs Studien und 40 % bilden die Studien mit einer methodischen Begründung den größten Anteil. Es folgen mit vier Studien und einem Anteil von 27 % jene, die aufgrund ihrer Zielsetzung eingeschränkt sind. Die drei Studien, welche keine Informationen über die vernachlässigte EoL Betrachtung liefern, haben einen Anteil von 21 % an der Gesamtanzahl der Studien, die das Produktlebensende nicht betrachten. Das Schlusslicht bilden zwei Studien mit einem Anteil von 13 %, welche das Produktlebensende aufgrund von wirtschaftlichen Gründen vernachlässigen.

Auf die methodischen, zielbezogenen und wirtschaftlichen Gründe wird im Folgenden genauer eingegangen.

### 5.2.1 Methodische Gründe

Durch Einschränkungen in der methodischen Vorgehensweise werden die Studien in ihrem Aufwand begrenzt. Die folgende Tabelle 7 zeigt die Ökobilanzstudien, in welchen das Produktlebensende aufgrund von methodischen Gründen vernachlässigt wird.

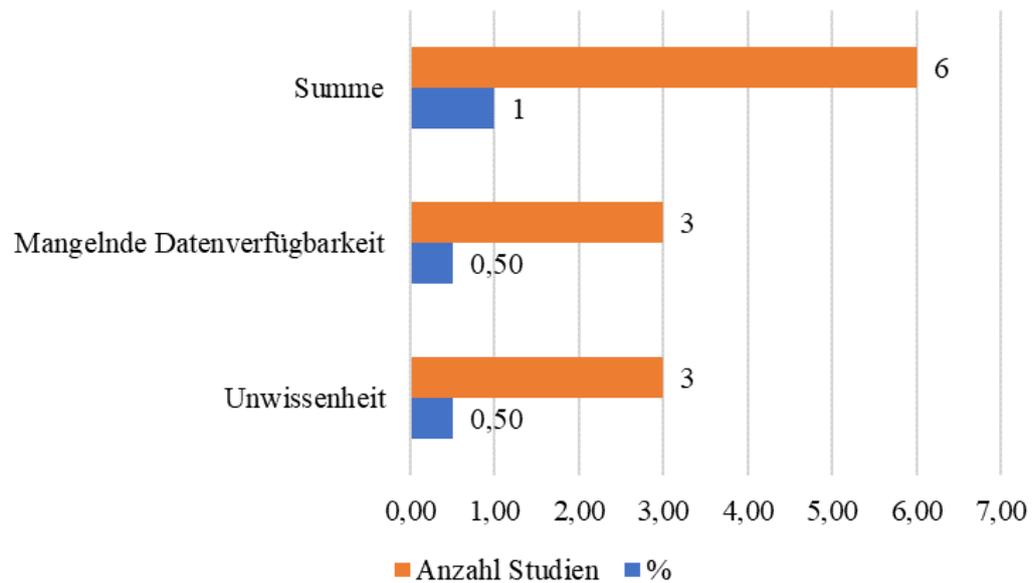
Tabelle 7. Studien mit vernachlässigter EoL Betrachtung aufgrund methodischer Gründe

Nr.	Autor:in	Jahr	Titel	EoL Betrachtung	Begründung
1	Baumann et al.	2017	CO2 Footprint and Life-Cycle Costs of Electrochemical Energy Storage for Stationary Grid Applications	vernachlässigt	Methodisch
2	Koch, Toedter, Weber	2020	Ökobilanz von Pkws mit verschiedenen Antriebssystemen	vernachlässigt	Methodisch
3	Herausgeber: IBU	2019	Umwelt-Produktdeklaration - Betonpflastersteine GONDELMANN GmbH & Co. KG	vernachlässigt	Methodisch
4	Miller, Gencer, O'Sullivan	2018	A General Model for Estimating Emissions from Integrated Power Generation and Energy Storage. Case Study: Integration of Solar Photovoltaic Power and Wind Power with Batteries	vernachlässigt	Methodisch
5	Lenzo et al.	2018	Sustainability Performance of an Italian Textile Product	vernachlässigt	Methodisch
6	Li, Froese, Cavka	2018	Life cycle assessment of magnesium oxide structural insulated panels for a smart home in Vancouver	vernachlässigt	Methodisch

Insgesamt wird das EoL in sechs der identifizierten Studien basierend auf methodischen Gründen vollständig vernachlässigt. Die methodische Begründung kommt durch zwei verschiedenen Arten zum Vorschein. Zum einen wird das Produktlebensende aufgrund von Unwissenheit vernachlässigt. Darunter zählt, dass die Verfasser der Studie nicht ausreichend über die Möglichkeiten der EoL Betrachtung informiert sind, das Produktlebensende als irrelevant angesehen wird oder EoL Methoden für (vor allem) neue Produkte noch unbekannt oder nicht etabliert sind. Zum anderen wird die Betrachtung des Produktlebensendes oftmals durch eine mangelnde Datenverfügbarkeit vernachlässigt. Die nachfolgende Abbildung 8 zeigt auf,

wie die sechs Studien jeweils der Unwissenheit und der mangelnden Datenverfügbarkeit zugewiesen werden können.

Abbildung 8. Genauere Betrachtung der methodischen Gründe



Von insgesamt sechs Studien wird das Produktlebensende bei der Hälfte der Studien wegen mangelnder Datenverfügbarkeit nicht betrachtet. In den Studien heißt es dann:

- „Aufgrund des Mangels an zuverlässigen Daten, wird die Abfallbehandlung, die Entsorgung, und das Recycling von Batterien in dieser Studie nicht behandelt“ (vgl. Baumann et al., 2017, S. 1073),
- „In Ermangelung von Daten berücksichtigt unser Modell keine Emissionen aus Fotovoltaik EoL Prozessen [...]“ (vgl. Miller, Gencer und O’Sullivan, 2018, S. 11), und
- aufgrund des Mangels an Sekundärdaten wurde in der Studie die Annahme getroffen, dass alle Prozesse im Zusammenhang mit dem Materialrecycling nicht miteinbezogen werden, sondern lediglich der Transport zur Recycling Fabrik (vgl. Lenzo et al., 2018, S. 4).

Drei Studien vernachlässigen das EoL basierend auf der Unwissenheit. In Koch, Toedter und Weber (2018, S. 9) wird das Produktlebensende aufgrund von widersprüchlicher Literatur nicht betrachtet. So heißt es: „Es wird kein Batterierecycling

betrachtet, da es in Studien sowohl Ergebnisse mit einer positiven Auswirkung eines Recyclings als auch Studien mit negativen Auswirkungen, das heißt erhöhter CO<sub>2</sub>-Emission gibt.“ Des Weiteren sei das Batterierecycling Gegenstand der Forschung und im Aspekt der Ökobilanzierung Teil des wissenschaftlichen Disputs und müsse in einer überarbeiteten Version der Studie berücksichtigt werden (Koch, Toedter und Weber, 2018, S. 9). In der Umwelt-Produktdeklaration der Betonpflastersteine der Gondelmann GmbH & Co. KG wird das EoL als nicht relevantes Modul eingestuft und demnach nicht weiter behandelt (Institut Bauen und Umwelt e.V., 2019, S. 5). Li, Froese und Cavka (2018, S. 79) betrachten das EoL nicht, da die Recyclingraten des MgO SIPs (structural insulated panels) als neues Produkt nicht bekannt sind.

### 5.2.2 Zielbezogene Gründe

Die Betrachtung des vollständigen Lebenszyklus in Ökobilanzstudien ist in manchen Fällen nicht erstrebenswert, beispielsweise wenn der Grund für die Durchführung einer Studie die detaillierte Betrachtung einer bestimmten Lebenszyklusphase ist. In diesen Fällen wird hier von zielbezogenen Gründen für die Vernachlässigung des Produktlebensendes gesprochen. In Tabelle 8 sind die Studien zu sehen, welche das EoL aufgrund ihrer Zielsetzung vernachlässigen.

Tabelle 8. Studien mit vernachlässigter EoL Betrachtung aufgrund zielbezogener Gründe

Nr.	Autor:in	Jahr	Titel	EoL Betrachtung	Begründung
1	Dias-Ramirez et al.	2020	Battery Manufacturing Resource Assessment to Minimise Component Production Environmental Impacts	vernachlässigt	Zielbezogen
2	He et al.	2020	Flow battery production: Materials selection and environmental impact	vernachlässigt	Zielbezogen
3	Gouveia et al.	2020	Life cycle assessment of a vanadium flow battery, A joint organization of University of Aveiro (UA), School of Engineering of the Polytechnic of Porto (ISEP) and SCIENCE and Engineering Institute (SCIEI)	vernachlässigt	Zielbezogen
4	Trapp et al.	2017	Life Cycle Assessment for Frozen Food Distribution Schemes	vernachlässigt	Zielbezogen

Insgesamt können vier Studien identifiziert werden, die die Betrachtung des Produktlebensendes aufgrund ihrer Zielsetzung ausschließen. Werden die Systemgrenze der Studien betrachtet, ist erkennbar, dass alle vier Studien eine cradle-to-gate, also eine von der Wiege bis zum Werkstor, Systemgrenze haben. Während Dias-Ramirez et al. (2020), He et al. (2020), und Gouveia et al. (2020) ihren Fokus in der Studie auf die Herstellungsphase legen, fokussiert sich Trapp et al. (2017) auf den Transport, weshalb in allen vier Studien das Lebensende des Produktes vernachlässigt wird. Die Zielsetzung in den Studien wird entsprechend wie folgt formuliert:

- „Das Hauptziel dieser Analyse bestand darin, die Umweltverträglichkeit der beiden Batterien, Lithium-Mangan-Oxid (LMO) und VRFB, unter Berücksichtigung der Recyclingmöglichkeiten während der **Herstellungsphase** und unter Berücksichtigung der **Cradle-to-Gate-Perspektive** zu bewerten“ (vgl. Dias-Ramirez et al., 2020, S. 4),
- „Ziel dieser Studie ist es, die mit der **Produktion** von Flow-Batterien verbundenen Umweltauswirkungen zu verstehen“ (vgl. He et al., 2020, S. 2), und
- „Zur Analyse der Umweltauswirkungen der betrachteten **Transportszenarien** für Tiefkühlkost wurde die Technik der Ökobilanzierung eingesetzt“ (vgl. Trapp et al., 2017, S. 270).
- „Ziel der Studie ist es, die potenziellen Umweltauswirkungen zu ermitteln, die bei der **Produktion** des Batterieprototyps auftreten [...]“ (vgl. Gouveia et al., 2020, S. 97).

Hierbei wird deutlich, dass sich jeweils in der Zielsetzung der Studie herauslesen lässt, welcher Fokus in den Studien gelegt wird.

### 5.2.3 Wirtschaftliche Gründe

Wird das Produktlebensende in einer Ökobilanzstudie aufgrund von produkt- oder branchenspezifischen Gründen oder aufgrund der Adressierung einer bestimmten Zielgruppe vernachlässigt, so spricht man hier von wirtschaftlichen Gründen. Aus den 14 identifizierten Studien mit einer vernachlässigten EoL Betrachtung sind zwei Studien zu nennen, welche aufgrund einer wirtschaftlichen Begründung das

Produktlebensende außer Acht lassen. In einer der Studien werden die Umweltwirkung von der Jasmin Reis Produktion in Thailand ermittelt. Die Landwirte und Unternehmen, welche Jasmin Reis herstellen sind hierbei die Adressaten. Da die EoL Phase des Produktes nicht relevant für die Zielgruppe erscheint, wird sie nicht in die Studie miteinbezogen (vgl. Jirapornvaree, Suppadit und Kumar, 2021). Die zweite Studie lässt sich aus Tabelle 7 der methodisch begründeten Ökobilanzen wiederfinden. In Lenzo et al. (2018, S. 3) wird die Betrachtung des Produktlebensendes nicht nur methodisch, sondern ebenfalls wirtschaftlich durch die Adressierung einer bestimmten Zielgruppe begründet. Die angesprochene Zielgruppe der Studie sind Geschäftsführer der Hersteller in Italien, weshalb das EoL für die Verfassernden der Studie nicht relevant erscheint.

Eine weitere Möglichkeit, durch welche die EoL Betrachtung wirtschaftlich begründet vernachlässigt werden könnte, sind produkt- oder branchenspezifische Gründe. In dieser Analyse wurde jedoch kein klares Muster im Zusammenhang der Produkte und Branchen mit einer Vernachlässigung des Produktlebensendes festgestellt. Eine Auffälligkeit ist, dass insgesamt sechs der Studien mit einer vernachlässigten EoL Betrachtung Batteriesysteme untersuchen. Jedoch haben diese sechs Studien einen Anteil von 40 % aller identifizierten Studien, die ein Batteriesystem untersuchen, weshalb nicht klar von einem Muster in dieser Produktbranche gesprochen werden kann.

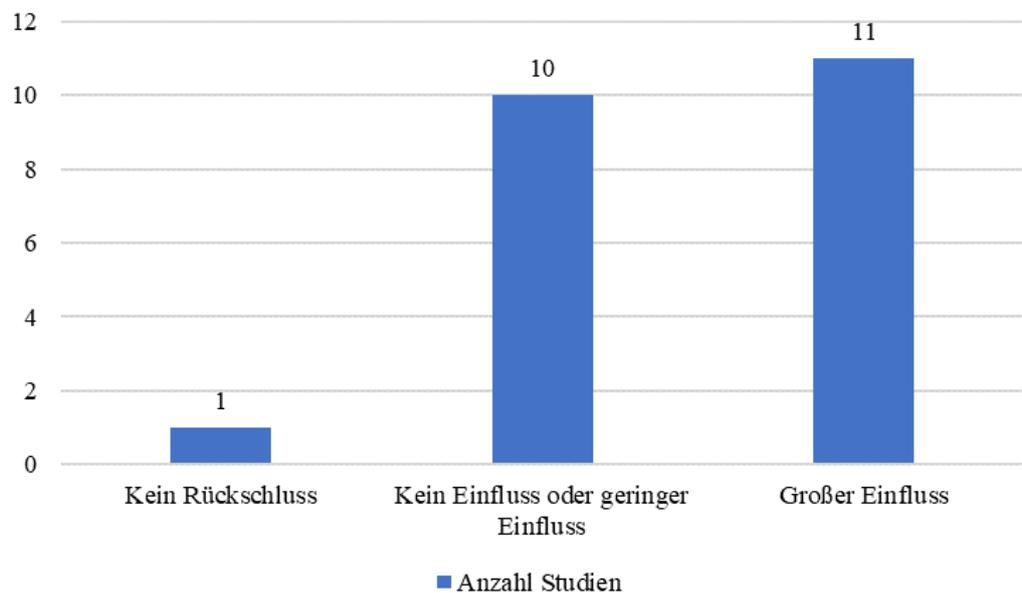
### **5.3 Einflüsse auf die Gesamtbilanz**

Es werden drei Szenarien festgestellt, inwiefern in den Studien Rückschlüsse bezüglich der Relevanz des EoLs für die Gesamtbilanz gezogen werden: entweder es wird kein Rückschluss gezogen, das Produktlebensende hat keinen oder nur wenig Einfluss auf die Gesamtbilanz oder es hat einen großen Einfluss auf die Gesamtbilanz. Diese Szenarien sind in allen drei Gruppierungen der Studien (gem. vernachlässigter, vereinfachter, oder detaillierter EoL Betrachtung) vertreten.

### 5.3.1 Einfluss des EoLs in Studien mit detaillierter EoL Betrachtung

Abbildung 9 zeigt die Verteilung der Ökobilanzstudien mit einer detaillierten EoL Betrachtung gemäß dem gezogenen Rückschluss vom Produktlebensende auf das Ergebnis der Gesamtbilanz.

Abbildung 9. Rückschlüsse aus der EoL Betrachtung auf die Gesamtbilanz bei Studien mit einer detaillierten EoL Betrachtung



Eine Studie zieht keinen Rückschluss von der EoL Betrachtung auf das Ergebnis der Gesamtbilanz. Die detaillierte Betrachtung des Produktlebensendes wird unter Umständen lediglich gewählt, um die gewünschte Ganzheitlichkeit der Studie zu erfüllen. Bei Morales-Mora et al. (2021) erfolgt dementsprechend kein Rückschluss auf die Gesamtbilanz und es wird nicht weiter untersucht, inwiefern das EoL das Gesamtergebnis beeinflusst. Wiederum in zehn Studien wird der Rückschluss gezogen, dass das Produktlebensende keinen oder einen geringen Einfluss hat. In Tabelle 9 sind diese Studien zu sehen.

Tabelle 9. Studien mit detaillierter EoL Betrachtung, die keinen oder einen geringen Einfluss des EoLs auf die Gesamtbilanz wahrnehmen

Nr.	Autor:in	Jahr	Titel
1	L'Abbate, Dassisti, Olabi	2018	Small-Size Vanadium Redox Flow Batteries: An Environmental Sustainability Analysis via LCA
2	Gouveia et al.	2020	Life cycle assessment of a renewable energy generation system with a vanadium redox flow battery in a NZEB household
3	Dell Technologies, thinkstep AG	2019	Life Cycle Assessment of Dell Latitude 7300 25th Anniversary Edition
4	Markwardt et al.	2017	Comparative Life Cycle Assessment of Tetra Pak® carton packages and alternative packaging systems for liquid food on the Nordic market
5	Del Pero, Delogu, Pierini	2018	Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car
6	Evangelisti et al.	2017	Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles
7	Wu, Su	2021	LCA of an industrial luminaire using product environmental footprint method
8	Bushi, Skszek, Reaburn	2019	New ultralight automotive door life cycle assessment
9	Piotrowska et al.	2019	Assessment of the Environmental Impact of a Car Tire throughout Its Lifecycle Using the LCA Method
10	Sözer, Sözen	2020	Waste capacity and its environmental impact of a residential district during its life cycle

Schließlich sind elf Studien mit einer detaillierten EoL Betrachtung vorhanden, die einen relevanten Einfluss des Produktlebensendes auf die Gesamtbilanz feststellen. Folgende Studien sind in Tabelle 10 zu sehen.

Tabelle 10. Studien mit detaillierter EoL Betrachtung, die einen relevanten Einfluss des EoLs auf die Gesamtbilanz wahrnehmen

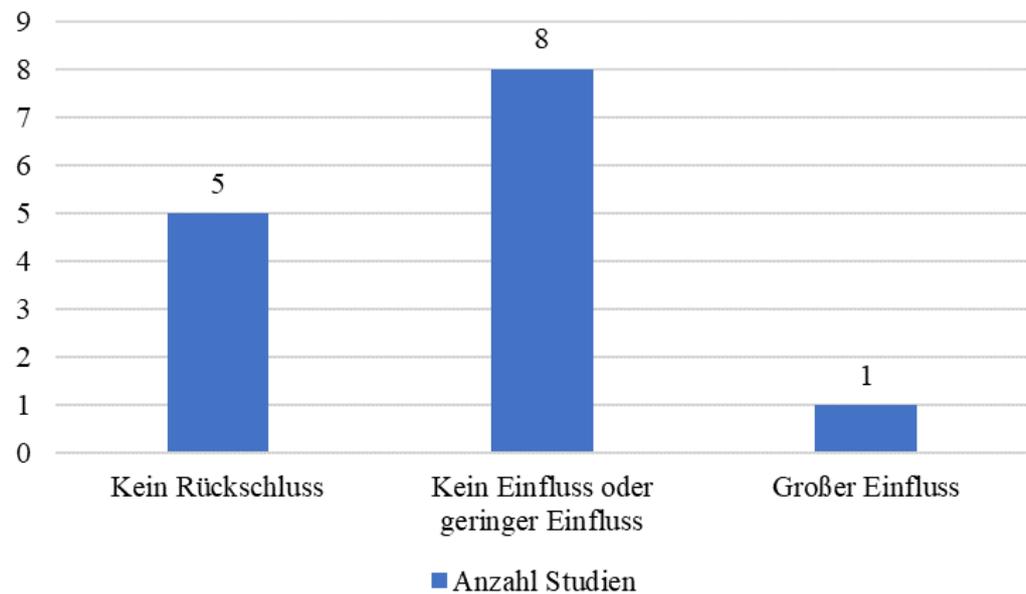
Nr.	Autor:in	Jahr	Titel
1	da Silva Lima et al.	2021	Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems
2	Weber et al.	2018	Life cycle assessment of a Vanadium Redox Flow Battery
3	Siret et al.	2018	PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications
4	Jones, Gilbert, Stamford	2020	Assessing the Climate Change Mitigation Potential of Stationary Energy Storage for Electricity Grid Services
5	Rossi et al.	2020	Life Cycle Assessment of Classic and Innovative Batteries for Solar Home Systems in Europe
6	Dieterle, Ginter	2022	Life cycle (gap) analysis for advanced material recycling of PLA cups
7	Kauertz et al.	2018	Ökobilanzieller Vergleich von Getränkeverbundkartons mit PET-Einweg- und Glas-Mehrwegflaschen in den Getränkesegmenten Saft/Nektar, H-Milch und Frischmilch
8	k. A.	2018	Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) for still and sparkling wine
9	k. A.	2018	Product Environmental Footprint Category Rule - IT equipment
10	Fieschi, Pretato	2018	Role of compostable tableware in food service and waste management. A life cycle assessment study
11	Liu et al.	2022	Impact of recycling effect in comparative life cycle assessment for materials selection - A case study of light-weighting vehicles

Diese Studien lassen sich wiederum in jene unterscheiden, welche ohnehin schon von einem relevanten Einfluss des Produktlebensendes auf die Gesamtbilanz ausgegangen sind (in Tabelle 10 grün markiert), und in solche, welche die Relevanz durch die Studie feststellen.

### 5.3.2 Einfluss des EoLs in Studien mit vereinfachter EoL Betrachtung

Zusätzlich zu den Studien mit einer detaillierten EoL Betrachtung ist in Abbildung 10 die Verteilung der Studien mit einer vereinfachten EoL Betrachtung gemäß den getroffenen Rückschlüssen auf die Gesamtbilanz dargestellt.

Abbildung 10. Rückschlüsse aus der EoL Betrachtung auf die Gesamtbilanz bei Studien mit einer vereinfachten EoL Betrachtung



Mit Lindgreen et al. (2017) identifiziert eine Studie das Produktlebensende als relevant für das Ergebnis der Gesamtbilanz, obwohl eine vereinfachte EoL Betrachtung gewählt wurde. Acht Studien schließen darauf, dass das Produktlebensende keinen Einfluss oder nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis der Gesamtbilanz hat. Diese sind in Tabelle 11 zu sehen.

Tabelle 11. Studien mit vereinfachter EoL Betrachtung, die keinen oder einen geringen Einfluss des EoLs auf die Gesamtbilanz wahrnehmen

Nr.	Autor:in	Jahr	Titel
1	Yudhistira, Khatiwada, Sanchez	2022	A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage
2	Evrard et al.	2021	Carbon footprint report - Volvo C40 Recharge
3	Lombardi et al.	2017	Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA
4	Hanegraaf et al.	2018	Life cycle assessment of cash payments
5	Egeskog et al.	2020	Carbon footprint report - Battery electric XC40 Recharge and the XC40 ICE
6	Agyekum, Fortuin, van der Harst	2017	Environmental and social life cycle assessment of bamboo bicycle frames made in Ghana
7	Evangelista et al.	2018	Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA)
8	Morales et al.	2019	Regionalized inventory data in LCA of public housing: A comparison between two conventional typologies in southern Brazil

Fünf Studien führen die Relevanz des Produktlebensendes nicht weiter aus und ziehen keinen Rückschluss aus der EoL Betrachtung auf die Gesamtbilanz. Sie werden in Tabelle 12 genannt.

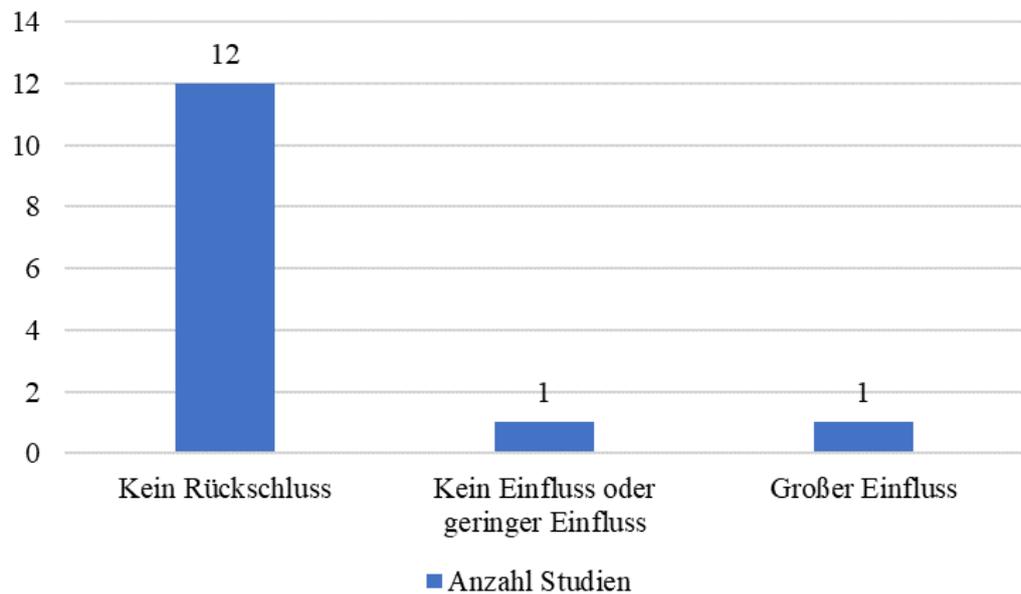
Tabelle 12. Studien mit vereinfachter EoL Betrachtung, ohne einen Rückschluss auf die Gesamtbilanz

Nr.	Autor:in	Jahr	Titel
1	Bekel, Pauliuk	2019	Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany
2	Abdulkareem et al.	2021	Life cycle assessment of a low-height noise barrier for railway traffic noise
3	Arzoumanidis, Raggi, Petti	2019	Life Cycle Assessment of Honey: Considering the Pollination Service
4	Weber et al.	2022	Environmental Impact Evaluation of a European High Speed Railway Network along the 'European Silk Road'
5	Sierra et al.	2020	Life cycle analysis of a building integrated photovoltaic system operating in Bogotá, Colombia

### 5.3.3 Einfluss des EoLs in Studien mit vernachlässigter EoL Betrachtung

Abbildung 11 zeigt die Verteilung der Studien mit einer vernachlässigten EoL Betrachtung gemäß den getroffenen Rückschlüssen auf die Gesamtbilanz.

Abbildung 11. Rückschlüsse aus der EoL Betrachtung auf die Gesamtbilanz bei Studien mit einer vernachlässigten EoL Betrachtung



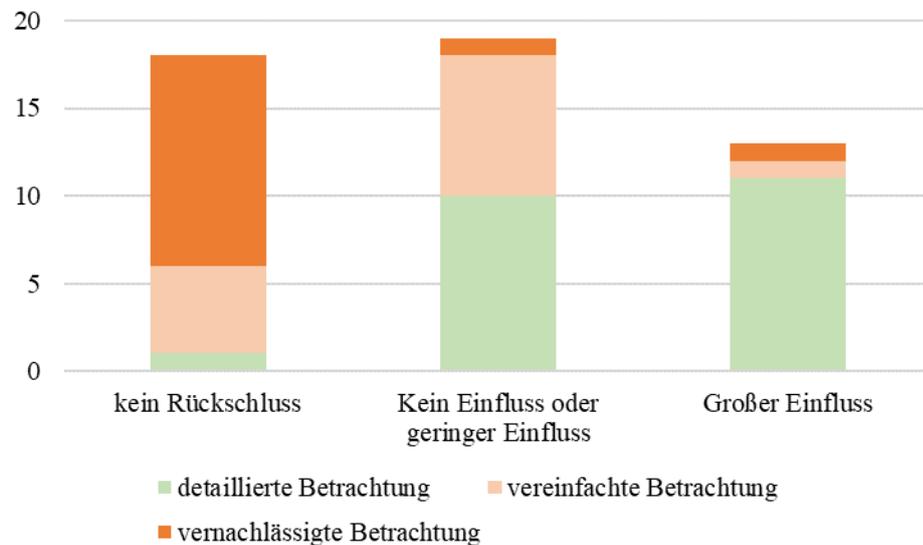
Dias-Ramirez et al. (2020) zieht die Schlussfolgerung, dass das Produktlebensende einen signifikanten Einfluss auf die Gesamtbilanz hat, wenn es in den Untersuchungsrahmen der Studie mit einbezogen wird. Der Fokus in der Studie liegt jedoch auf der Herstellungsphase des Produktes, weshalb sie dennoch als Studie mit vernachlässigter EoL Betrachtung eingestuft wird. Li, Froese und Cavka (2018, S. 84) empfehlen für zukünftig Studien eine detailliertere EoL Betrachtung des Produktes aufgrund eines möglichen positiven Einflusses des Produktlebensendes. Dementsprechend erfolgt die Einstufung als Studie, die auf eine geringe Relevanz des EoLs schließt. 12 Studien, welche in Tabelle 13 zu sehen sind, ziehen keine Rückschlüsse aus der EoL Betrachtung auf die Gesamtbilanz. Das ist vor allem der Tatsache geschuldet, dass die Studien eine Systemgrenze haben, welche die Betrachtung des EoLs ausschließt.

Tabelle 13. Studien mit vernachlässigter EoL Betrachtung, ohne einen Rückschluss auf die Gesamtbilanz

Nr.	Autor:in	Jahr	Titel
1	Zhang et al.	2022	Life cycle assessment of an all-organic battery: Hotspots and opportunities for improvement
2	Fernandez-Merchante et al.	2020	Environmental and Preliminary Cost Assessments of Redox Flow Batteries for Renewable Energy Storage
3	Rasul, Arutla	2020	Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment
4	Jirapornvaree, Supadit, Kumar	2021	Assessing the economic and environmental impact of jasmine rice production: Life cycle assessment and Life Cycle Costs analysis
5	Baumann et al.	2017	CO2 Footprint and Life-Cycle Costs of Electrochemical Energy Storage for Stationary Grid Applications
6	He et al.	2020	Flow battery production: Materials selection and environmental impact
7	Gouveia et al.	2020	Life cycle assessment of a vanadium flow battery, A joint organization of University of Aveiro (UA), School of Engineering of the Polytechnic of Porto (ISEP) and SCience and Engineering Institute (SCIEI)
8	Koch, Toedter, Weber	2020	Ökobilanz von Pkws mit verschiedenen Antriebssystemen
9	Herausgeber: IBU	2019	Umwelt-Produktdeklaration - Betonpflastersteine GONDELMANN GmbH & Co. KG
10	Miller, Gencer, O'Sullivan	2018	A General Model for Estimating Emissions from Integrated Power Generation and Energy Storage. Case Study: Integration of Solar Photovoltaic Power and Wind Power with Batteries
11	Lenzo et al.	2018	Sustainability Performance of an Italian Textile Product
12	Trapp et al.	2017	Life Cycle Assessment for Frozen Food Distribution Schemes

Letztlich ist zu erwähnen, dass ein Zusammenhang zwischen der Detaillierung der EoL Betrachtung in einer Studie und dem jeweiligen Rückschluss auf die Relevanz des Produktlebensendes für die Gesamtbilanz erkennbar ist. Dieser Zusammenhang wird durch die Abbildung 12 verdeutlicht.

Abbildung 12. Zusammenhang zwischen der EoL Betrachtung und dem Rückschluss auf dessen Relevanz für die Gesamtbilanz



Es ist klar zu erkennen, dass Studien, die das Produktlebensende vernachlässigen, mehrheitlich keinen Rückschluss auf dessen Einfluss auf die Gesamtbilanz treffen. Des Weiteren wird deutlich, dass Studien mit einer vereinfachten EoL Betrachtung dem Produktlebensende vermehrt keine oder eine geringe Relevanz für das Ergebnis der Gesamtbilanz zuschreiben. Dass das Produktlebensende einen großen Einfluss auf die Gesamtbilanz hat, wird mehrheitlich durch die Studien mit einer detaillierten EoL Betrachtung verdeutlicht. Aus diesen Beobachtungen lässt sich schließen, dass je detaillierter das Produktlebensende in Ökobilanzstudien betrachtet wird, desto höher dessen Einfluss auf das Ergebnis der Gesamtbilanz ist. Darüber hinaus wird verdeutlicht, dass der Ausschluss des Produktlebensendes zu irrtümlichen Ergebnissen einer Studie führt, wie es bereits Del Pero, Delogu und Pierini (2018) erwähnen, da ein potentieller großer Einflussfaktor nicht miteinbezogen wird.

## 6 Diskussion und kritische Würdigung

Aus der Beobachtung, dass der Einfluss des Produktlebensendes auf das Ergebnis einer Ökobilanzstudie mit zunehmender Tiefe der Betrachtung des EoLs steigt, lässt

sich schließen, dass der Ausschluss oder die vereinfachte Betrachtung des Produktlebensendes zu irrtümlichen Ergebnissen führt. Da dennoch mehr als 50 % der identifizierten Studien in dieser Arbeit das Produktlebensende nicht detailliert betrachten, werden im Folgenden erste Empfehlungen zur Überwindung bestehender Gründe für eine vernachlässigte oder vereinfachte EoL Betrachtung geliefert.

### 6.1 Erste Empfehlungen zur Überwindung bestehender Gründe für eine vernachlässigte oder vereinfachte EoL Betrachtung

Aus den zuvor identifizierten Gründen für eine Vernachlässigung oder vereinfachte Betrachtung des Produktlebensendes lassen sich verschiedene Möglichkeiten ableiten, diese Gründe zu entkräften.

Zunächst wird jedoch nochmals darauf aufmerksam gemacht, dass insgesamt acht Studien keine Angabe dazu gemacht haben, weshalb das Produktlebensende vernachlässigt oder lediglich vereinfacht betrachtet wird. Diese Studien sind nochmals in der Tabelle 14 zusammengefasst.

Tabelle 14. Studien ohne Angaben zur Behandlung des EoLs

Nr.	Autor:in	Jahr	Titel	EoL Betrachtung
1	Abdulkareem et al.	2021	Life cycle assessment of a low-height noise barrier for railway traffic noise	vereinfacht
2	Arzoumanidis, Raggi, Petti	2019	Life Cycle Assessment of Honey: Considering the Pollination Service	vereinfacht
3	Weber et al.	2022	Environmental Impact Evaluation of a European High Speed Railway Network along the 'European Silk Road'	vereinfacht
4	Sierra et al.	2020	Life cycle analysis of a building integrated photovoltaic system operating in Bogotá, Colombia	vereinfacht
5	Agyekum, Fortuin, van der Harst	2017	Environmental and social life cycle assessment of bamboo bicycle frames made in Ghana	vereinfacht
6	Zhang et al.	2022	Life cycle assessment of an all-organic battery: Hotspots and opportunities for improvement	vernachlässigt
7	Fernandez-Merchante et al.	2020	Environmental and Preliminary Cost Assessments of Redox Flow Batteries for Renewable Energy Storage	vernachlässigt
8	Rasul, Arutla	2020	Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment	vernachlässigt

Unter Gesichtspunkten der Nachvollziehbarkeit ist zu kritisieren, dass keine Angaben gemacht werden, weshalb eine Studie das Produktlebensende vollständig vernachlässigt oder lediglich vereinfacht betrachtet. Eine erste Empfehlung hier ist, die getroffene Wahl zur EoL Betrachtung zumindest zu begründen.

Bei den identifizierten Studien mit einer vereinfachten EoL Betrachtung haben vier Studien, aufgrund einer Beschränkung durch die Systemgrenze, das Produktlebensende nicht detailliert betrachtet. Hierbei ist die Empfehlung die Systemgrenze, wenn möglich, zu erweitern, sodass eine detaillierte Betrachtung des Produktlebensendes miteinbezogen werden kann. Auffallend in einer Studie zu den Umweltwirkungen von Bargeldtransaktionen in den Niederlanden ist, dass das Recycling von Münzgeld nicht berücksichtigt wird, obwohl es in der Praxis durchaus üblich ist. Das Münzgeld wird eingeschmolzen und das recycelte Material als Sekundärrohstoff für die Herstellung anderer Produkte verwendet. In der Studie wird die Vernachlässigung des Recyclings jedoch damit begründet, dass das recycelte Material nicht für die Produktion neuer Münzen verwendet wird, sondern für die Herstellung anderer Produkte (vgl. Hanegraaf et al., 2020, S. 14). Gemäß der ISO Norm 14044 gibt es aber Allokationsmöglichkeiten, wie das Recycling in die Studie miteinbezogen werden kann und nicht ausgeschlossen werden muss (vgl. DIN EN ISO 14044:2006, S. 30 ff.). Demzufolge ist in so einem Fall die Empfehlung auszusprechen, sich ausreichend über die Allokationsmöglichkeiten im Umgang mit dem Produktlebensende zu informieren und diese anzuwenden.

Ein weiterer Punkt ist, dass eine Studie zu den Umweltwirkungen einer Lithium-Ionen-Batterie und einer Bleisäure-Batterie das EoL vereinfacht betrachtet, da sie basierend auf den PEFCR durchgeführt wird (vgl. Yudhistira, Khatiwada und Sanchez, 2022, S. 8). Aufgrund der Anlehnung an die PEFCR werden in der Studie keine Primärdaten einbezogen, weshalb lediglich eine vereinfachte Betrachtung des EoLs möglich ist. Hierbei ist die Empfehlung abzugeben, über die Begrenzungen der PEFCR hinauszuschauen. Die Methode kann zwar eine gute Basis für die Durchführung der Studie bilden, jedoch sollte die Betrachtung aller Lebenszyklusphasen dadurch nicht beeinträchtigt werden. Eine Lösung wäre, eine Studie basierend auf den PEFCR durchzuführen, jedoch mit Primärdaten des untersuchten Produktes weiter zu ergänzen.

Sechs von insgesamt 14 Ökobilanzstudien mit einer vernachlässigten EoL Betrachtung schließen das Produktlebensende aufgrund von methodischen Gründen aus. Die in Kapitel 5.2.1 erläuterte Unwissenheit und die mangelnde Datenverfügbarkeit sind hierbei ausschlaggebend. Ebenfalls auffällig bei der Sichtung der 50 Studien in dieser Arbeit ist, dass Studien, die gleiche Produktsysteme untersuchen, durchaus verschiedene EoL Betrachtungen wählen. So heißt es in Baumann et al. (2017, S. 1073) beispielsweise, dass die Abfallbehandlung, Entsorgung und das Batterierecycling aufgrund mangelnder zuverlässiger Daten nicht in der Studie betrachtet werden. In anderen Studien zu gleichen Produkten, wie beispielsweise in Weber et al. (2018) wird jedoch eine detaillierte EoL Betrachtung angewendet. Dementsprechend können sowohl die Unwissenheit über mögliche EoL Anwendungen als auch die mangelnde Datenverfügbarkeit oftmals mittels ausreichender Literaturrecherche überwunden werden. Häufig gibt es mehrere Studien, die gleiche oder ähnliche Produktsysteme untersuchen. Aus diesen könnte man zusätzliche Informationen oder Daten gewinnen und für die Durchführung einer Studie nutzen.

Des Weiteren ist zu empfehlen, dass die Grundeinstellung, das Produktlebensende sei irrelevant für eine Ökobilanzstudie, grundsätzlich abgelegt werden sollte. Diese Arbeit kann und soll unter anderem dabei helfen diesen Grundgedanken zu ändern.

Eine letzte konkrete Empfehlung ist die Anwendung der Life Cycle Gap Analysis (LCGA), um die Relevanz des Produktlebensendes zu unterstreichen. Die Methode beinhaltet folgende sechs Schritte, mit welchen das Ergebnis der Gesamtbilanz bestenfalls verbessert werden kann:

1. Bestimmung der gesamten Umweltwirkungen eines Produkts  $E_{\text{gesamt}}(X_{\text{alt}})$ .
2. Bestimmung der Life Cycle Gap (LCG) des Produktes. D.h. die Umweltwirkungen der Rohstoffgewinnung und Herstellungsphase eines Produkts werden addiert, wovon die Gutschriften aus der EoL Phase abgezogen werden. Das Ergebnis ist die LCG.
3. Ableitung von Maßnahmen zur Verkleinerung der LCG, z.B. durch eine alternative EoL Betrachtung, beispielsweise einem Recycling statt einer energetischen Verwertung.
4. Erneute Bestimmung der LCG des Produkts unter Einbeziehung der abgeleiteten Ergebnisse aus Schritt 3.

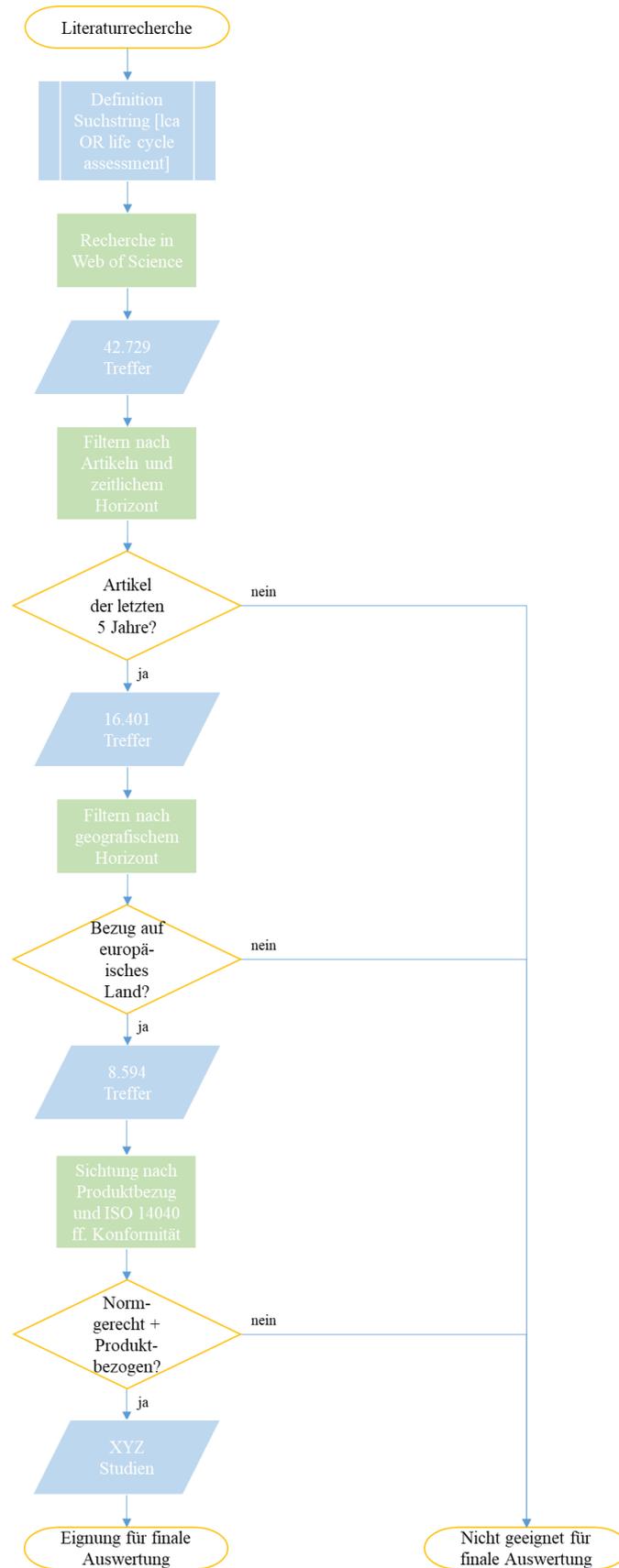
5. Bestimmung der gesamten Umweltwirkungen des Produkts gemäß Schritt 4  $E_{\text{gesamt}}(X_{\text{neu}})$ .
6. Vergleich der ursprünglichen Umweltwirkungen des Produkts aus Schritt 1 und den neu berechneten Umweltwirkungen des Produkts aus Schritt 5. Zusätzlich muss folgende Bedingung für eine erfolgreiche Anwendung der LCGA erfüllt sein:  $E_{\text{gesamt}}(X_{\text{neu}}) \leq E_{\text{gesamt}}(X_{\text{alt}})$ , d.h. die neu berechneten gesamten Umweltwirkungen des Produkts müssen kleiner gleich den ursprünglich berechneten gesamten Umweltwirkungen sein (vgl. Dieterle, Schäfer und Viere, 2018, S. 766).

Abschließend kann festgestellt werden, dass verschiedene Möglichkeiten vorhanden sind, um ursprüngliche Gründe für eine vernachlässigte oder vereinfachte EoL Betrachtung zu beseitigen. Diese reichen von einfacheren Ansätzen, wie die Erweiterung der Systemgrenze, über konkretere Maßnahmen, wie die Anwendung der LCGA. Je nachdem, was der ursprüngliche Grund für eine vernachlässigte bzw. vereinfachte Betrachtung des EoLs ist, gibt es verschiedene Empfehlungen, um das Produktlebensende trotzdem detailliert betrachten zu können.

## 6.2 Einschränkungen der Arbeit

Wie bereits in Abschnitt x angedeutet, ist das Vorgehen bei der Auswahl von geeigneten Studien nicht vollständig methodisch stringent und folglich eingeschränkt in der Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit im Sinne einer wissenschaftlichen Ausarbeitung. Der erste Prozess der Literaturrecherche, nämlich die Eingabe der Suchstrings in die Datenbanken, hat zum Teil mehrere 100.000 Suchergebnisse geliefert. Durch das Filtern nach dem zeitlichen Horizont wurde die Trefferanzahl zwar reduziert, jedoch war sie immer noch im höheren Tausenderbereich. Daraufhin folgte eine eher willkürlichere Auswahl von Studien, da es den Rahmen dieser Arbeit überschritten hätte, alle Suchergebnisse zu sichten. Für zukünftige Arbeiten und im Sinne einer möglichen wissenschaftlichen Veröffentlichung muss folglich eine methodisch stringente und vollständig reproduzierbare Vorgehensweise bei der Auswahl geeigneter Studien erfolgen. Abbildung 13 zeigt einen Vorschlag, wie die Literaturrecherche in weiteren Untersuchungen erfolgen kann.

Abbildung 13. Möglicher Ablauf der Recherche mittels Nutzung der Literaturdatenbank Web of Science



Statt der Definition von mehreren Suchstrings, die in mehreren verschiedenen Datenbanken eingesetzt werden, wird in diesem Vorgehen ein einziger klar definierter Suchstring gewählt, mit welchem in nur einer Datenbank gesucht wird. Dieser heißt lca OR „life cycle assessment“, wobei die Anführungsstriche wichtig sind, damit der Ausdruck als ein Suchbegriff gewertet wird. Die genutzte Datenbank ist Web of Science, da diese ihren Fokus auf Veröffentlichungen von allen Herausgebern enthält. Nach der ersten Suche erscheinen 42.729 Suchergebnisse. Durch das Filtern nach Artikeln der letzten fünf Jahre, werden diese folglich auf 16.401 Treffer reduziert. Im nächsten Schritt wird nach dem geografischen Bezug gefiltert. Es werden nur Veröffentlichungen aus einem europäischen Land angezeigt, wodurch die Suchergebnisse weiter auf 8.594 verringert werden können. Als letzter Schritt folgt eine Sichtung auf Produktbezug und ISO 14040 ff. Normkonformität der Studien. Somit kommt man auf ein Ergebnis von schätzungsweise 100 bis 150 Studien, die für die weitere Auswertung geeignet sind. Anzumerken ist, dass die letzte Sichtung der 8.594 Studien für diese Arbeit nicht mehr durchgeführt wurde, wodurch lediglich von schätzungsweise 100 bis 150 Studien als Endergebnis gesprochen wird. Des Weiteren zeigt die vorgeschlagene Vorgehensweise nur eine Möglichkeit, wie man bei der methodischen Auswahl der Studien vorgehen kann. Es können andere Filter ausgewählt werden, wie zum Beispiel eine Variation des zeitlichen Horizonts oder der Wissenschaftsverlage (bspw. Sichtung nach Elsevier, Springer Nature, und Wiley).

Die Zahlen in der Abbildung zeigen den Stand der angewandten Methodik vom 10. Juni 2022.

Eine weitere Einschränkung ist die Einstufung in eine vernachlässigte, vereinfachte und detaillierte Betrachtung des Produktlebensendes, welche auf der Abfallhierarchie des KrWGs basiert. Wie bereits in Kapitel x erwähnt, ist die Einstufung der EoL Betrachtung in manchen Fällen erschwert, da in einer Studie beispielsweise mehrere EoL Anwendung betrachtet werden können. Hierbei ist zu erwähnen, dass die letztendliche Einstufung subjektiv angesehen werden kann, da ein anderer Verfasser dieser Arbeit die 50 identifizierten Studien gegebenenfalls auf andere Art

und Weise eingestuft hätte. Dennoch ist festzuhalten, dass eine klare Vorgehensweise beschrieben wird, wie die Einstufung der EoL Betrachtung in fragwürdigen Fällen erfolgt.

## **7 Zusammenfassung und Ausblick**

Mittels definierten Suchstrings und der Festlegung bestimmter Kriterien, die eine Studie erfüllen muss, wird eine Literaturrecherche zur Auswahl geeigneter LCA Studien durchgeführt. Insgesamt können damit 50 Ökobilanzstudien identifiziert werden, welche bezüglich ihrer EoL Betrachtung weiter ausgewertet werden. Diese Studien werden gemäß der Abfallhierarchie des KrWGs bezüglich der Tiefe ihrer EoL Betrachtung eingestuft. Eine Studie vernachlässigt das Produktlebensende, wenn dieses nicht innerhalb der Systemgrenze liegt. Das EoL wird vereinfacht betrachtet, wenn eine Beseitigung oder die sonstige Verwertung angenommen wird. Wird das EoL gemäß der ersten drei Hierarchiestufen der Abfallhierarchie behandelt, so wird sie als Studie mit detaillierter EoL Betrachtung eingestuft. Mehr als 50 % der identifizierten Studien betrachten das Produktlebensende nicht im Detail, weshalb davon ausgegangen werden kann, dass dem EoL im Vergleich zu anderen Lebenszyklusphasen grundsätzlich weniger Relevanz zugeschrieben wird. Durch die Sichtung der Studien wird zudem verdeutlicht, dass dem Produktlebensende in verschiedenen LCA Studien auf jedem Fall eine unterschiedliche Bedeutung zugeschrieben wird. Es lassen sich insgesamt vier Gründe identifizieren, weshalb das EoL in 14 Studien lediglich vereinfacht betrachtet wird. Dazu zählen die Beschränkung durch die Systemgrenze, methodische Einschränkungen, nicht vorhandene gesetzliche Vorgaben zur Betrachtung des EoLs und die geografischen Einschränkungen. Weitere 14 Studien vernachlässigen die EoL Betrachtung vollständig. Hierfür werden drei übergeordnete Gründe festgestellt: methodische, zielbezogene und wirtschaftliche. Den größten Anteil mit 40 % dieser Studien begründen ihre vernachlässigte EoL Betrachtung durch die methodische Einschränkung, welche entweder durch Unwissenheit oder mangelnde Datenverfügbarkeit definiert wird. Des Weiteren wird bei insgesamt acht Studien keine Angabe gemacht, weshalb das Produktlebensende vereinfacht betrachtet oder vernachlässigt wird. Die Vernachlässigung beziehungsweise vereinfachte Betrachtung des Produktlebensendes hat zur

Folge, dass das EoL keinen oder nur einen geringen Einfluss auf das Ergebnis der Gesamtbilanz hat. In Kapitel 5.3 wird klar, dass je detaillierter das EoL in einer Studie betrachtet wird, desto höher dessen Einfluss auf die Gesamtbilanz ist.

Es können verschiedene Möglichkeiten abgeleitet werden, wie Gründe für eine vernachlässigte bzw. vereinfachte EoL Betrachtung entkräftet werden können. Diese reichen von einfachen Lösungen, wie die Erweiterung der Systemgrenze, über konkrete Maßnahmen, wie die Anwendung der LCGA. Die LCGA erscheint vor allem als ein gutes Instrument, um die hohe Relevanz des Produktlebensendes zu unterstreichen und das Gesamtergebnis einer Ökobilanz bestenfalls zu verbessern.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die vorgestellte Bachelorarbeit erste Erkenntnisse im Sinne der Zweckbeziehung zwischen der Ökobilanzierung und dem Produktlebensende bzw. Recycling verschiedener Produkte liefert und als Grundlagenuntersuchung für weitere wissenschaftliche Arbeiten zu verstehen ist. Dass > 50 % der willkürlich ausgewählten Studien das EoL nicht weiter im Detail betrachten, ist als wichtiger Rückschluss und Motivationstreiber für weitere wissenschaftlich fundierte Untersuchungen zu verstehen. Hierzu zählt ebenfalls, existierende Studien nach einem gegebenen Muster auszuwerten (siehe hierzu Kapitel 4.2) und Empfehlungen zur Veränderung bestehender Handlungsmuster abzuleiten (siehe hierzu Kapitel 6.1).

## Literaturverzeichnis

- Abdulkareem, Mariam et al. (2021): Life cycle assessment of a low-height noise barrier for railway traffic noise. In: *Journal of Cleaner Production*, Vol. 323, No. 129169, 2021.
- Agyekum, Eric Ofori; Fortuin, K.P.J. (Karen) und van der Harst, Eugenie (2017): Environmental and social life cycle assessment of bamboo bicycle frames made in Ghana. In: *Journal of Cleaner Production*, Vol. 143, S. 1069-1080, 2017.
- Arzoumanidis, Ioannis; Raggi, Andrea und Petti, Luigia (2019): Life Cycle Assessment of Honey: Considering the Pollination Service. In: *Administrative Sciences*, Vol. 9, No. 27, 2019, doi:10.3390/admsci9010027.
- Baumann, M. et al. (2017): CO2 Footprint and Life-Cycle Costs of Electrochemical Energy Storage for Stationary Grid Applications. In: *Energy Technology*, Vol. 5, S. 1071-1083, 2017.
- Bekel, Kai und Pauliuk, Stefan (2019): Prospective cost and environmental impact assessment of battery and fuel cell electric vehicles in Germany. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 24, S. 2220-2237, 2019.
- Bundesministerium für wirtschaftliche Zusammenarbeit und Entwicklung – BMZ (URL): Nachhaltigkeit (nachhaltige Entwicklung), URL: <https://www.bmz.de/de/service/lexikon/nachhaltigkeit-nachhaltige-entwicklung-14700>, abgerufen am 01.07.2022.
- Bushi, Lindita; Skrzek, Tim und Reburn, Timothy (2019): New ultralight automotive door life cycle assessment. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 24, S. 310-323, URL: <https://link.springer.com/article/10.1007/s11367-018-1515-z>, abgerufen am 01.07.2022.
- Bültmann, Alexandra (1997): Produktökobilanzen und ihre Anwendung in deutschen Unternehmen. Schriftreihe des IÖW 112/97, Berlin, 1997.
- Da Silva Lima, Lígia et al. (2021): Life cycle assessment of lithium-ion batteries and vanadium redox flow batteries-based renewable energy storage systems. In: *Sustainable Energy Technologies and Assessments*, Vol. 46, No. 101286, 2021.

- Dell Technologies und thinkstep (2019): Life Cycle Assessment of Dell Latitude 7300 25<sup>th</sup> Anniversary Edition.
- Del Pero, Francesco; Delogu, Massimo und Pierini, Marco (2018): Life Cycle Assessment in the automotive sector: a comparative case study of Internal Combustion Engine (ICE) and electric car. In: *Procedia Structural Integrity*, Vol. 12, S. 521- 537, 2018).
- Dias-Ramírez, C. Maryori et al. (2020): Battery Manufacturing Resource Assessment to Minimise Component Production Environmental Impacts. In: *Sustainability*, Vol. 12, No. 6840, 2020, doi: 10.3390/su12176840.
- Dieterle, Michael und Ginter, Jannis (2022): Life cycle (gap) analysis for advanced material recycling of PLA cups. In: *Procedia CIRP*, Vol. 105, S. 13-18, 2022.
- Dieterle, Michael; Schäfer, Philipp und Viere, Tobias (2018): Life Cycle Gaps: Interpreting LCA Results with a Circular Economy Mindset. In: *Procedia CIRP*, Vol. 69, S. 164 – 768, 2018.
- DIN 6601 (1983), Informationsverarbeitung – Sinnbilder und ihre Anwendung.
- DIN EN ISO 14040:2006 + A1:2020, Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO14040:2006 + Amd 1:2020).
- DIN EN ISO 14044:2006, Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006).
- Ecochain (URL): Ökobilanz (LCA) – Leitfaden für Anfänger, URL: <https://ecochain.com/de/knowledge-base/oekobilanz-lca-kompletter-leitfaden-fur-anfanger/>, abgerufen am 01.07.2022.
- Egeskog et al. (2020): Volvo Cars – Carbon footprint report – Battery electric XC40 Recharge and the XC40 ICE, URL: <https://www.volvocars.com/images/v/-/media/project/contentplatform/data/media/my23/xc40-electric-light/volvo-cars-LCA-report-xc40.pdf>, abgerufen am 01.07.2022.
- Evangelista, Patricia P.A. et al. (2018): Environmental performance analysis of residential buildings in Brazil using life cycle assessment (LCA). In: *Construction and Building Materials*, Vol. 169, S. 748-761, 2018.
- Evangelisti, Sara et al. (2017): Life cycle assessment of a polymer electrolyte membrane fuel cell system for passenger vehicles. In: *Journal of Cleaner Production*, Vol. 142, S. 4339-4355, 2017.

- Evrard, Elisabeth et al. (2021): Volvo Cars – Carbon Footprint Report – Volvo C40 Recharge, URL: <https://www.volvocars.com/images/v/-/media/Market-Assets/INTL/Applications/DotCom/PDF/C40/Volvo-C40-Recharge-LCA-report.pdf>, abgerufen am 01.07.2022.
- Fernandez-Marchante, Carmen M. et al. (2020): Environmental and Preliminary Cost Assessments of Redox Flow Batteries for Renewable Energy Storage. In: *Energy Technology*, Vol. 8, No. 1900914, 2019, DOI: 10.1002/ente.201900914.
- Fieschi, Maurizio und Pretato, Ugo (2018): Role of compostable tableware in food service and waste management. A life cycle assessment study. In: *Waste Management*, Vol. 73, S. 14-25, 2018, URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0956053X17308760?via%3Dihub>, abgerufen am 01.07.2022.
- Gouveia, J.R. et al. (2020): Life cycle assessment of a renewable energy generation system with a vanadium redox flow battery in a NZEB household. The 6<sup>th</sup> International Conference on Energy and Environment Research, July 22–25, 2019, University of Aveiro, Portugal. In: *Energy Reports*, Vol. 6, S. 87-94, 2020.
- Gouveia, J.R. et al. (2020): Life cycle assessment of a vanadium flow battery – A joint organization of University of Aveiro (UA), School of Engineering of the Polytechnic of Porto (ISEP) and SCIENCE and Engineering Institute (SCIEI). The 6th International Conference on Energy and Environment Research, July 22–25, 2019, University of Aveiro, Portugal. In: *Energy Reports*, Vol. 6, S. 95-101, 2020.
- Hanegraaf, Randall et al. (2018): Life cycle assessment of cash payments. DNB Working Paper No. 610, Oktober 2018, URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3267868](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3267868), abgerufen am 01.07.2022.
- Hauschild, Michael Z.; Rosenbaum, Ralph K. und Irving Olsen, Stig (2018): About This Book. In: *Life Cycle Assessment – Theory and Practice*, Springer Nature, Cham, 2018.
- He, Haoyang et al. (2020): Flow battery production: Materials selection and environmental impact. In: *Journal of Cleaner Production*, Vol. 269, No. 121740, 2020.

- Institut Bauen und Umwelt e.V. (IBU) (2019): Betonpflastersteine – GODEL MANN GmbH & Co. KG. Umwelt-Produktdeklaration, Deklarationsnr. EPD-GDM-20190089-IAC1-DE, Berlin.
- IPCC (2022): Summary for Policymakers. In: Climate Change 2022: Mitigation of Climate Change. Contribution of Working Group III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [P.R. Shukla, J. Skea, R. Slade, A. Al Khourdajie, R. van Diemen, D. McCollum, M. Pathak, S. Some, P. Vyas, R. Fradera, M. Belkacemi, A. Hasija, G. Lisboa, S. Luz, J. Malley, (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA. doi: 10.1017/9781009157926.001.
- Jirapornvaree, Ittisak; Suppadit, Tawadchai und Kumar, Vikas (2021): Assessing the economic and environmental impact of jasmine rice production: Life cycle assessment and Life Cycle Costs analysis. In: Journal of Cleaner Production, Vol. 303, 127079, 2021.
- Jones, Christopher; Gilbert, Paul und Stamford, Laurence (2020): Assessing the Climate Change Mitigation Potential of Stationary Energy Storage for Electricity Grid Services. In: Environmental Science & Technology, Vol. 54, S. 67-75, 2020.
- Kauertz, Benedikt et al. (2018): FKN Ökobilanz 2018 – Ökobilanzieller Vergleich von Getränkeverbundkartons mit PET-Einweg- und Glas-Mehrwegflaschen in den Getränkesegmenten Saft/ Nektar, H-Milch und Frischmilch, Abschlussbericht nach kritischer Prüfung. Heidelberg, 2018.
- Koch, Thomas; Toedter, Olaf und Weber, Philipp (2018): Ökobilanz von Pkws mit verschiedenen Antriebssystemen. VDI-Studie Oktober 2020.
- Kreislaufwirtschaftsgesetz vom 24. Februar 2012 (BGBl. I S. 212), das zuletzt durch Artikel 20 des Gesetzes vom 10. August 2021 (BGBl. I S. 3436) geändert worden ist, URL: <https://www.gesetze-im-internet.de/krwg/>, abgerufen am 01.07.2022.
- L'Abbate, Pasqua; Dassisi, Michele und Olabi, Abdul G. (2018): Small-Size Vanadium Redox Flow Batteries: An Environmental Sustainability Analysis via LCA. In: Life Cycle Assessment of Energy Systems and Sustainable

- Energy Technologies, Green Energy and Technology, Springer Nature, S. 61-78, Cham, 2018.
- Lenzo, Paola et al. (2018): Sustainability Performance of an Italian Textile Product. In: *Economies*, Vol. 6, No. 17, 2018, doi: 10.3390/economies6010017.
- Li, Peixian; Froese, Thomas M. und Cavka, Belgin Terim (2018): Life cycle assessment of magnesium oxide structural insulated panels for a smart home in Vancouver. In: *Energy & Buildings*, Vol. 175, S. 78-86, 2018.
- Lindgreen, Erik Roos et al. (2017): Evaluating the environmental impact of debit card payments. DNB Working Paper, No. 574, Oktober 2017, URL: [https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract\\_id=3057340](https://papers.ssrn.com/sol3/papers.cfm?abstract_id=3057340), abgerufen am 01.07.2022.
- Liu, Junxi et al. (2022): Impact of recycling effect in comparative life cycle assessment for materials selection - A case study of light-weighting vehicles. In: *Journal of Cleaner Production*, Vol. 349, No. 131317, 2022.
- Lombardi, Lidia et al. (2017): Comparative environmental assessment of conventional, electric, hybrid, and fuel cell powertrains based on LCA. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 22, S. 1989-2006, 2017.
- Markwardt, Stefanie et al. (2017): Comparative Life Cycle Assessment of Tetra Pak® carton packages and alternative packaging systems for liquid food on the Nordic market, Final report. Heidelberg, 2017.
- McDonough, William und Braungart, Michael (2002): *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, URL: <https://mcdonough.com/writings/cradle-cradle-remaking-way-make-things/>, abgerufen am 01.07.2022.
- Miller, Ian; Gencer, Emre und O'Sullivan, Francis M. (2018): A General Model for Estimating Emissions from Integrated Power Generation and Energy Storage. Case Study: Integration of Solar Photovoltaic Power and Wind Power with Batteries. In: *Process*, Vol. 6, No. 267, 2018, doi:10.3390/pr6120267.
- Moltesen, Andreas und Bjorn, Anders (2018): *LCA and Sustainability*. In: *Life Cycle Assessment – Theory and Practice*, Springer Nature, Cham, 2018.
- Morales, Michele et al. (2019): Regionalized inventory data in LCA of public housing: A comparison between two conventional typologies in southern

- Brazil. In: *Journal of Cleaner Production*, Vol. 238, No. 117869, 2019, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.117869>, abgerufen am 01.07.2022.
- Morales-Mora, Miguel A. et al. (2021): Life cycle assessment of a novel bipolar electro dialysis-based flow battery concept and its potential use to mitigate the intermittency of renewable energy generation. In: *Journal of Energy Storage*, Vol. 35, No. 102339, 2021.
- Nestlé (2017): Studie: Gute Umweltbilanz des Nespresso Systems. URL: <https://www.nestle.de/medien/news/nespresso-kapselrecycling>, abgerufen am 01.07.2022.
- o. V. (2018): Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCR) for still and sparkling wine.
- o. V. (2018): Product Environmental Footprint Category Rule – IT equipment (Storage).
- Piotrowska, Katarzyna et al. (2019): Assessment of the Environmental Impact of a Car Tire throughout Its Lifecycle Using the LCA Method. In: *Materials*, Vol. 12, No. 4177, 2019, doi: 10.3390/ma12244177.
- Rasul, M.G. und Arutla, L.K.R. (2020): Environmental impact assessment of green roofs using life cycle assessment, 6th International Conference on Energy and Environment Research, ICEER 2019, 22-25 July, University of Aveiro, Portugal. In: *Energy Reports*, Vol. 6, S. 503-508, 2020.
- Rossi, Federico et al. (2020): Life Cycle Assessment of Classic and Innovative Batteries for Solar Home Systems in Europe. In: *energies*, Vol. 13, No. 3454, 2020, doi:10.3390/en13133454.
- Sierra, Didier et al. (2020): Life cycle analysis of a building integrated photovoltaic system operating in Bogotá, Colombia, Tmrees, EURACA, 04 to 06 September 2019, Athens, Greece. In: *Energy Reports*, Vol. 6, S. 10-19, 2020.
- Siret, Clémence et al. (2018): PEFCR - Product Environmental Footprint Category Rules for High Specific Energy Rechargeable Batteries for Mobile Applications. Recharge – The Advanced Rechargeable & Lithium Batteries Association.

- Sözer, Hatice und Sözen, Hüseyin (2020): Waste capacity and its environmental impact of a residential district during its life cycle. In: Energy Reports, Vol. 6, S. 286-296, 2020.
- Trapp, Markus et al. (2017): Life Cycle Assessment for Frozen Food Distribution Schemes. In: Digitalization in Maritime and Sustainable Logistics, Vol. 24, S.267-284, Berlin, 2017, ISBN 9783745043327.
- United Nations (URL): History, URL: <https://sdgs.un.org/goals>, abgerufen am 01.07.2022.
- Weber, Katharina et al. (2022): Environmental Impact Evaluation of a European High Speed Railway Network along the 'European Silk Road'. Research Report 459, Wiener Institut für Internationale Wirtschaftsvergleiche.
- Weber, Selina et al. (2018): Life cycle assessment of a Vanadium Redox Flow Battery. In: Environmental Science & Technoloy, DOI: 10.1021/acs.est.8b02073.
- World Commission on Environment and Development (1987): Our Common Future, URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/5987our-common-future.pdf>, abgerufen am 01.07.2022.
- Wu, You und Su, Daizhong (2021): LCA of an industrial luminaire using product environmental footprint method. In: Journal of Cleaner Production, Vol. 305, No. 127159, 2021.
- Yudhistira, Ryutaka; Khatiwada, Dilip und Sanchez, Fernando (2022): A comparative life cycle assessment of lithium-ion and lead-acid batteries for grid energy storage. In: Journal of Cleaner Production, Vol. 358, No. 131999, 2022.
- Zhang et al. (2022): Life cycle assessment of an all-organic battery: Hotspots and opportunities for improvement. In: Journal of Cleaner Production, Vol. 337, No. 130454, 2022.

## **Anhang**

Aufgrund der Größe der Tabellen, können diese nicht im Anhang bereitgestellt werden. Demnach wird hier auf das Begleitmaterial verwiesen.

Die Excel Datei „Begleitmaterial“ beinhaltet die Blätter „Recherche“ und „Übersicht“.