

# Erweiterung der Ökobilanzierung zur Bewertung zukünftiger Umweltauswirkungen von neuartigen Transporttechnologien am Beispiel elektrifizierter Flugzeuge

Dissertation von Susanne Hanesch

IWAR



TECHNISCHE  
UNIVERSITÄT  
DARMSTADT

am Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften  
der Technischen Universität Darmstadt  
zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktor-Ingenieur (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von Susanne Katharina Hanesch, M.Sc. aus Frankfurt am Main

1. Gutachten: Prof. Dr. rer. nat. Liselotte Schebek
2. Gutachten: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Andreas Oetting

Darmstadt 2024

---

Erweiterung der Ökobilanzierung zur Bewertung zukünftiger  
Umweltauswirkungen von neuartigen Transporttechnologien  
am Beispiel elektrifizierter Flugzeuge

Extension of life cycle assessment for evaluating future  
environmental impacts of emerging transportation technologies  
exemplified by electrified aircraft

Hanesch, Susanne: Erweiterung der Ökobilanzierung zur Bewertung zukünftiger  
Umweltauswirkungen von neuartigen Transporttechnologien am Beispiel elektrifizierter  
Flugzeuge. Darmstadt. Technische Universität Darmstadt.

Jahr der Veröffentlichung der Dissertation auf TUpriints: 2024

URN: urn:nbn:de:tuda-tuprints-275727

Tag der Einreichung: 29.02.2024

Tag der mündlichen Prüfung: 13.05.2024

Veröffentlicht unter CC BY 4.0 International

<https://creativecommons.org/licenses/>

---

---

## Danksagung

---

Gewidmet meinen Großeltern Hermann Marhold, Dipl.-Ing. der TU Darmstadt  
und Hildegard Marhold, in ewiger Liebe.

Dieser lange Weg an der TU Darmstadt ist nun zu einem finalen Abschluss gekommen. Begonnen 2011 im Fachbereich Architektur mit dem Bachelor-Abschluss, fortgesetzt 2014 im Studienbereich Energy Science and Engineering mit dem Master-Abschluss und finalisiert 2019 im Fachbereich Bau- und Umweltingenieurwissenschaften mit dem nahenden Doktor-Abschluss.

Über vielfältige Disziplinen und Erfahrungen verlasse ich nun die Universität und hätte nie für möglich gehalten, dass dieser spannende und prägende Weg der meine sein würde.

Ich danke meiner betreuenden Professorin, Liselotte Schebek, für ihren ungebrochenen Glauben an mich und die bedeutsamen Projekte zu elektrischem Schwerlastverkehr und elektrischem Fliegen, mit denen sie mich an ihr Fachgebiet geholt und dort gehalten hat. Und ich danke meinem weiteren Gutachter, Andreas Oetting, für die gute Übernahme nach ihrem Ruhestand und dem Interesse an diesem relevanten Thema der Ökobilanzierung.

Ohne meine Kollegen am Fachgebiet Stoffstrommanagement und Ressourcenwirtschaft wäre der Abschluss nicht möglich gewesen. Alessio Campitelli, du hast mich früh zum Publizieren ermutigt, für diese Unterstützung und den Startschuss danke ich dir sehr. Steffi Weyand, von dir und deinem großen Wissen im Bereich „emerging technologies“ konnte ich sehr viel lernen, ich danke dir für deinen Beistand bis zum Schluss. Dem ganzen FG SuR Team und insbesondere Julia Zeulner, Malte Vogelgesang, Bianca Siedlecki, Niklas Scholliers, Alice do Carmo Precci Lopes, Albert-Jan van Zuilichem, Julian Baehr und Regina Berlinger danke ich für den Austausch und die Freude, die wir über die lange Zeit miteinander hatten.

Meinen Freunden und meiner Familie möchte ich für die fünf Jahre Vertrauen und Geduld von Herzen danken. Auch wenn ich an einigen Lebensfreuden nicht teilhaben konnte, ihr ward stets an meiner Seite und ein großer Antrieb zum Fertigwerden. Meiner besseren Hälfte, Marvin Hanesch, danke ich für alles. Ohne dich hätte ich es nicht geschafft.

---

---

## Kurzfassung

---

Im Verkehrssektor sind neuartige Technologien als sog. Transport-Transformationslösungen (TTS) zu entwickeln und in ihrer Umweltleistung zu bewerten, um u.a. eine Reduktion der Treibhausgase (THG) zu gewährleisten und für den Zielzustand einer nachhaltigen Mobilität Transportvarianten sicherzustellen. Jedoch fehlen besonders im Flugsektor dekarbonisierte Alternativen und zur Durchführung der Sachbilanz (LCI) im Rahmen der Ökobilanzierung (LCA) existieren Herausforderungen für das Erfassen von Daten in Entwicklung befindlicher Technologien und die Berücksichtigung von zukünftigen Entwicklungen.

Das Ziel der Arbeit ist eine systematische Vorgehensweise für vergleichbare LCA-Ergebnisse zwischen etablierten und neuartigen Fahrzeugen mit einer zweifachen Erweiterung der LCI als neues Framework für Ökobilanzierer. Die Methodenentwicklung umfasst erstens die ex-ante Sachbilanz (eLCI) für vollständige Modelle der Technologieänderung von TTS als erstes Veränderungslevel und zweitens die prospektive Sachbilanz (pLCI) für passgenaue Modelle mittels Zukunftsbetrachtung unter technologischem und zeitlichem Fortschritt als zweites und drittes Veränderungslevel. Die technologische Änderung des Fahrzeugs im Status Quo ist strukturiert darzulegen, um alle Parameter der LCA im Referenzzustand zu generieren. Daraus sind ausgewählte Parameter für das Upscaling des Reifegrads bis zum industriellen Maßstab und die Systemumgebung zu Zukunftsszenarien unterschiedlicher Zeithorizonte für die LCA im Zukunftszustand zu modifizieren, um künftige Änderungen zu berücksichtigen. Mit einer schrittweisen Anleitung in je drei Stufen lassen sich TTS über den Lebensweg nachbilden und mit selektiven Zukunftsverbesserungen anpassen, um ermittelte potenzielle Umweltwirkungen dem konventionellen Transport vergleichend gegenüberzustellen.

In einer Fallstudie wird das Vorgehen auf zwei elektrifizierte Flugzeuge angewendet und die Alternativen aus Computersimulationsdaten von Konstruktion und Betrieb sowie weiteren Datengenerierungstechniken für vollständige Flugzeugmodelle generiert zur Bewertung in der retrospektiven LCA. Die Flugzeugmodelle im Labormaßstab werden für die nahe Zukunft bis 2025 und entfernte Zukunft bis 2050 modifiziert, indem nicht nur die elektrifizierten Flugzeuge auf den Markt kommen und sich das konventionelle Flugzeug weiterentwickelt, sondern auch die umgebenden Märkte. Die prospektiven LCA-Ergebnisse zeigen, dass unter Einbeziehung der Entwicklungspfade bereits für das konventionelle Flugzeug nennenswerte THG-Emissionsminderungen erzielbar sind, während für die elektrifizierten Alternativen die Entwicklung von Strommix und Wasserstoffproduktion einen signifikanten Einfluss auf die Umweltwirkungen hat. Mit der methodischen Erweiterung der LCA können Daten höherer Vollständigkeit im frühen Entwicklungsstand zur Identifizierung von Optimierungspotenzial und gesicherter Weiternutzung unveränderter Daten sowie eine größere Passgenauigkeit der Daten aufgrund höherer technologischer und zeitlicher Repräsentativität für die potenziellen Umweltwirkungsergebnisse auf Basis entwickelter Zukunftsszenarien erreicht werden.

Als Resultat der Forschung entsteht für neuartige und zukunftsgerichtete Technologien ein Framework zur Modellnachbildung für eine zielgerichtete Umweltbewertung, das auf neue Flugzeugalternativen angewendet wird und THG-Minderungspotenziale für das elektrische Fliegen aufzeigt. Die ökobilanzielle Nachbildung zur Bewertung von TTS in einem strukturierten Framework verbessert die Entscheidungsunterstützung für politische und wirtschaftliche Akteure, indem frühzeitig Handlungsempfehlungen für die weitere

---

Erforschung neuartiger Verkehrsmittel auf dem Weg zur Marktreife bereitgestellt werden. Darüber hinaus ist das Framework auf andere Zukunftstechnologien zur Umweltbewertung anwendbar, um bereits jetzt Sektoren wie den Verkehrssektor im Transformationsprozess mit umweltrelevanten Maßnahmen für die Zukunft zu unterstützen.

---

---

## Abstract

---

In the mobility sector, emerging technologies are being developed as so-called transport transformation solutions (TTS) and their environmental performance assessed to ensure, among others, a reduction in greenhouse gases (GHG) and to provide transportation alternatives for the target state of sustainable mobility. However, decarbonised alternatives are lacking, particularly in the aviation sector, and there are challenges in collecting data on technologies under development and taking future developments into account when conducting life cycle inventory analysis (LCI) as part of life cycle assessment (LCA).

The aim of the work is a systematic approach for comparable LCA results between established and emerging vehicles with a twofold extension of LCI as a new framework for LCA practitioners. The method development comprises firstly the ex-ante life cycle inventory analysis (eLCI) for complete models of technology change of TTS as first change level and secondly the prospective life cycle inventory analysis (pLCI) for accurate models by future consideration under technological and temporal progress as second and third change level. The technological change of the vehicle in the status quo must be presented structured in order to generate all parameters of the LCA in reference state. From this, selected parameters for upscaling the maturity to industrial scale and the system environment to future scenarios of different time horizons are modified for the LCA in future state in order to take future changes into account. With step-by-step instructions in three stages, TTS can be modelled over the life cycle and adapted with selective future improvements in order to compare the determined potential environmental impacts with conventional transport.

In a case study, the procedure is applied to two electrified aircraft and the alternatives are generated from computer simulation data of construction and operation as well as other data generation techniques for complete aircraft models to evaluate in retrospective LCA. The lab scale aircraft models are modified for the near future up to 2025 and far future up to 2050 as not only the electrified aircraft enter the market and the conventional aircraft evolve, but also surrounding markets. The prospective LCA results show by considering the development paths that significant GHG emission reductions can already be achieved for the conventional aircraft, while the development of electricity mix and hydrogen production has a significant influence on environmental impacts of the electrified alternatives. With the methodological extension of LCA, data of greater completeness can be achieved at an early development stage to identify optimisation potential and secure further use of unmodified data, as well as greater accuracy of data due to higher technological and temporal representativeness for potential environmental impact results based on developed future scenarios.

As a result of the research, a framework for modelling emerging and future-oriented technologies is being developed for a precise environmental assessment that is applied to new aircraft alternatives and identifies GHG reduction potentials for electric flying. The LCI modelling for assessing TTS in a structured framework improves decision support for political and economic stakeholders by providing early recommendations for further research on emerging transportation technologies towards market maturity. In addition, the framework can be applied to other future technologies for environmental assessment in order to already support sectors such as the mobility sector in the transformation process with environmentally relevant measures for the future.

---

---

## Inhaltsverzeichnis

---

Abbildungsverzeichnis.....	ix
Tabellenverzeichnis.....	xii
Abkürzungsverzeichnis.....	xiv
1    Einleitung .....	1
1.1    Motivation .....	1
1.2    Ausgangslage.....	1
1.3    Untersuchungsgegenstand und Forschungsziel.....	5
2    Stand der Wissenschaft .....	9
2.1    Forschung zum Untersuchungsgegenstand und existierende Methoden.....	9
3    Einführung in die Forschungsmethodik.....	31
3.1    Herleitung des Forschungsvorhabens aus dem Stand der Wissenschaft .....	31
3.2    Konkretes Forschungsvorhaben in dieser Arbeit .....	34
3.3    Methodische Festlegungen in der Arbeit zu konventionellen, neuartigen und zukunftsgerichteten Verkehrsmitteln.....	42
4    Erster Methodenteil der ex-post Sachbilanz zur Nachbildung konventioneller Verkehrsmittel .....	54
4.1    Allgemeines zur ex-post Sachbilanz Methodik.....	54
4.2    Erste Stufe der Vorbereitung der Datenerhebung zur Ausbildung der Modellstruktur von konventionellem Transport.....	55
4.3    Zweite Stufe der Datenerhebung zur Beschaffung der quantitativen Informationen von konventionellem Transport.....	57
4.4    Dritte Stufe der Datenberechnung zur Modellquantifizierung des Transportmodells.....	62
4.5    Zusammenfassung von Kernelementen der ex-post Sachbilanz für konventionellen Transport.....	66
5    Zweiter Methodenteil der ex-ante Sachbilanz zur Nachbildung neuartiger Verkehrsmittel .....	67
5.1    Allgemeines zur ex-ante Sachbilanz Methodik.....	67
5.2    Vorgelagerte Stufe der ex-ante Sachbilanz zur Klassifizierung von Transport-Transformationslösungen.....	68
5.3    Erste Stufe der Neue Parameter Identifizierung zur Ausbildung der Modellstruktur von Transport-Transformationslösungen.....	69
5.4    Zweite Stufe der Vollständige Parameter Erarbeitung zur Beschaffung aller quantitativen Informationen der Transport-Transformationslösung.....	72
5.5    Dritte Stufe der Produktsystem Bestimmung zur Modellquantifizierung des Transformationsmodells.....	75
5.6    Nachgelagerte Stufe der ex-ante Sachbilanz zur Bewertung von neuartigen Verkehrsmitteln .....	81
5.7    Zusammenfassung von Kernelementen der ex-ante Sachbilanz für Transport-Transformationslösungen.....	82
6    Dritter Methodenteil der prospektiven Sachbilanz zur Nachbildung zukünftiger Verkehrsmittel .....	83

6.1	Allgemeines zur prospektiven Sachbilanz Methodik .....	83
6.2	Vorgelagerte Stufe der prospektiven Sachbilanz zur Klassifizierung von Zukunftsveränderungen für Zukunftsszenarien .....	86
6.3	Erste Stufe der Selektive Parameter Identifizierung zur Ausbildung der Modellstruktur auf Basis von Zukunftsveränderungen.....	87
6.4	Zweite Stufe der Zukünftige Parameter Erarbeitung zur Beschaffung ausgewählter quantitativer Informationen für Zukunftsszenarien .....	91
6.5	Dritte Stufe der Zukunftsszenario Bestimmung zur Modellquantifizierung der Zukunftsveränderungsmodelle.....	99
6.6	Nachgelagerte Stufe der prospektiven Sachbilanz zur Bewertung von zukünftigen Verkehrsmitteln .....	107
6.7	Zusammenfassung von Kernelementen der prospektiven Sachbilanz für zukunftsgerichtete konventionelle bzw. neuartige Verkehrsmittel .....	108
7	Praktische Umsetzung des Frameworks für Ergebnisse zur Fallstudie von Kleinflugzeugen.....	111
7.1	Fallstudienbeschreibung des Projekts GNOSIS.....	111
7.2	Anwendung der standardisierten ex-post Sachbilanz zur Nachbildung des konventionellen Flugzeugs.....	112
7.3	Anwendung der erweiterten ex-ante Sachbilanz zur Nachbildung der zwei elektrifizierten Flugzeuge.....	117
7.4	Anwendung der erweiterten prospektiven Sachbilanz zur Nachbildung der zukunftsgerichteten Flugzeuge.....	126
7.5	Validierung und Auswertung der Flugtransporterergebnisse.....	141
8	Diskussion des Frameworks und der erzeugten Ergebnisse.....	150
8.1	Einordnung der Forschungsarbeit in den Kontext der Literatur .....	150
8.2	Kritische Würdigung des Frameworks .....	156
8.3	Beantwortung der detaillierten Forschungsfragen .....	162
9	Schlussfolgerungen und Ausblick der Arbeit.....	165
9.1	Fazit der Forschungsarbeit .....	165
9.2	Empfehlungen und Maßnahmen für eine nachhaltige Mobilität .....	171
9.3	Ausblick der Forschungsarbeit.....	177
	Anhang A - Literaturrecherche und Auswertung .....	I
	Anhang B - Methodenentwicklung und Methodenanwendung .....	XXIII
	Literaturverzeichnis.....	L



---

---

## Abbildungsverzeichnis

---

Abbildung 1 Dekarbonisierungsmöglichkeiten im Verkehrssektor als Untersuchungsgegenstand.....	5
Abbildung 2 Standardisiertes Messsystem zur Reifegradbewertung einer neuartigen Technologie (NASA, 2012).....	6
Abbildung 3 Vereinfachte Lebenswegbetrachtung von Verkehrsmitteln am Beispiel eines Kleinflugzeugs.....	9
Abbildung 4 Die standardisierte Methode der Ökobilanzierung in vier Phasen (DIN EN ISO 14040).....	11
Abbildung 5 Umsetzung der technologischen Transformation im Verkehrssektor.....	17
Abbildung 6 Vorgehensweise in der systematischen Literaturrecherche dieser Arbeit.....	20
Abbildung 7 Auswertung von Schlüsselbegriffen und Charakterisierungsmerkmalen in den 30 relevantesten Veröffentlichungen der Metastudie zum flugzeugbasierten Untersuchungsgegenstand.....	21
Abbildung 8 Zukunftspfade von Szenarien basierend auf Pfadabhängigkeiten, iterativer Problemlösung und Entscheidungsfindung (IPCC, 2018).....	24
Abbildung 9 Die generelle Methode der Szenarioanalyse in fünf Phasen (Kosow & Gaßner, 2008).....	25
Abbildung 10 Auswertung von Schlüsselbegriffen und Charakterisierungsmerkmalen in den 30 relevantesten Veröffentlichungen der Metastudie zur Forschungsmethode für zukunftsgerichtete LCA von Verkehrsmitteln. ....	29
Abbildung 11 Vier Phasen der Ökobilanz mit den zwei LCI-Erweiterungen (in Anlehnung an DIN EN ISO 14040).....	36
Abbildung 12 Methodischer Überblick und Einordnung der Bestandteile LCI, eLCI und pLCI im Framework.....	39
Abbildung 13 Überblick über die Systembausteine des Transformationsmodells. ....	46
Abbildung 14 Überblick über die Systembausteine des Zukunftsveränderungsmodells.....	50
Abbildung 15 Dreistufiger Ansatz zur Durchführung der ex-post Sachbilanz der standardisierten Ökobilanzierung.....	54
Abbildung 16 Systemfließbild eines Transport-Produktsystems und den Prozessen über den Lebensweg. ....	56
Abbildung 17 Modellstrukturierung in die kleinste Einheit der Prozessmodule im konventionellen Antriebssystem. ....	57
Abbildung 18 Übergeordnete Prozessstruktur im Transportmodell zur Integration und Verrechnung von Daten.....	62
Abbildung 19 Excel-basierte Verrechnung quantifizierter Flüsse zur Nachbildung eines konventionellen Fahrzeugs im parametrisierten Transportmodell.....	63
Abbildung 20 Vorgehensweise für die dreistufige Durchführung der ex-post Sachbilanz von konventionellen Verkehrsmitteln zur Entwicklung des Transportmodells.....	66
Abbildung 21 Dreistufiger Ansatz zur Durchführung der ex-ante Sachbilanz als Erweiterung der Ökobilanzierung.....	67

Abbildung 22 Verändertes Systemfließbild von vier Transport-Transformationslösungen als Produktsystem und den über den Lebensweg differenzierten Prozessen (blau: strukturelle Änderung, grau: strukturelle Übernahme).....	70
Abbildung 23 Excel-basierte Verrechnung quantifizierter Flüsse zur Nachbildung eines neuartigen Fahrzeugs im erweiterten Transformationsmodell. ....	76
Abbildung 24 Vorgehensweise für die dreistufige Durchführung der ex-ante Sachbilanz von neuartigen Verkehrsmitteln zur Entwicklung des Transformationsmodells.....	82
Abbildung 25 Dreistufiger Ansatz zur Durchführung der prospektiven Sachbilanz in neun iterativen Schritten.....	84
Abbildung 26 Kausalschleifendiagramm mit vereinfachtem Systemfließbild zur Kombination von Inventar-Parametern und externen Faktoren mit dem Sachbilanz-Modell (in Anlehnung an Cucurachi et al., 2022). ....	90
Abbildung 27 Schrittweise Anleitung zur Parameter-Modifizierung von Stufe zwei in vier Anwendungsbeispielen.....	97
Abbildung 28 Erweiterte Modellausbildung von drei Produktsystemen auf Basis eines Zukunftsszenarios zur Integration und Verrechnung von Daten in drei Zukunftsveränderungsmodellen. ....	102
Abbildung 29 Excel-basierte Verrechnung teilweise modifizierter und quantifizierter Flüsse zur Nachbildung einer zukunftsgerichteten TTS in zwei Zukunftsveränderungsmodellen. ....	103
Abbildung 30 Vorgehensweise zur Erstellung einer Szenario-Narrative (oben) und Visualisierung einer exemplarischen Szenario-Narrative für einen entfernten Zukunftszustand (unten).....	106
Abbildung 31 Vorgehensweise für die dreistufige Durchführung der prospektiven Sachbilanz in neun Schritten von zukunftsgerichteten Verkehrsmitteln zur Entwicklung der Zukunftsveränderungsmodelle. ....	109
Abbildung 32 Systemfließbild des konventionellen Flugzeugs und den Prozessen über den Lebensweg. ....	113
Abbildung 33 Veränderte zwei Systemfließbilder der elektrifizierten Flugzeuge HEA (oben) und FCEA (unten) mit den blau markierten veränderten und grau markierten gleichgebliebenen Prozessen über den Lebensweg.....	118
Abbildung 34 Kennzeichnung der Transformationstyp-Spezifizierungsmöglichkeiten für HEA und FCEA.....	123
Abbildung 35 Kausalschleifendiagramm mit vereinfachtem Systemfließbild zur Kombination von acht Inventar-Parametern und acht externen Faktoren mit dem Sachbilanz-Modell der HEA (oben) sowie von zehn Inventar-Parametern und acht externen Faktoren mit dem Sachbilanz-Modell der FCEA (unten) (in Anlehnung an Cucurachi et al., 2022). ....	127
Abbildung 36 Parametermodifikationsverzeichnis für die Szenarioentwicklungsprozess-Dokumentation der HEA. ....	132
Abbildung 37 Szenariotrichter für die Zukunftsszenarien KMF, WOC und FP der Flugzeuge CA, HEA bzw. FCEA. ....	132
Abbildung 38 Szenario-Narrative für die 2025 Entwicklungspfade des KMF Zukunftsszenarios. ....	134

---

---

Abbildung 39 Szenario-Narrativen für die 2050 Entwicklungspfade der WOC und FP Zukunftsszenarien. ....	134
Abbildung 40 Wirkungsabschätzungsprofile für den Personentransportvergleich zwischen CA, HEA und FCEA. ....	136
Abbildung 41 Interner Vergleich der Umweltwirkungen des Zukunftszustands gegenüber dem Referenzzustand. ....	137
Abbildung 42 Einfassung des neu entwickelten und angewendeten Frameworks in den übergeordneten Kontext. ....	177
Abbildung 43 Verringerung der globalen CO <sub>2</sub> -Emissionen im Jahr 2020 im Vergleich zu den Werten von 2019 aufgrund des COVID-19-Lockdowns (UNEP, 2020). ....	182

---

---

## Tabellenverzeichnis

---

Tabelle 1 Umweltwirkungsmechanismus der ausgewählten Wirkungspfade (in Anlehnung an Klöpffer & Grahl, 2014; Huijbregts et al., 2017). .....	13
Tabelle 2 Parameter Einfluss über den Fahrzeuglebensweg auf Umweltauswirkungen (insb. THG-Emissionen) (in Anlehnung an Hill et al., 2020).....	16
Tabelle 3 Massehauptgruppen von Fahrzeugen zur Aufteilung der Transportmasse nach funktionellen Aspekten (in Anlehnung an DIN 9020-1) und Zuordnung zur Ökobilanz. ....	44
Tabelle 4 Standard-Parameter für Verkehrsmittel zur Ausbildung des Transportmodells...45	45
Tabelle 5 Vergleichs-Parameter für Verkehrsmittel zur Gegenüberstellung der Vergleichstechnologie.....	47
Tabelle 6 Transformations-Parameter für Verkehrsmittel zur Ausbildung des Transformationsmodells. ....	48
Tabelle 7 Inventar-Parameter zur Ausbildung des Zukunftsveränderungsmodells. ....	52
Tabelle 8 Externe Faktoren für den übergeordneten Einfluss auf das Zukunftsveränderungsmodell. ....	52
Tabelle 9 Generischer Aufbau des Transportmodells auf Basis der Biosphärenflüsse eines Fahrzeugtransports. ....	56
Tabelle 10 Ausschnitt einer Datensatz-Fluss-Liste des Produktsystems zur Datenerhebung. ....	58
Tabelle 11 Datenerhebungsblatt für die Rohstoffflüsse der Prozessmodule im konventionellen Antriebssystem. ....	58
Tabelle 12 Datengenerierungstechniken zur Vervollständigung von fehlenden Daten für Transportprozesse. ....	60
Tabelle 13 Quantifiziertes und normiertes Gesamtflussinventar zur Bereitstellung der Transportfunktion. ....	64
Tabelle 14 Datengenerierungstechniken zur Vervollständigung von fehlenden Daten für die TTS. ....	73
Tabelle 15 Ausschnitt einer Datengenerierungsliste des neuartigen Fahrzeugs zur Einordnung beschaffter Daten. ....	74
Tabelle 16 Gesamtflussinventar zur Bereitstellung der Transportfunktion im Referenzzustand.....	77
Tabelle 17 Transformationstyp-Spezifikationsmöglichkeiten zur Kennzeichnung von TTS gegenüber CT in drei Veränderungslevel. ....	79
Tabelle 18 Parameterübertrag des LCI- bzw. eLCI-Modells zur Auswahl und Änderung von Inventar-Parametern. ....	88
Tabelle 19 Übergeordnete PESTEL-Faktorensammlung mit Einfluss auf die Änderung von Inventar-Parametern. ....	89
Tabelle 20 Einordnung des Modifikationszwecks von allen Inventar-Parametern in drei Parameterarten sowie deren Ursache und Folge. ....	93
Tabelle 21 Datenmodifikationstechniken zur zukunftsgerichteten Quantifizierung der Input- und Outputflüsse für konventionelle und neuartige Produktsysteme.....	95
Tabellenverzeichnis .....	xii

Tabelle 22 Flussmodifikation durch Inventar-Parameter anhand von Veränderungsmaßnahmen im Datensatz. ....	96
Tabelle 23 Zuordnung der Inventar-Parameter in der Parameter-Bündel-Liste als Sammlung für Zukunftsszenarien. ....	99
Tabelle 24 Konsistenzmatrix als Konsistenzcheck von Schlüsselfaktoren zur Kombination von Zukunftsszenarien (in Anlehnung an Kosow & Gaßner, 2008).....	101
Tabelle 25 Prospektives Gesamtflussinventar zur Bereitstellung der Transportfunktion im Zukunftszustand.....	104
Tabelle 26 Datengenerierungsliste zur Nachbildung des konventionellen Flugzeugs über den Lebensweg. ....	114
Tabelle 27 Datenerhebungsblatt für die Lebensweg-Prozesse des CA zur Konventioneller Antrieb Herstellung. ....	115
Tabelle 28 Datengenerierungsliste zur Nachbildung der beiden neuartigen Flugzeuge über den Lebensweg.....	120
Tabelle 29 Signifikante Parameter der Flugzeugvarianten am prozessbezogenen Umweltwirkungsbeitrag für die Wirkungskategorien Klimawandel, Photochemische Ozonbildung und Mineralischer Ressourcenverbrauch.....	125
Tabelle 30 Einordnung des Modifikationszwecks für Inventar-Parameter der prädiktiven Zukunftsentwicklung.....	128
Tabelle 31 Ausbildung von Entwicklungspfaden für Inventar-Parameter der prädiktiven Zukunftsentwicklung.....	129
Tabelle 32 Zuordnung der Inventar-Parameter in der Parameter-Bündel-Liste für alle HEA Entwicklungspfade. ....	130
Tabelle 33 Konsistenzmatrix für Schlüsselfaktoren der HEA zur Kombination eines prädiktiven Zukunftsszenarios (in Anlehnung an Kosow & Gaßner, 2008).....	131
Tabelle 34 Signifikante Parameter von CA und HEA am prozessbezogenen Umweltwirkungsbeitrag im externen Vergleich des Szenarios KMF für die drei Wirkungskategorien im Zukunftszustand.....	138
Tabelle 35 Externer Vergleich zu Umweltwirkungen von HEA und FCEA im Zukunftszustand gegenüber dem CA im gleichen Marktetablierungsjahr und Benchmarking zu der im Markt befindlichen realen Beechcraft 1900D. ....	139
Tabelle 36 Datenqualitätsbewertung der Sachbilanz-Modelle anhand der unsicherheitsfaktorenbasierten Pedigree-Matrix (in Anlehnung an Ciroth et al., 2016). ....	143
Tabelle 37 Unsicherheitsberechnung der Sachbilanz-Daten für die retrospektive und prospektive LCA. ....	144
Tabelle 38 Einordnung in sektorale Klimaziele (§ 4 Anlage 1-3, KSG, 2019) und Benchmarking zur Klimawirkung. ....	145
Tabelle 39 Einordnung in nationale Nachhaltigkeitsziele (Die Bundesregierung, 2021) und Benchmarking zu den Umweltwirkungen. ....	147

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

AP	Advance-Parameter
BAU	Business-as-usual
CA	konventionelles Flugzeug (conventional aircraft)
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
COP	Vertragsstaatenkonferenz (conference of parties)
CT	konventioneller Transport (conventional transportation)
eLCI	ex-ante Sachbilanz (ex-ante life cycle inventory analysis)
EP	Emerging-Parameter
EXP	explorativer Szenariotyp (explorative scenario type)
FCEA	brennstoffzellenelektrisches Flugzeug (fuel cell electrical aircraft)
FP	Fast progress Szenario
FU	funktionelle Einheit (functional unit)
FUT	Zukunftszustand (future state)
GFK	glasfaserverstärkter Kunststoff
GWP	Treibhauspotenzial (global warming potential)
HEA	hybridelektrisches Flugzeug (hybrid electrical aircraft)
IP	Incumbent-Parameter
KMF	Keep moving forward Szenario
LCA	Ökobilanzierung (life cycle assessment)
LCI	ex-post Sachbilanz (life cycle inventory analysis)
LH <sub>2</sub>	Flüssigwasserstoff (liquid hydrogen)
LTO	Start- und Landezyklus (landing and take-off cycle)
NMC	Nickel-Mangan-Kobalt
NOR	normativer Szenariotyp (normative scenario type)
NO <sub>x</sub>	Stickoxide
OP	Overall-Parameter
PESTEL	politisch, wirtschaftlich, soziokulturell, technologisch, ökologisch, gesetzlich
pkm	Personenkilometer
pLCA	prospektive Ökobilanzierung (prospective life cycle assessment)
pLCI	prospektive Sachbilanz (prospective life cycle inventory analysis)
PRE	prädiktiver Szenariotyp (predictive scenario type)
REF	Referenzzustand (reference state)
SDG	Nachhaltigkeitsziel (sustainable development goal)
THG	Treibhausgas

---

tkm	Tonnenkilometer
TRL	Technologiereifegrad (technological readiness level)
TTS	Transport-Transformationslösung (transport transformation solution)
TtW	Tank-to-Wheel bzw. Tank-to-Wake
UP	Upscaling-Parameter
WOC	Wind of change Szenario
WtT	Well-to-Tank

## **1.1 Motivation**

In der Mitte der zweitausendzwanziger Jahre steht die globale Staatengemeinschaft vor Herausforderungen, die mit größter Anstrengung und bestem Kenntnisstand zu meistern sind sowie weitreichende technologische Veränderungen und gesellschaftliche Anpassungen benötigen. Aus dieser Verantwortung heraus möchte diese wissenschaftliche Arbeit einen Beitrag zur globalen Lösungsfindung leisten.

Verschiedene Problemfelder existieren, die simultan angegangen werden müssen und unter denen Zielkonflikte bestehen. Allgegenwärtig ist der Klimawandel, ausgelöst durch die begrenzte Aufnahmefähigkeit der Atmosphäre für Treibhausgase (THG) (IPCC, 2021) und resultierend in weitreichenden Maßnahmen aller Wirtschaftssektoren für die notwendigen Emissionsreduktionen. Zudem besteht ein hoher Ressourcenverbrauch strategisch relevanter Rohstoffe, welcher aus der Endlichkeit und ihrer ansteigenden Nutzungsintensität für Konsumgüter und Versorgungsgüter wie Windkraftanlagen resultiert (EU COM, 2020), für die Strategien zu einer nachhaltigen, kreislauffähigen Nutzung natürlicher Ressourcen auszubilden sind. Die durch COVID-19 ausgelöste globale Pandemie zeigt in Folge der hohen Gesundheitsgefährdung, dass basierend auf direkter Gefahr der menschlichen Gesundheit umgehend Maßnahmen mit stringenter politischer Regulierung in allen Bereichen umgesetzt werden können (UNEP, 2020), um zum Schutz der Humangesundheit Wirtschaftstätigkeiten und das gesellschaftliche Leben zu beschränken. Dies demonstriert, dass ein zielgerichtetes Eingreifen fernab von etablierten Pfaden direkte Erfolge zur Krisenbewältigung ermöglicht. Diese Forschungsarbeit möchte im Hinblick auf die drei Wirkungsbereiche Klimawandel, Rohstoffnutzung und Humangesundheit eine Entscheidungsunterstützung bereitstellen, um ein unmittelbares Umdenken und Handeln zu forcieren.

Der gewünschte Zielzustand ist die Verringerung und Vermeidung dieser Auswirkungen, um anthropogene Aktivitäten künftig ganzheitlich in Einklang mit dem Schutz der Natur sowie des Menschen zu bringen und gleichzeitig die Erfüllung menschlicher Grundbedürfnisse wie der Mobilität zu gewährleisten. Mit der Transformation des Verkehrssektors hin zu einer nachhaltigen Mobilität unter Berücksichtigung dieser drei Verbesserungsbereiche der ökologischen Nachhaltigkeit wird sich im Verlauf der Arbeit detailliert auseinandergesetzt.

## **1.2 Ausgangslage**

Zur Festlegung übergeordneter Rahmenbedingungen der Arbeit ist die globale Klimapolitik im Kontext der nachhaltigen Entwicklung sowie deren Zielsetzung darzulegen, um daraufhin umweltpolitische Ziele auf nationaler Ebene für den Verkehrssektor herauszuarbeiten.

### **1.2.1 Umweltpolitische Zielsetzungen**

Die in den 1970er Jahren begonnene Nachhaltigkeitsbewegung mit der Veröffentlichung *Die Grenzen des Wachstums* mündete 1979 in der ersten Weltklimakonferenz als Beginn einer anhaltenden Auseinandersetzung mit den Folgen des Klimawandels. Unter Einbezug des



---

Weltklimarates Intergovernmental Panel on Climate Change und dem ersten veröffentlichten Sachstandsbericht gründete sich die UN Klimarahmenkonvention als Umweltabkommen zur globalen vertraglichen Festlegung des Klimaschutzes. Die im darauffolgenden Jahr 1995 startende jährliche Vertragsstaatenkonferenz (COP, conference of parties) zur Verhandlung über den Klimaschutz legte innerhalb 20 Jahre den Grundstein für drei global geschlossene und verpflichtende Abkommen. Meilensteine waren die COP 3 in Kyoto und die COP 21 in Paris, bei denen Emissionsverpflichtungen der Mitgliedsstaaten im Kyoto-Protokoll (1. Verpflichtungsperiode 2008 – 2012, 2. Verpflichtungsperiode 2012 – 2020) und im Abkommen von Paris festgelegt wurden. (Simonis, 2017)

Das 2016 in Kraft getretene Pariser Klimaschutzabkommen beinhaltet den verbindlichen Beschluss, die Erderwärmung auf weniger als zwei Grad Celsius zu begrenzen unter Anstrengung einer Beschränkung auf 1,5°C (United Nations, 2015). Um in der zweiten Hälfte des Jahrhunderts THG-Neutralität zu erreichen, müssen die Emissionen bis spätestens 2050 auf Netto-Null (inklusive der Nutzung möglicher Senken) zur Begrenzung der Konzentration langlebiger THG in der Atmosphäre sinken, sodass der zunehmende Strahlungsantrieb des Treibhausgaseffekts verringert werden kann (IPCC, 2018). Das im Abkommen verankerte Klimaziel gliedert sich in die Nachhaltigkeitsziele (SDG, sustainable development goal) der UN ein, die im selben Jahr in Kraft traten. Mit dem Aktionsprogramm Agenda 2030 entstand ein Maßnahmenpaket von 17 übergeordneten Zielen, das allen Mitgliedsstaaten ein Vorgehen zur nachhaltigen Entwicklung bis 2030 aufzeigen soll. Im Nachhaltigkeitspostulat sind die Zielformulierungen „Ein gesundes Leben für alle Menschen jeden Alters gewährleisten und ihr Wohlergehen fördern“ (SDG 3), „Nachhaltige Konsum- und Produktionsmuster sicherstellen“ (SDG 12), „Umgehend Maßnahmen zur Bekämpfung des Klimawandels und seiner Auswirkungen ergreifen“ (SDG 13) (Die Bundesregierung, 2021) enthalten, auf die sich die drei Wirkungsbereiche der Arbeit beziehen.

Aus den Vorgaben der globalen Umweltpolitik werden nationale Zielsetzungen abgeleitet und auf messbare Zielwerte konkretisiert, um Leitstrategien für die kommenden Jahrzehnte auszubilden, die für den Zielzustand einer nachhaltigen Mobilität erreicht werden müssen.

Die sektorenspezifische Zielsetzung des Klimaschutzes zur Erfüllung des Übereinkommens von Paris ist im Bundes-Klimaschutzgesetz verankert. THG setzen sich aus den chemischen Verbindungen Kohlendioxid, Methan, Distickstoffoxid und fluorierte Kohlenwasserstoffe zusammen. Für den deutschen Verkehrssektor (Transport: ziviler inländischer Luftverkehr, Straßenverkehr, Schienenverkehr, inländischer Schiffsverkehr) wird gegenüber 1990 48% THG-Minderung bis 2030 und 88% THG-Minderung bis 2040 festgelegt (§ 4 Anlage 1-3, KSG, 2019). Um die lokale Gesundheitsbelastung der Bevölkerung zu verbessern, müssen die Luftschadstoffe der Verkehrsmittel für eine nachhaltige Mobilität verringert werden. Zu den Luftschadstoffen zählen Schwefeldioxid, Stickstoffoxid, Ammoniak, flüchtige organische Verbindungen und Feinstaub. Für die Zielwerte von Stickoxiden (NO<sub>x</sub>), welche für den Verkehrssektor von großer Bedeutung sind, gilt im Bundes-Immissionsschutzgesetz seit 2020 eine 39% NO<sub>x</sub>-Minderung und ab 2030 eine 65% NO<sub>x</sub>-Minderung, ausgenommen sind Emissionen von Flugzeugen außerhalb des Start- und Landezyklus (LTO, landing and take-off cycle) (§ 2 Absatz 1, Absatz 2, 43. BImSchV, 2018). Zur nachhaltigen Mobilität ist zudem der Ressourceneinsatz relevant, wobei als natürliche Ressourcen Rohstoffe, Energie, Wasser, Luft, Fläche/Boden, Biodiversität und Ökosystemleistungen gelten (Schebek et al., 2021), diese Arbeit fokussiert auf die Kategorie Rohstoffe. Der Weltressourcenrat International

---

Resource Panel zeigt eine Verbindung der natürlichen Ressourcen zu den meisten Nachhaltigkeitszielen auf. Für eine nachhaltige Transformation ist die Entkopplung der Ressourcennutzung von wirtschaftlichen Aktivitäten eine wichtige Voraussetzung, da sich der Rohstoffbedarf in den letzten 50 Jahren mehr als verdreifacht hat und die Rohstoffextraktion und Verarbeitung der Materialien (cradle-to-gate) für ca. die Hälfte der THG-Emissionen verantwortlich ist (IRP, 2019). Konkrete Zielvorgaben für den Ressourceneinsatz und die Effizienzsteigerung existieren jedoch nicht.

## 1.2.2 Umweltleistung des Verkehrssektors

Aus den umweltpolitischen Zielvorgaben auf globaler und nationaler Ebene ergibt sich, dass eine nachhaltige, langfristig zukunftsfähige Mobilität erreichbar ist, wenn im Verkehrssektor diese drei Umweltherausforderungen berücksichtigt und problemlösende Alternativen bereitgestellt werden. Als erster Überblick wird die aktuelle Lage im deutschen Verkehrssektor dargestellt.

Je nach Funktionserfüllung des Transports werden Umweltwirkungen dem Transport von einer Person über einen Kilometer als ein Personenkilometer (pkm) oder von einer Tonne Güter über einen Kilometer als ein Tonnenkilometer (tkm) zugerechnet. Der größte Anteil der Umweltwirkungen lässt sich auf die Nutzenphase zurückführen basierend auf den Well-to-Tank (WtT) Emissionen der Energiebereitstellung und den Tank-to-Wheel bzw. Tank-to-Wake (TtW) Emissionen der Energieverwendung während dem Transport im Fahrzeug. Die Entwicklung des Verkehrssektors zu mehr Klimaschutz zeigte in den letzten 30 Jahren keinen Fortschritt, der Jahresemissionswert von 164 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq in 2019 vor Corona liegt knapp über dem Ausgangswert von 1990. Während die spezifischen Emissionen, basierend auf dem Kraftstoffverbrauch pro Kilometer, u.a. durch Effizienzsteigerungen am Motor reduziert werden konnten, ist die Fahrleistung, gemessen als von Verkehrsmitteln pro Jahr zurückgelegte Gesamtstrecke, stetig gestiegen. Als Resultat eines Anteils von 94,1% fossiler Mineralöle an eingesetzten Energieträgern für den Transport werden bislang im deutschen Verkehrssektor keine Klimaverbesserungen erreicht, auf den 20% Treibhausgasemissionen aller Sektoren entfallen und auf Pkw (58,7%), Lkw sowie Nutzfahrzeuge (35,1%) und den nationalen Luftverkehr (1,2%) als die drei größten Verursacher direkter THG-Emissionen zurückführbar ist (BMU, 2020). Unter Berücksichtigung der Jahresfahrleistungen und der spezifischen Emissionen aller dem deutschen Verkehrssektor zugehörigen Verkehrsmittel zeigen Luftschadstoffe eine positive Entwicklung der letzten Jahre auf, indem bis COVID-19 von 2005 bis 2018 NO<sub>x</sub>-Reduktionen von ca. 41% im Verkehrssektor erreicht worden sind (UBA, 2019). Der übergeordnete Zielwert bis 2030 von 39% weniger NO<sub>x</sub>-Emissionen konnte im Verkehrssektor bereits erreicht werden. Wird das sektorenspezifische Ziel von 65% NO<sub>x</sub>-Reduktion ab 2030 dem Status Quo des Verkehrssektors gegenübergestellt, ergibt sich zur Zielerreichung die Notwendigkeit nach deutlichen Veränderungen.

Der akute Handlungsbedarf, basierend auf dem fehlenden Fortschritt in Richtung Klimaziele und den die Zielwerte überschreitenden lokalen Schadstoffemissionen muss auch bezüglich des Rohstoffeinsatzes überprüft werden. Ohne konkrete Zielvorgaben lassen sich zwar keine distance-to-target Aussagen formulieren, der Rohstoffbedarf des Verkehrssektors kann jedoch in Verhältnis zu anderen Sektoren gesetzt werden. In den Umweltökonomischen Gesamtrechnungen des Statistischen Bundesamtes werden die Rohstoffeinsätze nach

---

Gütergruppen aufgeführt. Für den Gesamtrohstoffeinsatz in Deutschland zwischen 2010 und 2016 ist der Einsatz von metallischen Rohstoffen um 30% zurückgegangen. Innerhalb der Gütergruppe Fahrzeuge, bestehend aus Kraftwagen, Kraftwagenteilen und sonstigen Fahrzeugen, konnte dagegen nur eine Reduktion von ca. 11% des Rohstoffeinsatzes erreicht werden. Es werden in dieser Gruppe zudem die größten Anteile am Gesamtrohstoffeinsatz der metallischen Rohstoffe ersichtlich. Während im Jahr 2010 das Verhältnis von allen produzierten Fahrzeugen zu den insgesamt verwendeten massebezogenen metallischen Rohstoffäquivalenten in Deutschland bei ca. 30% lag, erhöhte sich im Jahr 2016 dieser Rohstoffeinsatz auf ca. 38% (Destatis, 2020). Der Rohstofffußabdruck für die in Deutschland produzierten Fahrzeuge liegt demnach im Bereich der metallischen Rohstoffnutzung deutlich über dem von anderen Sektoren, eine Steigerung der Rohstoffeffizienz lässt sich für den Industriezweig der Fahrzeugherstellung aufgrund höherer Fahrzeugmasse auch innerhalb der letzten Jahre nicht feststellen. In einer Lebenswegbetrachtung der Verkehrsmittel können noch weitaus größere Diskrepanzen bei der Erreichung des Ziels zur Verringerung der Ressourcennutzung hervorgebracht werden, die in dieser Arbeit detailliert untersucht werden sollen.

Laut einer Studie des Umweltbundesamts entfielen im Jahr 2017 spezifische Emissionen der lebenswegbezogenen Klimawirkung für den Personentransport von 194 g CO<sub>2</sub>-eq/pkm auf Pkw und 210 g CO<sub>2</sub>-eq/pkm auf nationale Flüge, für den Gütertransport entstanden 106 g CO<sub>2</sub>-eq/tkm für Last- und Sattelzüge der Größenklasse 34-40 t und 2.020 g CO<sub>2</sub>-eq/tkm für den nationalen Flugverkehr. Die besten Resultate im Vergleich der Verkehrsmittel erreichen das Fahrrad mit 10 g CO<sub>2</sub>-eq/pkm und der Schienengüterverkehr mit 33 g CO<sub>2</sub>-eq/tkm bzw. der Schienenfernverkehr mit 46 g CO<sub>2</sub>-eq/pkm. Der aktuelle Stand der Humangesundheit ergibt für die lokalen Luftschadstoffe ein korrelierendes Bild zu den THG. Die aus den Stickoxidemissionen resultierenden Umweltwirkungen sind ebenfalls bei Pkw sowie dem nationalen Flugverkehr am höchsten und lassen sich größtenteils auf die Nutzenphase zurückführen. Im Personenverkehr entstehen für Pkw 0,5 g NO<sub>x</sub>-eq/pkm und für Flugzeuge im nationalen Bereich 1,0 g NO<sub>x</sub>-eq/pkm, während im Güterverkehr für Lkw von 34-40 t 0,2 g NO<sub>x</sub>-eq/tkm und für nationale Flüge 9,9 g NO<sub>x</sub>-eq/tkm emittiert werden. Es entstehen für den Fahrradtransport 0,02 g NO<sub>x</sub>-eq/pkm, für den Schienengüterverkehr 0,06 g NO<sub>x</sub>-eq/tkm und für den Schienenfernverkehr 0,6 g NO<sub>x</sub>-eq/pkm. Dagegen sind für die Rohstoffnutzung andere Verhältnisse aufgezeigt, die in der Studie mit der Bewertung der Ressourceneffizienz erfolgt und im Indikator Kumulierter Rohstoffaufwand der Einheit KRA angegeben werden, der in Bezug zum Nutzen alle metallischen Rohstoffe als abgebaute Erzmengen aufsummiert ohne die Gewichtung von Rohstoffverfügbarkeiten. Für den Personentransport entstehen im nationalen Flugtransport 0,5 g KRA/pkm, im Fahrrad 5 g KRA/pkm, im Schienenfernverkehr 26 g KRA/pkm und im Pkw 51 g KRA/pkm, während für den Gütertransport im nationalen Flugverkehr 5 g KRA/tkm, im Lkw von 34-40 t 19 g KRA/tkm und im Schienengüterverkehr 20 g KRA/tkm an Umweltauswirkungen erzeugt werden. (UBA, 2020)

Demnach zeigt der nationale Flugtransport für die emissionsbasierten Wirkungen der beiden Bereiche Klimawandel und Humangesundheit im aktuellen Zustand die höchsten Auswirkungen und für die materialbasierte Wirkung im Bereich Rohstoffnutzung die geringsten Umweltauswirkungen gegenüber allen anderen Verkehrsmitteln. Flugbasierte Mobilität besitzt folglich einen hohen Bedarf zur Verbesserung der Umweltleistung und ist in dieser Arbeit als Untersuchungsgegenstand weiterführend zu betrachten.

### 1.3 Untersuchungsgegenstand und Forschungsziel

Aus der dargestellten umweltbezogen sehr schwierigen Lage des Verkehrssektors im Hinblick auf die ehrgeizigen umweltpolitischen Zielsetzungen wird nun das Forschungsbestreben dieser Arbeit herausgebildet.

#### 1.3.1 Transformation des Verkehrssektors

Der aktuelle Stand der Umweltleistung des Verkehrssektors in den drei Wirkungsbereichen Klima, Gesundheit und Ressourcen demonstriert in Bezug auf die jeweilige Zielsetzung einen notwendigen Handlungsbedarf. Die Umweltauswirkungen des deutschen Verkehrssektors in der Ausgangslage verlaufen am Konträrsten für die anvisierten THG-Emissionsreduktionen. Um insbesondere nationale und globale Klimaziele zu erreichen und hohe Emissionen durch den Einsatz fossiler Energieträger zu reduzieren, ist ein Übergang zu einem Transportsystem basierend auf dem Einsatz erneuerbarer Energieträger notwendig zur Reduktion größtenteils während dem Betrieb anfallender Klimagase. Für den Zweck werden für alle Mobilitätsarten neuartige Verkehrsmittelalternativen auf Basis von regenerativen Energien entworfen und entwickelt. Zur Transformation des Verkehrssektors existieren zahlreiche Möglichkeiten, für die frühzeitig Potenziale und unbeabsichtigte Nebeneffekte aufzudecken sind, um bereits im Entwicklungsprozess die vielversprechendste Alternative zu evaluieren. Wie in Abbildung 1 ersichtlich ist, werden kreative Lösungen gesucht, allerdings kann nicht jedes Konzept zur Elektrifizierung technisch umgesetzt werden. Daher ist erst die technologische Machbarkeit der Verkehrsmittel zu bestätigen, bevor sie als Untersuchungsgegenstand hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen auf die Wirkungsbereiche analysiert und bewertet werden können.

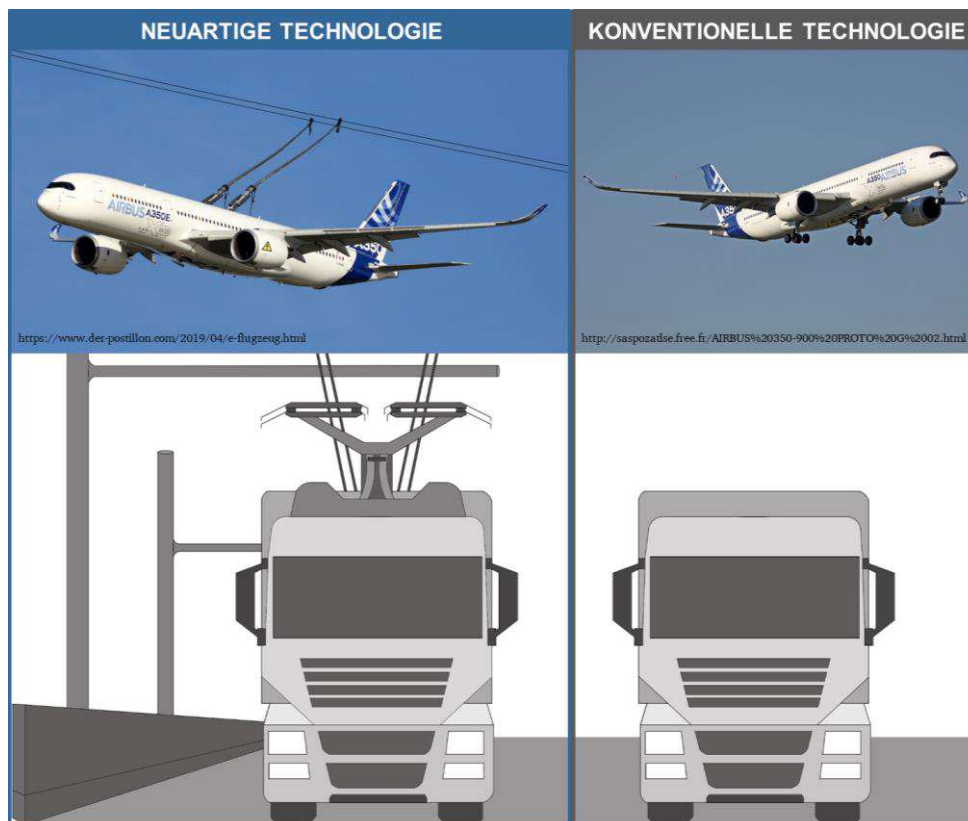


Abbildung 1 Dekarbonisierungsmöglichkeiten im Verkehrssektor als Untersuchungsgegenstand.

Um zunächst die technische Machbarkeit der neuartigen Verkehrsmittel zu überprüfen, lässt sich die Einordnungstabelle der NASA zur Bestimmung des Technologiereifegrades (TRL, technological readiness level) aus Abbildung 2 nutzen. Die technologische Entwicklung wird in die Phasen Labormaßstab bis TRL 3, Pilotmaßstab TRL 4-7 und Marktmaßstab TRL 8-9 unterteilt, zusätzlich wird mit der Marktetablierung nach TRL 9 der industrielle Maßstab erreicht. Nach der erfolgreichen Laborentwicklung kann bereits vor der Markteinführung ab TRL 3 die Umsetzbarkeit nachgewiesen werden, die in fortlaufenden Pilotversuchen überprüft werden muss, bevor die Technologie Marktreife erlangt und kommerziell verbreitet wird. Der Zustand der technologischen Machbarkeit wird folglich in TRL Stufe 3 erreicht, in der analytische Untersuchungen zur Feststellung des „proof-of-concept“ durchgeführt werden, woraus bestätigt wird, dass eine Technologie realisierbar, einsatzbereit und befähigt ist, den Entwicklungsprozess weiter zu durchlaufen (NASA, 2012).

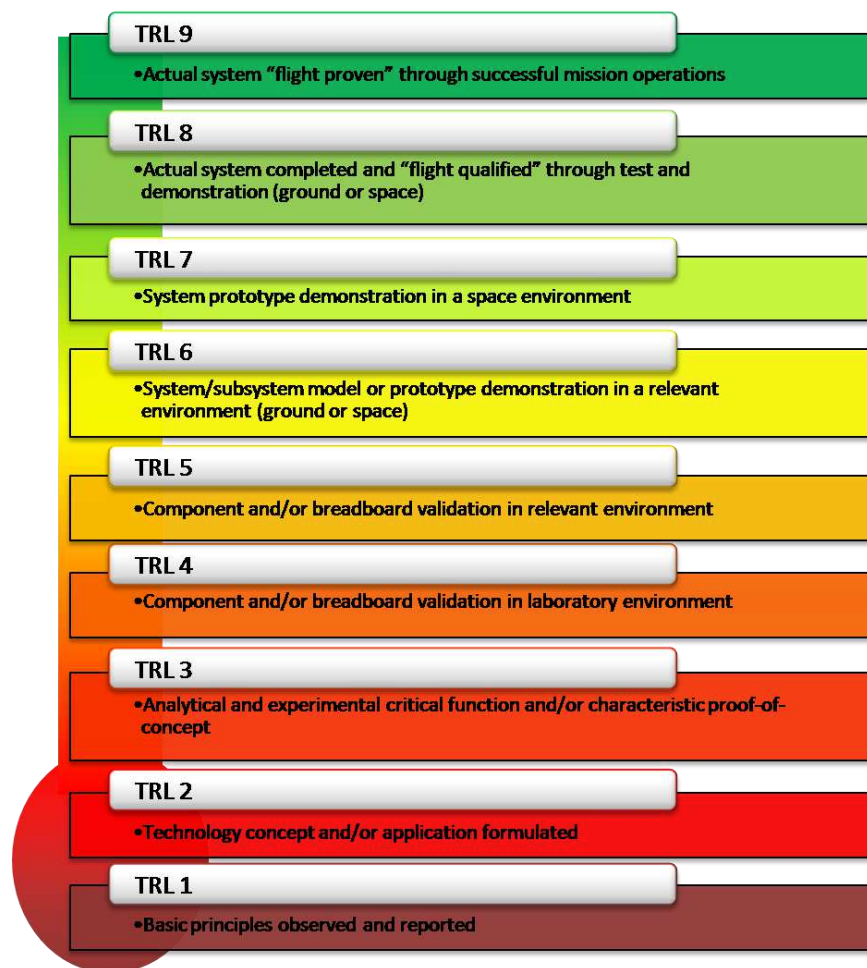


Abbildung 2 Standardisiertes Messsystem zur Reifegradbewertung einer neuartigen Technologie (NASA, 2012).

Ab diesem Zustand kann auch die neuartige Technologie hinsichtlich der Umweltleistung untersucht werden. Um die im Entwicklungsprozess befindliche Technologie nachzubilden, treten Herausforderungen wie die Datenverfügbarkeit auf. Zusätzlich erfordert der noch ausstehende Markteintritt die zukunftsgerichtete Bewertung, für die Zukunftsentwicklungen berücksichtigt werden müssen. Daher müssen zu einem aussagekräftigen Vergleich mit



---

konventionellen Technologien und der Bewertung zukünftiger Umweltauswirkungen im Rahmen von Szenario-basierten Zukunftszuständen marktreife Technologien nachgebildet werden. Folglich müssen mit dem Erreichen von der Entwicklungsstufe der technischen Machbarkeit der neuartigen Technologie diese in einem nächsten Schritt untersucht und ausgewertet werden, um die Umweltauswirkungen der in Entwicklung befindlichen Technologie in Bezug zu bisherigen Transportsystemen zu setzen und mögliche Folgen in den Wirkungsbereichen Klima, Gesundheit und Ressourcen abschätzen zu können. Die Arbeit möchte an dieser Schnittstelle einen methodischen Ansatz zur Nachbildung für die Umweltbewertung ausarbeiten, welche die Technologieentwicklung berücksichtigt und die Zukunftsentwicklung integriert, um die Erreichung von Klima- und Nachhaltigkeitszielen zu adressieren. Zunächst wird das Untersuchungsvorhaben konkretisiert, um nachfolgend die Forschungsfrage zu formulieren.

### 1.3.2 Forschungsgegenstand der Arbeit

Für den Forschungsgegenstand dieser Arbeit müssen neuartige Technologien entwickelt sein, welche bereits die Stufe der technischen Machbarkeit (TRL 3) erlangt haben. An dieser Stelle setzt die Methode zur Technologienachbildung für eine Umweltbewertung in dieser Arbeit an. Aus der Transformation des Verkehrssektors bildet sich der neue Begriff einer Transport-Transformationslösung (TTS, transport transformation solution). Als Begriffsbasis der Transformation in dieser Arbeit wird das Gutachten *Welt im Wandel - Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation* zugrunde gelegt mit der Definition „Die weltweite Veränderung von Wirtschaft und Gesellschaft in Richtung Nachhaltigkeit“ (WBGU, 2011). In Abgrenzung zu dieser Definition für eine Große Transformation wird in dieser Forschungsarbeit im Rahmen von einer Kleinen Transformation der Begriff einer Transformationslösung auf Technologien und im Speziellen auf neuartige Technologien im Verkehrssektor als Ersatz zu konventionellen Technologien heruntergebrochen. Von einer Transformationslösung im Verkehrssektor wird in dieser Arbeit gesprochen, sobald sich die neuartige Technologie von mindestens TRL 3 bezüglich ihrer Umweltauswirkungen untersuchen lässt, um diese abschließend mit der konventionellen Technologie und den Sektorenzielsetzungen in Bezug auf Nachhaltigkeit gegenüberzustellen.

Die Definition dieser Arbeit lautet:

Eine Transport-Transformationslösung ist eine in Entwicklung befindliche Technologie, welche die technische Machbarkeit erlangt hat und eine konventionelle Technologie im gleichen Einsatzfeld ersetzen kann, wobei das jeweilige Mobilitätsbedürfnis mithilfe der Nutzung von regenerativen Energien erfüllt wird. Es kann sich um eine oder mehrere Lösungen handeln, die als Maßnahme eine technologische Veränderung oder eine reine Substitution des Energieträgers beinhalten. Eine TTS ermöglicht es, von einem bisherigen Referenzzustand des Status Quo, der gesetzte Rahmenvorgaben zur nachhaltigen Mobilität nicht einhält, zu einem Zukunftszustand zu gelangen, in dem die gesetzten Anforderungen berücksichtigt und nun hinsichtlich der Erfüllung überprüft werden müssen. Hieraus kann eine Aussage hinsichtlich ihrer Distanz zum Zielzustand geliefert werden, in welchem die Anforderungen bezüglich einer nachhaltigen Mobilität erfüllt sind.

Die Methodik wird in dieser Forschungsarbeit inhaltlich durchgeführt, indem für den Zielzustand einer nachhaltigen Mobilität die entsprechenden Wirkungen hinsichtlich Klima,

---

Gesundheit und Ressourcen überprüft werden. Hieraus kann aufgezeigt werden, welche Potenziale für eine konkrete TTS zur Zielerreichung bestimmter Wirkungen existieren. Dies erfolgt in einem Transformationsprozess, der einen zeitlich festgelegten und schrittweise ablaufenden Übergangsprozess darstellt.

Die Umweltbewertung soll die Akteure der Transformation in der Entscheidung und Auswahl von Technologien sowie weiteren umzusetzenden Maßnahmen im Transformationsprozess unterstützen. Hierfür muss das Potenzial für verschiedene Transformationslösungen eines bestimmten Mobilitätsfeldes quantifiziert und mit der etablierten im Markt befindlichen Technologie verglichen werden. Das Vorgehen zur Ermittlung der Wirkungen für den Vergleich kann mit dem standardisierten Verfahren der Ökobilanzierung (LCA, life cycle assessment) anhand einer Modellierung und Bewertung von Umweltwirkungen über den Lebensweg einer Technologie durchgeführt werden (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044).

Es ergibt sich im Rahmen der Arbeit das Forschungsbestreben, mit dieser geeigneten LCA-Methode neuartige Transportsysteme zur Umweltbewertung nachzubilden, die technisch umsetzbar sind und konventionelle klimaschädliche Transportsysteme ersetzen können. Für die Nachbildung von neuartigen Systemen existieren jedoch Herausforderungen, da bei Technologien mit einem geringen TRL Probleme bei der Datenaufnahme und einem angemessenen Vergleich auftreten können. Zusätzlich muss der technologische und zeitliche Fortschritt in der zukunftsorientierten Nachbildung berücksichtigt werden, um die Modellierung und Bewertung von dem festgelegten Referenzzustand in einen möglichen Zukunftszustand umzusetzen, der bestenfalls zu vielfältigen Wirkungsverbesserungen führt. Für diese Untersuchung müssen Zukunftsszenarien ausgearbeitet und methodisch integriert werden, um den künftigen Zustand aufzuzeigen und somit den Vergleich zur marktreifen Technologie zu verbessern.

Folglich ist das Forschungsziel der Arbeit die folgende Fragestellung:

*Wie können in Entwicklung befindliche Transformationslösungen von Verkehrsmitteln zukunftsgerichtet für eine Umweltbewertung nachgebildet werden, um für den Verkehrssektor bereits jetzt einen Transformationsprozess zum Erreichen der Klima- und Nachhaltigkeitsziele aufzuzeigen?*

Die standardisierte Methode der Ökobilanzierung, auf die noch im Detail eingegangen wird, soll demnach für passgenauere Daten und Ergebnisse bezüglich der Technologieentwicklung und Zukunftsentwicklung erweitert werden, um einerseits neuartige Technologien und andererseits zukunftsgerichtete Technologien nachzubilden. In zwei differenzierten zeitlichen Zuständen soll die technologische und zeitliche Repräsentativität der LCA verbessert werden, um zielgerichteter bereits jetzt zur Entscheidungsunterstützung der kommenden Jahrzehnte beizutragen. Die Einordnung des neuen Forschungsbestrebens in den bisherigen Forschungsstand wird nachfolgend präzise dargelegt.

## 2.1 Forschung zum Untersuchungsgegenstand und existierende Methoden

Für den in der Einleitung dargestellten Gegenstand der Forschung soll im Verlauf strukturiert herausgearbeitet werden, wie der Stand der Wissenschaft in den einzelnen Bereichen des Forschungsbestrebens aussieht, aus denen sich die konkrete Forschungslücke entwickelt. Die Analyse des bisherigen Forschungsstandes gliedert sich in die inhaltlichen Bereiche zum Untersuchungsgegenstand von Verkehrsmitteln sowie deren technologische oder zukünftige Veränderung, zu den Methoden der Ökobilanzierung und der Szenarioanalyse sowie darauf aufbauend in die Analysresultate von zwei systematischen Metastudien.

### 2.1.1 Grundlagen zu Verkehrsmitteln

Transport verursacht negative Umweltauswirkungen wie den Verbrauch der natürlichen Ressourcen Rohstoffe und Energie, die zur Reduktion von Naturleistungen wie der Senkenfunktion von Emissionen führen (Hofmann et al., 2021). Verkehrsmittel können über ihren Lebensweg als hauptsächliche Auswirkungen in den Verbrauch von Rohstoffen in der Herstellungsphase und in den Verbrauch von Energieträgern zur Fortbewegung in der Nutzenphase differenziert werden, wie Abbildung 3 aufzeigt.

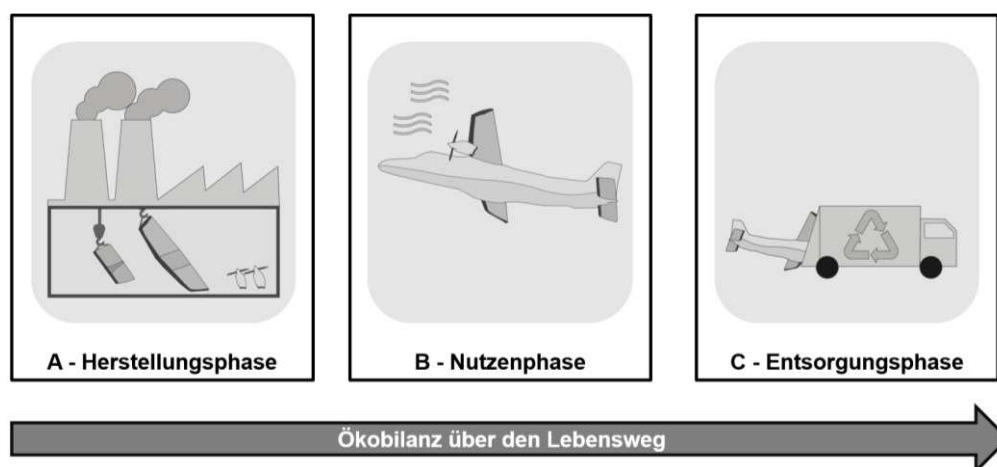


Abbildung 3 Vereinfachte Lebenswegbetrachtung von Verkehrsmitteln am Beispiel eines Kleinflugzeugs.

Zur Fahrzeugherstellung von konventionellem Transport (CT, conventional transportation) werden für die Funktionalität Rohstoffe der Eigenschaften leicht, stark, robust und dauerhaft benötigt. Aluminium gelangt durch geringes Gewicht in großer Menge in die Tragstruktur. Titan, mit noch höherer Dichte und Leistungsfähigkeit bei hohen Temperaturen, wird im Verbrennungsmotor verwendet zusammen mit Legierungen auf Nickel- und Kobaltbasis, die schwerer aber hitzebeständiger sind. Durch niedrige Kosten ist Stahl von geringerer Dichte und hoher Festigkeit im Einsatz. Gewichtsreduktion wird mit den Verbundwerkstoffen kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK) und glasfaserverstärkter Kunststoff (GFK) erzeugt, die unter hoher Fertigungsenergie eine Senkung des operativen Energieverbrauchs erreichen. Für CFK mit der Dichte von  $1,5 \text{ g/cm}^3$  kann an Gewichtsreduktion fast die Hälfte



---

gegenüber Aluminium mit 2,7 g/cm<sup>3</sup> und mehr als ein Fünftel gegenüber Stahl mit 7,9 g/cm<sup>3</sup> erzeugt werden. (Mouritz, 2012)

Die neuartige TTS auf Basis einer Elektrifizierung ändert sich im Fahrzeugaufbau zu einem Antrieb mit elektrischen Komponenten für einen vollelektrischen, hybridelektrischen oder turboelektrischen Betrieb. Erstere nutzen ausschließlich Energie aus einem Elektromotor, hybridelektrische Fahrzeuge verwenden eine Mischung aus Kraftstoff sowie elektrischer Energiespeicherung und die Antriebsleistung beider Motoren. Turboelektrische Fahrzeuge nutzen Kraftstoff zur Energiespeicherung, zudem sind Elektromotoren zum Antrieb des Fahrzeugs mit elektrischer Energieübertragung den Verbrennungsmotoren vorgeschaltet (Brelje & Martins, 2019). Durch die kleinere Dimensionierung und häufigere Auslastung am Maximalpunkt des Auslegungsbereiches wird eine größere Energieeffizienz zur Reduzierung des Verbrauchs in Kombination beider Motoren erreicht. Elektromotoren als Energiewandler werden alleine oder kombiniert mit Batterien als Energiespeicher und Brennstoffzellen als weitere Energiewandler integriert. Die durch hohe Wirkungsgrade und Leistungsdichten am häufigsten eingesetzte Permanenterregte Synchronmaschine enthält Permanentmagnete mit seltenen Erden auf Basis von Neodym und Dysprosium. Elektrochemische Energiespeicher, die Energie durch Laden speichern und durch Entladen abgeben sind z.B. Lithium-Ionen-Batterien. Sie zeigen die am Markt höchsten Energiedichten und Materialkombinationen wie den Typ Nickel-Mangan-Kobalt (NMC). Hierbei bestehen aktives Kathodenmaterial aus NMC und Lithium und aktives Anodenmaterial aus Graphit, zudem enthält der Elektrolyt Lithium (Accardo et al., 2021). Die zum Transport gängigste Polymer-Elektrolyt-Brennstoffzelle mit niedriger Betriebstemperatur und hoher Leistungsdichte umfasst Elektroden aus Graphit mit einem Katalysator aus Platin, welcher die elektrochemische Energieumwandlung aus Brennstoffen wie Wasserstoff beschleunigt (Kreyenberg, 2016). Der zusätzliche Tank für flüssigen oder gasförmigen Wasserstoff besteht aus Stahl, Aluminium, CFK oder Kunststoff und die weitere Leistungselektronik aus einem hohen Anteil an Kupfer.

Die fossilen Energieträger Benzin, Diesel, Gas und Kerosin können durch biobasierte oder synthetische Kraftstoffe teilweise substituiert oder vollkommen ersetzt werden. Biomasse der ersten bis dritten Generation (Ackerprodukte bis Altspeiseöle), strombasiert oder Wasserstoff dienen als Kraftstoffsubstitute im Verbrennungsmotor (Schröder & Naumann, 2022). Zudem kann Strom in Batterien und Wasserstoff in Brennstoffzellen eingesetzt werden. Aus den Energieträgern mit unterschiedlicher gravimetrischer und volumetrischer Energiedichte entstehen Restriktionen für Gewicht bzw. verfügbaren Raum in Fahrzeugen zur erzielbaren Reichweite. Bei Strom aus ausschließlich regenerativen Quellen wird im Elektrolyseprozess grüner Wasserstoff erzeugt, gelber Wasserstoff basiert auf Netzstrom und grauer Wasserstoff nutzt fossile Energien z.B. zur Methandampfreformierung (Ajanovic et al., 2022). Für flüssigen Wasserstoff ist zudem ein nachgelagerter Verflüssigungsprozess notwendig. Die eingesetzten Rohstoffe und Energie sind in der LCA weiter zu verwenden.

### **2.1.2 Grundlagen zur Methode der Ökobilanzierung**

Die Nachhaltigkeitsmethode der Ökobilanzierung wird in einer systematischen Analyse der Umweltwirkungen von Produkten und Dienstleistungen über den Lebensweg durchgeführt. Auf der SETAC Konferenz 1991 wurde der Begriff *Life Cycle Assessment* festgelegt, woraus sich die Normenserie 14040-14044 entwickelte (Ausberg et al., 2015). LCA untersucht die

Ursachen von Umweltproblemen mittels datengestützter Modelle und liefert für ökologische Folgen eine Entscheidungsunterstützung. Die Produkte bzw. Dienstleistungen werden über den Lebensweg bezogen auf den jeweiligen Nutzen nachgebildet, welcher die funktionelle Einheit (FU, functional unit) darstellt, um die u.a. aus Rohstoffen und Energie erzeugten Umweltwirkungen zu bewerten und zu vergleichen. Der Lebensweg umfasst die Ressourcenentnahme aus der Natur über verschiedene Verarbeitungsschritte in der Technosphäre bis zur Beanspruchung der Tragfähigkeit von der natürlichen Umwelt wie Abfallentsorgung oder Emissionen. Zur Anwendung der Methode der Ökobilanzierung sind Grundsätze und Rahmenbedingungen sowie Anforderungen und Anleitungen in der ISO Norm 14040/14044 festgelegt, die zur Durchführung und Berichterstattung in die vier Phasen Ziel und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung unterteilt ist. Über den Lebensweg eines Produktsystems, welches die Zusammenstellung von Prozessen, Parametern und Flüssen zur Funktionserfüllung darstellt, werden Inputs und Outputs aufbereitet und hinsichtlich der potenziellen Umweltwirkungen beurteilt, um zum Resultat der Ökobilanz zu gelangen. Die relativen Ergebnisse ermöglichen die vergleichende Bewertung innerhalb einer Technologie oder zwischen Technologien, wenn sie nach dem gleichen Ansatz modelliert werden und dieselbe Funktion bereitstellen. Daraus erhaltene Erkenntnisse können zur Entwicklung und Verbesserung von Technologien bezüglich deren Umweltleistung oder Entscheidungsträgern zur strategisch-politischen Beratung dienen. Der Rahmen einer Ökobilanz in vier Phasen, die sich in Abhängigkeit zueinander befinden und iterativ durchzuführen sind, sowie deren direkte Anwendungen werden in Abbildung 4 dargestellt. Die vollständige Vorgehensweise der standardisierten Ökobilanzierung kann der ISO Norm 14040/14044 im Detail entnommen werden, die wichtigsten Bestandteile jeder Phase werden nachfolgend erörtert. (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044)

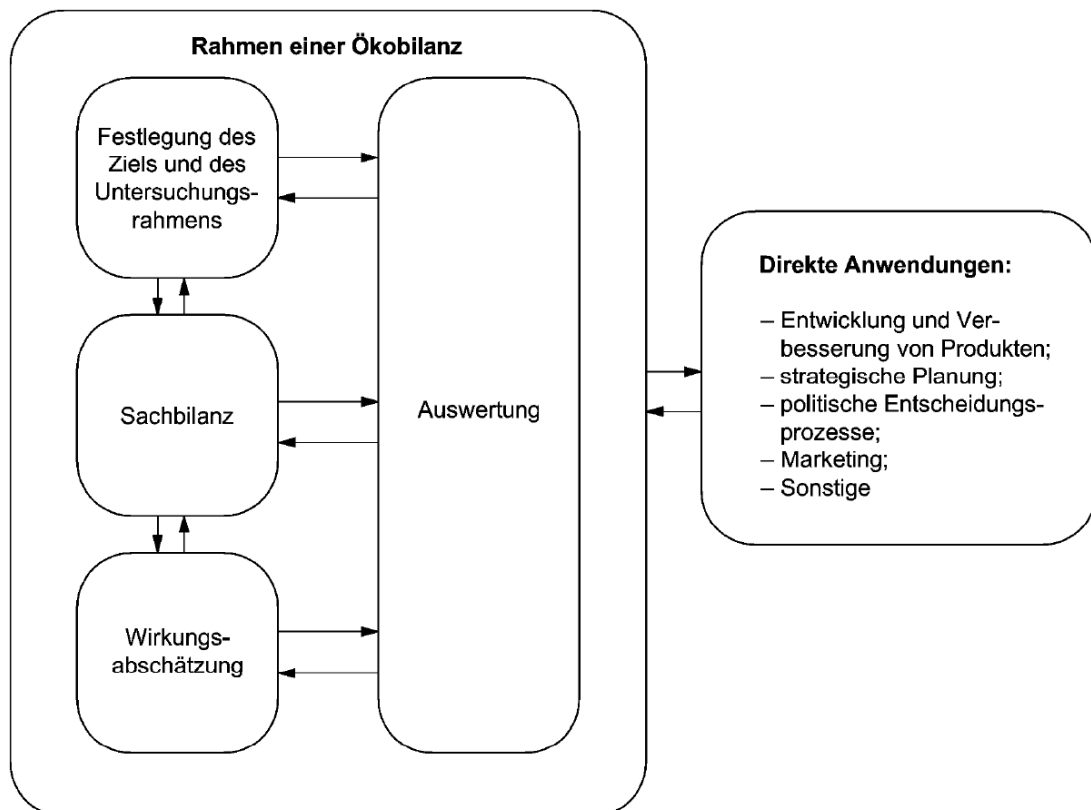


Abbildung 4 Die standardisierte Methode der Ökobilanzierung in vier Phasen (DIN EN ISO 14040).

---

Zur Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen werden Ziel und Anwendungsbereich der Studie definiert, die Funktion und funktionelle Einheit des Produktsystems bestimmt und die technologischen, geographischen und zeitlichen Systemgrenzen abgesteckt. Es müssen die Anforderungen an die Daten und ihre Qualität sowie der Modellierungsansatz angegeben werden. Gewählte Wirkungskategorien und verwendete Wirkungsabschätzungsmethoden für die zu erzeugenden Umweltwirkungsergebnisse sind unter Erläuterung des Wirkprinzips und Angabe der Referenzeinheit zu nennen. (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044)

Die Sachbilanz umfasst die Zusammenstellung der integrierten Prozesse im Produktsystem, die zur Quantifizierung von Input- und Outputdaten in Form von Prozessmodulen als kleinster berücksichtigter Bestandteil anzugeben sind. Daraufhin wird für Technologie und Systemumgebung die detaillierte Beschaffung von Daten umgesetzt, die als Produkt-, Stoff- oder Energiefluss einem Prozessmodul zugeführt oder von diesem abgegeben werden, unter Kenntlichmachung der Datenerhebungsverfahren. Abschließend erfolgt die Quantifizierung der Inputs und Outputs des Produktsystems über den Lebensweg. Die katalogisierten Flüsse, die als Elementarflüsse die Systemgrenze überschreiten, stellen das Ergebnis der Sachbilanz dar und dienen als Ausgangspunkt zur Wirkungsabschätzung. Das Ziel der zweiten Phase ist folglich die Erfassung aller relevanter Stoff- und Energieströme, die zur Bereitstellung der funktionellen Einheit erforderlich sind und mit der Umwelt als Systemgrenze in Beziehung stehen. (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044)

In der Wirkungsabschätzung werden die verrechneten Inputs und Outputs des Sachbilanz-Ergebnisses mit den daraus erzeugten Umweltwirkungsergebnissen gemäß der festgelegten Wirkungskategorien in einen funktionalen Zusammenhang gebracht. Es gelten im Ablauf verbindliche Bestandteile von Festlegung der Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen, der Klassifizierung mit einer Zuordnung der Sachbilanz-Ergebnisse und der Charakterisierung mit einer Berechnung der Wirkungsindikatorwerte. Zusätzlich können optionale Bestandteile wie die Normierung der Wirkungsindikatorwerte zu Referenzwerten, die Ordnung sowie die Gewichtung umgesetzt werden. Während die verbindlichen Bestandteile in dem Resultat von naturwissenschaftlich fundierten Wirkungsindikatorwerten münden, entstehen aus den optionalen Bestandteilen gewichtete Daten von den Wirkungsindikatorwerten, die naturwissenschaftlich nur bedingt begründbar sind (Klopffer & Grahl, 2014). (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044)

Für die Auswertung sind auf Grundlage der Sachbilanz und Wirkungsabschätzung sowie der festgelegten Zieldefinition verschiedene Schritte durchzuführen. Es müssen die signifikanten Parameter identifiziert werden, welche in den Umweltwirkungsergebnissen die größten Verursacher insgesamt, in einzelnen Lebensphasen oder Prozessen darstellen. Neben der Umweltrelevanz müssen die Resultate bezüglich Vollständigkeit, Sensitivität und Konsistenz beurteilt werden. Zudem können andere Studien zur Validierung herangezogen werden bzw. Einschränkungen der eigenen Untersuchung aufgezeigt werden. Abschließend werden Schlussfolgerungen aus der durchgeführten Ökobilanz abgeleitet und Empfehlungen zur Verwendung der Ergebnisse gegeben. Die Umsetzung der vier Phasen der LCA ist in einem Bericht zu dokumentieren. (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044)

Während die erste und vierte Phase der Festlegung und Beurteilung dienen und das Grundgerüst der Ökobilanz ausbilden, liefern die zweite und dritte Phase als konkrete Identifizierung alle Informationen über das Produktsystem anhand einer prozessbasierten, lebenswegbezogenen Untersuchung mit dem Ergebnis einer spezifischen Ökobilanz, die

mittels Schlussfolgerungen und Empfehlungen zur Entscheidungsunterstützung genutzt werden kann. Die Nachbildung und Bewertung von Produktsystemen finden folglich in den mittleren beiden Phasen des systematischen Vorgehens der ISO Norm statt.

Als Kerninhalte der Ökobilanzierung über den Lebensweg eines Produktsystems umfasst die Sachbilanz (LCI, life cycle inventory analysis) die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs. Auf diese lebenswegbezogene Nachbildung von etablierten Produktsystemen wird in Kapitel 3 und im Verlauf der Arbeit näher eingegangen. Im Nachgang zeigt die Wirkungsabschätzung hinsichtlich den potenziellen Umweltwirkungen eines Produktsystems ein Erkennen und Beurteilen von Größe und Bedeutung der Wirkungen. Zunächst wird eine von einer Wirkungsabschätzungsmethode bereitgestellte Wirkungskategorie, welche ein relevantes Umweltthema darstellt, im Rahmen der Klassifizierung den hierfür relevanten Sachbilanz-Ergebnissen zugeordnet. Daraufhin folgt die Charakterisierung, indem auf Basis eines Charakterisierungsmodells ein quantifizierter Wirkungsindikator erhalten wird, welcher das quantitative Ergebnis einer bestimmten Wirkungskategorie darstellt. Die Berechnung des Wirkungsindikatorwertes aus dem LCI-Ergebnis in die gemeinsame Einheit erfolgt mit dem aus dem Charakterisierungsmodell abgeleiteten Charakterisierungsfaktor. Jede Wirkungskategorie besitzt einen eigenen Umweltwirkungsmechanismus, welcher die Wirkungen im Gesamten charakterisiert und für die Dokumentation einer Ökobilanz angegeben werden muss. Für die ausgewählten drei Wirkungsbereiche dieser Arbeit ist der Umweltwirkungsmechanismus jeweils in Tabelle 1 dargestellt. Die Sammlung von Indikatorwerten für die ausgewählten Wirkungskategorien wird abschließend als Wirkungsabschätzungsprofil bezeichnet, welches potenzielle Umweltwirkungen wiedergibt. (DIN EN ISO 14040; DIN EN ISO 14044)

Tabelle 1 Umweltwirkungsmechanismus der ausgewählten Wirkungspfade (in Anlehnung an Klöpffer & Grahl, 2014; Huijbregts et al., 2017).

Bereich	Klima	Gesundheit	Ressourcen
Wirkungskategorie	Klimawandel	Photochemische Ozonbildung	Mineralischer Ressourcenverbrauch
Sachbilanz-Ergebnis	g THG/FU	g NO <sub>x</sub> /FU	g Material/FU
Charakterisierungsmodell	von IPCC	von van Zelm et al.	von Vieira et al.
Wirkungsindikator	Zunahme Infrarotstrahlungsantrieb	Zunahme stratosphärische Ozonaufnahme in Bevölkerung	Zunahme Fördermenge von Erzen
Charakterisierungsfaktor	Treibhauspotenzial (GWP)	Ozonbildungspotenzial (HOFP)	Zusätzliches Erzpotenzial (SOP)
Wirkungsindikatorwert	g CO <sub>2</sub> -eq	g NO <sub>x</sub> -eq	g Cu-eq
Wirkungsendpunkt	u.a. Korallenriffe	u.a. Atemwege	Ressourcenknappheit

Zur Modellierung der Umweltwirkungen kann als gängige Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe2016 identifiziert werden, die Input- bzw. Outputflüsse der LCI in 17 Midpoint- und drei Endpoint-Wirkungskategorien umwandelt (Huijbregts et al., 2017). Die Midpoint-

---

Wirkungskategorien geben wissenschaftlich fundierte Umweltwirkungen wieder, dagegen zeigen die Endpoint-Kategorien den Umweltschaden auf anschaulichere Weise auf. Für die meistbilanzierte Midpoint-Kategorie Klimawandel, welche die Wirkungen als Zunahme des Infrarotstrahlungsantriebs ermittelt, werden alle klimawirksamen Emissionen mit einem Berechnungsmodell des Intergovernmental Panel on Climate Change erzeugt, indem die durch industrielle Prozesse, Brennstoffumwandlung bzw. Brennstoffverbrennung auf Grundlage ihrer atmosphärischen Verweilzeit entstehenden THG-Emissionen gewichtet werden und die Summen der Emissionen als Treibhauspotenzial (GWP, global warming potential) beispielsweise für einen Zeithorizont von 100 Jahren als GWP100 berücksichtigt werden (IPCC, 2013, 2019). Diese Kategorie Klimawandel und die zwei weiteren Midpoint-Wirkungskategorien Photochemische Ozonbildung und Mineralischer Ressourcenverbrauch sind in der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe2016 enthalten. Das ILCD-Handbook ordnet unter Werthaltung die Wirkungskategorien, Modelle und Indikatoren zur Empfehlung ein, wonach die Kategorie Klimawandel die beste Bewertung und die Kategorie Photochemische Ozonbildung aus ReCiPe vor der Weiterentwicklung eine gute Bewertung erhält, dagegen zeigen die vielfältigen Modelle für die Ressourcennutzung noch Verbesserungsbedarf auf (JRC/EC, 2011). Zur Bewertung des Einsatzes von Ressourcen u.a. mit dem Resultat einer Ressourcenknappheit existieren daher unterschiedliche Ansätze, die alle noch nicht vollständig ausgereift sind, sodass die aus der Kategorie Mineralischer Ressourcenverbrauch erzeugten Umweltwirkungsergebnisse eine geringere Aussagekraft als die Ergebnisse für den Klimawandel haben. Mit der Nutzung von Ökobilanz-Software erfolgt nach Nachbildung des Produktsystems die Verrechnung im Wirkungspfad automatisch, in der unter Wahl der Wirkungsabschätzungsmethode quantifizierte Indikatorwerte entstehen.

Für die Umweltbewertung von Elektromobilität verwenden die meisten LCA-Studien die Wirkungsabschätzungsmethoden CML, ReCiPe oder Eco-Indicator 99 (Dolganova et al., 2020), wobei sich ReCiPe als Nachfolger von Eco-Indicator 99 und CML entwickelt hat. In der LCI erfolgt bislang für diese nachgelagerte Bewertung nur eine erschwerte Nachbildung neuartiger Technologien als Transport-Transformationslösungen, die zum Abschluss eine prospektive Ökobilanzierung (pLCA, prospective life cycle assessment) zur Berücksichtigung von Zukunftsentwicklungen beinhalten sollte. Explizit unterscheiden van der Giesen et al. die Begriffe *ex-ante* als eine LCA, die für Technologien vor kommerzieller Implementierung durchgeführt wird, sowie *prospektiv* als eine LCA in einer definierten Zukunft, die für alle Technologien oder auch nur für etablierte Technologien umgesetzt werden kann (2020). Zudem sind für LCA von Elektromobilität ökologische Trade-offs zwischen Materialien, Komponenten, Fahrzeugeigenschaften sowie spezifischen Faktoren im Einfluss auf jede Lebensphase für Elektrofahrzeuge komplexer zu identifizieren und zu analysieren, sodass die Interdependenzen zum Erhalt vergleichbarer Modelle eine umfassende Betrachtung des gesamten Fahrzeugs vom Ökobilanzierer erfordern, wenn der Schwerpunkt der LCA auf dem Gesamtfahrzeug liegt (Cerdas et al., 2017). Generelle Techniken zur Datenbeschaffung für neuartige Technologien sind Auffüllen von Datenlücken mit Stellvertreter-Methoden (Milà i Canals et al., 2011) oder die Verwendung von Datengenerierungstechniken (Parvatker & Eckelman, 2019). Weiterhin zeigen Zargar et al. einen ersten Überblick von prospektiven LCI-Datentechniken (2022). Jedoch fehlt die stringente Separation zwischen umfangreichen und vielfältig anwendbaren Techniken für fehlende Technologiedaten sowie Techniken für ungewisse Zukunftsdaten, um dem Bedarf nach unterschiedlichen Parameter-Techniken für nicht-modifizierte bzw. zukunftsveränderte Produktsysteme nachzukommen.



---

Das Produktsystem des spezifischen Fahrzeugtransports, entweder als etabliertes oder als neu entwickeltes Fahrzeug, ist als Vordergrundsystem zu verstehen. Als Hintergrundsystem sind die umgebenden vorgelagerten und nachgelagerten Rohstoff-, Energie- und weiteren Märkte definiert, um das Fahrzeug über den gesamten Lebensweg abzubilden. Für den Untersuchungsgegenstand der Fahrzeuge stellt die Funktion des Produktsystems die Transportleistung dar. Die in der Literatur am häufigsten identifizierten FU für Mobilität sind Personenkilometer, Tonnenkilometer, Fahrzeugkilometer oder Fahrzeuglebensdauer (Hill et al., 2020). Zur Nachbildung von Elektromobilität ist der Strommix im Hintergrundsystem von großer Relevanz aufgrund eines hohen Bedarfs z.B. zur Wasserstoffherstellung oder im Direkteinsatz, der zwecks unterschiedlicher Vorprozesse ein verschiedenes GWP erzeugt. Laut Sacchi et al. entstehen für einen Strommix aus 100% Windenergie 25 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh und aus 100% Kohleenergie 790 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh (2022a). Die Datenbank ecoinvent erzeugt im Systemmodell APOS Version 3.8 zur Strombereitstellung der Mittelspannungsebene auf globaler Ebene 705 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh, auf europäischer Ebene 392 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh und auf nationaler Ebene für Deutschland 565 g CO<sub>2</sub>-eq/kWh (Wernet et al., 2016). Je nach Stromquelle können daher sogar insgesamt höhere lebenswegbezogene Umweltwirkungen als für das konventionelle Vergleichsfahrzeug durch fehlende zeitliche Verbesserungen des aktuellen Strommix auftreten, wie Dillman et al. in einer Metastudie für elektrifizierte Pkw gegenüber CT ermitteln, sie empfehlen höhere datenbasierte und methodische Transparenz sowie die Bereitstellung nicht aggregierter Wirkungsabschätzungsergebnisse (2020). Die bislang umfangreichste Studie für CT und TTS zur *Bestimmung der Umweltauswirkungen von konventionellen und alternativ angetriebenen Fahrzeugen durch LCA* von der Europäischen Kommission ermittelt Umweltwirkungen für den straßengebundenen Transport in Pkw, Lkw und Bussen auf Basis diverser Antriebskonfigurationen von fossilem Benzin und Diesel sowie hybridelektrischer, batterieelektrischer, brennstoffzellenelektrischer und mit Oberleitungen elektrifizierter Straßensysteme (Hill et al., 2020). Die Literaturrecherche von Hill et al., die in 87% der Studien Pkw umfasste, demonstrierte für LCA von Transporttechnologien eine häufige Ermittlung der Bereiche Energie, Luftqualität, Toxizität und Ressourcenverbrauch neben GWP zur Wirkungsabschätzung (2020). Nachfolgend soll weiter untersucht werden, inwieweit eine Forschungslücke zu LCA von TTS mit einem Fokus auf Flugzeuge besteht.

### **2.1.3 Forschungsstand zur Nachbildung der Transport-Transformationslösung als technologische Veränderung**

Für die weitere Forschung in der Arbeit gilt es herauszufinden, welche Vorgehensweisen und Fahrzeugmodelle zur Nachbildung von Transformationslösungen im Verkehrssektor mit Fokus auf Verkehrsmitteländerungen existieren. Transformationen sind komplexe Prozesse mit Strategien zu aktuellen Herausforderungen, die Jahrzehnte andauern können (Engels et al., 2021). Zur Modellierung ist das System abzugrenzen, um ein freigeschnittenes Modell der Technologie nachzubilden, welches die Realität in vereinfachter Weise wiedergibt (Parodi, 2021). Das Technologiemo­dell kann als lebenswegbezogenes Produktsystem klein-skalierte Technologieentwicklungen wie chemische Prozesse (Thonemann & Schulte, 2019), mittel-skalierte Technologie- und Systementwicklungen wie Transportsysteme (Hanesch et al., 2022) oder groß-skalierte Systementwicklungen wie den Energiesektor (Vandepaer et al., 2020) abbilden. Um die Transformation im Verkehrssektor für einzelne Verkehrsmittel zu modellieren, müssen die Level des Referenzzustands (REF, reference state) von CT als

Transformation hin zu TTS im Zukunftszustand (FUT, future state) differenziert werden. Es existieren drei Veränderungslevel mit einer Produktveränderung als erstes Level, einem Technologiefortschritt als zweites Level und als drittes Level ein Zeitfortschritt meist den Hintergrundsystemen zugeordnet (Adrianto et al., 2021). Für das erste Level sind im Verkehrssektor die vier Säulen Verkehrsmittelwahl, Effizienz, Antriebswechsel und Kraftstoffe definiert, mit denen die Klimaziele in Deutschland erreicht werden sollen (BDI/BCG/Prognos, 2018). In dieser Arbeit stellen nur die letzten drei Säulen die Verkehrsmittelveränderung einer TTS dar, da diese auf der konventionellen Technologie basieren und sich für eine vergleichende Ökobilanz eignen. Technologische Veränderungen werden in einer ersten Metastudie mit Veröffentlichungen zu „technological change options“ aufgezeigt, um THG-Reduktionsmöglichkeiten des Verkehrssektors umfangreich abzubilden (Blas et al., 2020). Arena et al. definieren 48 Parameter, die über den Lebensweg von konventionellen Fahrzeugen Relevanz haben, die wichtigsten zur Ökobilanzierung sind Reichweite, Fahrzeugbesetzung, Fahrzeuggewicht, Materialzusammensetzung, Emissionen aus der Kraftstoffherstellung, Energieverbrauch, Anteil genutzter regenerativer Energien, Komponentenlebensdauer, Fahrzeuglebensdauer sowie Recyclinganteil (2013). Hill et al. stellen für CT und TTS verschiedene Parameter u.a. zur Elektrifizierung des Fahrzeugs gegenüber und zeigen auf, dass Energieverbrauch, Strommix, Ladeverhalten, Kraftstoffmix und Fahrzyklus größte Bedeutung für die Bewertung und den Vergleich lebenswegbezogener Umweltwirkungen zum jetzigen Zeitpunkt und in der Zukunft haben (2020). Die wichtigsten Parameter und deren Relevanz für die Bewertung über den Lebensweg der beiden Fahrzeugalternativen sind in Tabelle 2 zusammengestellt.

Tabelle 2 Parameter Einfluss über den Fahrzeuglebensweg auf Umweltauswirkungen (insb. THG-Emissionen) (in Anlehnung an Hill et al., 2020).

<b>Parameter für LCA-Transportmodelle</b>	<b>CT</b>	<b>CT</b>	<b>TTS</b>	<b>TTS</b>	<b>Vgl.</b>	<b>Vgl.</b>
Bewertung Einfluss für Betrachtungszeitpunkt	REF	FUT	REF	FUT	REF	FUT
Betrieblicher Energieverbrauch	hoch	hoch	tief	tief	hoch	hoch
Fahrzeug Lebenszeitaktivität (in km)	hoch	hoch	hoch	tief	hoch	tief
Fahrzyklus auf verschiedenen Straßentypen	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch	hoch
Durchschnittlicher Beladefaktor	hoch	hoch	hoch	hoch	tief	tief
Stromerzeugungsmix für das Batterieladen	-	-	hoch	hoch	hoch	hoch
Kraftstoffzusammensetzung und Herstellung	hoch	hoch	tief	tief	hoch	hoch
Kombination Ladeverhalten und Reichweite	-	-	hoch	hoch	hoch	hoch
Elektrische Reichweite	-	-	tief	tief	tief	tief
Spezifikation und Eigenschaften der Batterie	-	-	tief	tief	tief	tief
Materialzusammensetzung Fahrzeugstruktur	hoch	tief	hoch	tief	tief	tief
Nutzung erneuerbare Energien (kein Betrieb)	tief	tief	tief	tief	tief	tief
End-of-Life-Behandlung und Recycling	tief	tief	hoch	tief	hoch	tief

Für TTS ist die Bewertung ab der frühen Technologieentwicklung mit weniger ausführlichen LCA-Analysen und vereinfachten Screening-Methoden umsetzbar (Hung et al., 2020; Thomassen et al., 2019). Fehlende Daten können mit der Reduzierung der Parameter (Gasafi & Weil, 2011) oder Stellvertreter-Übernahmen von der Vergleichstechnologie (Nielsen & Wenzel, 2002) zu einer vollständigen Modellnachbildung führen. Nielsen und Wenzel zeigen

hierbei einen schrittweisen Ansatz zur Integration von Ökobilanzierung in den Produktentwicklungsprozess auf (2002). Im Vergleich zum konventionellen Fahrzeug sind besonders Prozesse und Komponenten im Detail zu berücksichtigen, die zur Elektrifizierung neu hinzugekommen sind wie die Herstellung von Batterie und Elektromotor (Cerdas et al., 2017). Es zeigt sich, dass technologische Lösungen für Pkw wie Hybrid-, Batterie- oder Brennstoffzellenfahrzeuge bereits entwickelt und untersucht wurden. Diese TTS haben die Marktreife erlangt und werden in großen Stückzahlen produziert. Es existiert eine Vielzahl von LCA-Studien zu TTS von Pkw (Blat Belmonte et al., 2020; Cox et al., 2020; Cox et al., 2018a; Dirnaichner et al., 2022; Mendoza Beltran et al., 2020; Sacchi et al. 2022a). Demnach ergibt die Literaturrecherche, dass keine Forschungslücke bei TTS von Pkw besteht, da die Umsetzung der Transformation des straßenbasierten Personenverkehrs zum aktuellen Stand hinreichend erforscht ist. Für TTS von Lkw haben elektrifizierte Fahrzeuge ebenfalls den Markt erreicht. Da Batteriespeicher in Lkw kontinuierlich mit hoher Leistung in Lade- und Entladerichtung betrieben werden müssen und das Batteriegewicht erheblich die transportierte Gütermenge beschränkt, sind elektrifizierte Straßensysteme auf Basis induktiver, konduktiver oder oberleitungsbasierter Stromladung als weitere TTS in Entwicklung (Gustavsson et al., 2019). Für sie existieren mehrere Pilotanlagen in Europa, woraus mit den Daten der neuartigen Technologien bereits erste Ökobilanzen im Pilotbetrieb umgesetzt werden konnten (Hanesch et al., 2022; Hill et al., 2020). Für Lkw lässt sich die Erforschung zur vorteilhaftesten Transportalternative noch nicht abschließen, jedoch ist die Umsetzung der Transformation des straßenbasierten Güterverkehrs bereits auf der Pilotstufe erfolgt. Flugzeuge haben den drittgrößten Einfluss auf THG-Emissionen im Verkehrssektor, gelten jedoch bezüglich TTS als noch nicht hinreichend entwickelt und kaum erforscht. Laut Gnad et al. befinden sich erst drei elektrifizierte Flugzeuge in industrieller Produktion, die *Liaoning Ruixiang RX1E* und *RX1E-A* eines chinesischen Herstellers und die *Pipistrel Alpha Electro* eines slowenischen Herstellers, jeweils mit einer Transportmenge von zwei Personen (2019). Die *Pipistrel Taurus Electro G4* besitzt unter den Flugzeugen, die bereits TRL 9 mit einer Flugtauglichkeit durch erfolgreiche Mission erreicht haben, die größte Auslastung von vier Personen (Brelje & Martins, 2019). Da für den Flugverkehr der Transportbedarf einer höheren Passagieranzahl besteht und keine geeigneten Transformationslösungen Marktreife erlangt haben, erfolgt die Untersuchung zu TTS von Flugzeugen in dieser Arbeit.

Der Entwicklungsstand der berücksichtigten Verkehrsmittel befindet sich aktuell für TTS von Flugzeugen im Labormaßstab, von Lkw im Pilotmaßstab und von Pkw im Marktmaßstab. Abbildung 5 zeigt die Einordnung der Verkehrsmittel gemäß ihrem Umsetzungslevel der technologischen Transformation. Zur erfolgreichen Transformation muss nach TRL 9, dem Erreichen der Marktfähigkeit, die Marktetablierung erfolgen zum Erreichen hoher gefertigter Stückzahlen. Aus diesen Skalierungseffekten ergeben sich Einsparungen an Rohstoffen und Energie, die für die in Entwicklung befindlichen TTS noch nicht erlangt werden können.

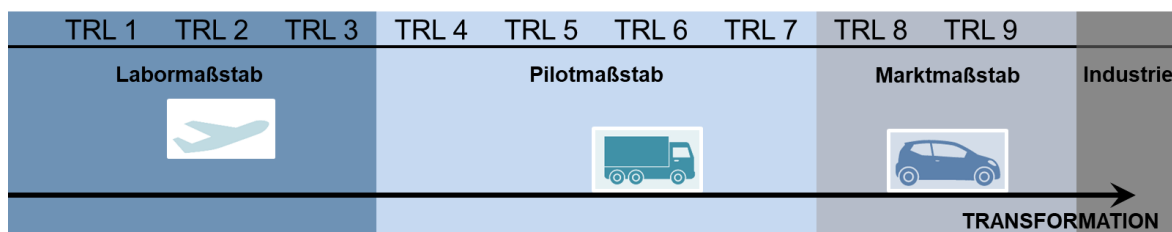


Abbildung 5 Umsetzung der technologischen Transformation im Verkehrssektor.



---

Es existieren veröffentlichte Modelle als Tools zur Nachbildung und Bewertung von TTS. Das unternehmensfokussierte Transformationstool *Pathways to Paris* zeigt als allgemeines Modell Maßnahmen zur Klimaziel-Erreichung mit einem Antriebswechsel für Pkw und dem Straßengüterverkehr, wobei Strommix und genutzte Energieträger pro Flottensegment auf Zukunftsszenarien der Agora-Studie *Klimaneutrales Deutschland 2045* basieren (WWF/PwC, 2022). Der ganze Verkehrssektor wird von Rottoli et al. bezüglich Transportbedarf und Energieverbrauch in einem Modell nachgebildet, das mit prospektiven Daten des IAM-Szenarios REMIND verknüpft ist (2021). Dieses Transportmodell *EDGE-T* bildet neben CT von Straße, Bahn, Flugzeug und Schiff für TTS nur straßenbasierte Fahrzeuge ab und zeigt eine große Systemtransformation bis 2050 unter Rückgriff auf externe sozioökonomische Parameter, indem TTS in den Markt entlang eines exogenen Verlaufs gelangen (Rottoli et al., 2021).

Bei einer produktbasierten Umweltbewertung nach ISO Norm ist in Ökobilanz-Modellen jedoch der Fokus auf eine einzelne Technologie zu legen, um diese präzise und detailliert modellieren zu können. Johanning hat vereinfacht anhand weniger als 40 Parameter alle Lebensphasen von konventionellen und neuartigen Flugzeugen in einem Excel-Tool nachgebildet, das alle LCI-Daten offenlegt (2017). Zur Erstellung der Materialliste des Flugzeugs kann der Nutzer zwischen der Materialverteilung pro Maschine auf Grundlage der vier Hauptrohstoffe im Flugzeug (Aluminium, Stahl, Titan und Verbundwerkstoffe) (DIN 9020-5), der gewichtsbasierten Verteilung pro Hauptkomponente und der Materialverteilung eines generischen Flugzeugs wählen. Für TTS erfolgt zur Umweltbewertung die Auswahl regenerativer Strom bzw. EU Netzstrom, grüne oder graue Wasserstoffherstellung und nutzeingabebasierte Daten der Parameter Batteriemasse, spezifische Energiedichte, Ladezyklen und Stromverbrauch, jedoch werden neben Strommix und Batterieparametern keine Zukunftsentwicklungen der noch nicht marktreifen TTS im Modell berücksichtigt, zudem basieren die technologischen Veränderungen auf keinem neuen Flugzeugentwurf und zeigen somit noch keine technologische Machbarkeit auf (Johanning, 2016). Ein übergeordnetes Verkehrsmittel-Tool für alle Mobilitätsarten und vielfältige technologische Veränderungen straßenbasierter TTS anhand von 15 Parametern wurde von Sacchi und Bauer im *mobitool v3.0* zusammengefasst, welches für Unternehmen eine schnelle Entscheidungsunterstützung liefern soll (2023). Als ein ausführlicheres LCA-Modell wurden von Sacchi et al. das Tool *calculator-truck* entwickelt, das in Kombination von Fahrzeugkategorie, Antrieb, Kraftstofftyp und Betrachtungsjahr anhand von 70 Parametern aus gemeinsamen Komponenten wie Struktur und Ausrüstung sowie verschiedenen Antriebssystem-spezifischen Komponenten 252 Lkw-Modelle erstellt, welche neben modifizierten Parametern und veränderten Marktzusammensetzungen auf Basis des IAM-Szenarios REMIND die gleichen Parameterwerte der funktionellen Einheit besitzen und als Voraussetzung die CO<sub>2</sub>-Flottenziele einhalten (2021). Das Tool *calculator* kombiniert im Vordergrundsystem Fahrzeugdimensionierung, Materialliste, Energie- und Emissionsmodell, und bildet mit 77 Parametern für Pkw und deren TTS Status Quo und Zukunftsentwicklung für 2040 mit einem wahrscheinlichen Wert, einem Maximalwert und einem Minimalwert ab (Sacchi et al. 2022a).

Da die parametrisierten LCA-Modelle bis auf eine Ausnahme nur TTS des straßenbasierten Transports detailliert nachbilden und für flugbasierten Transport, um die Transportleistung zu erfüllen, auch als Zukunftsentwicklung keine TTS enthalten sind, müssen diese genauer

---

betrachtet werden. Es benötigt folglich Modelle von flugbasierten TTS, welche auf die Aerodynamik durch veränderte Komponentengewichte und Komponentenanordnungen eingehen und neben Antriebswechsel und Kraftstoffen auch den Hüllkörper von Flugzeugen verändert nachbilden. Zudem sind in die Tools keine spezifischen Schritte der Szenarioanalyse zur Entwicklung und Nutzung von Zukunftsszenarien unter der Ausbildung einer allumfassenden Szenario-Narrative integriert. Daher sollte ein Fokus auf den methodischen Unterbau der entwickelten Tools gelegt werden, um die Nachbildung von TTS auf eine transparente Weise umzusetzen.

Transportlösungen im Flugsektor haben eine größere Unsicherheit, da sie sich noch in einer frühen Phase der Entwicklung befinden und ohne ein physisches Existieren der neuartigen Verkehrsmittel keine Materiallisten verfügbar sind sowie bis zum in der Zukunft liegenden Markteintritt und der Marktetablierung noch große Herausforderungen zur Beschaffung der entsprechenden LCI-Daten existieren. Auf die inhärenten Eigenschaften von TTS im Zusammenhang mit LCA soll abschließend genauer eingegangen werden.

In frühem Entwicklungszustand als radikale Neuheiten mit großer Unsicherheit erreichen sie ein schnelles Wachstum mit sinkender Designunsicherheit (Rotolo et al., 2015). Da in frühen Entwicklungsstadien identifizierte Umwelt-Hotspots optimierbar sind, ist Unvergleichbarkeit ohne technologischen und zeitlichen Fortschritt zu beachten (Thonemann et al., 2020). Die Laborstufe stellt den Modellierungsbeginn unter aktuellen Bedingungen dar, jedoch sollte das Ziel stets in der industriellen Reife zum Zukunftszeitpunkt für eine Vergleichbarkeit mit etablierten Technologien liegen (Buyle et al., 2019). Für Entwicklungsentscheidungen ergibt sich die Notwendigkeit von schnellen Analysen trotz großen Datenlücken und unbekanntem industriellen Maßstäben (Hetherington et al., 2014). Vier Kern-Herausforderungen lauten Vergleichbarkeit mit konventionellen Technologien, Datenlücken, Hochskalierung und Unsicherheitskommunikation (Hetherington et al., 2014; Moni et al., 2020), als weitere Herausforderung nennen Arvidsson et al. Hintergrundsystemänderungen zur Vermeidung einer zeitlichen Inkongruenz (2018). Zu diesen identifizierten Herausforderungen für TTS fehlt bislang eine allumfassende Methodik als schrittweise Handlungsanleitung, mit der Modellausbildungen ab frühester Technologieentwicklung sukzessive umsetzbar sind.

Ob zudem eine Forschungslücke zu TTS von Flugzeugen in Kombination mit der Methode der Ökobilanzierung vorhanden ist, soll nachfolgend in einer umfangreichen Metastudie überprüft werden. Die weitreichende Literaturrecherche soll einerseits ausschließen, dass zum Forschungsbestreben der Arbeit bereits hinreichende Ergebnisse existieren, und andererseits sollen nützliche Erkenntnisse daraus in diese Forschung integriert werden.

#### **2.1.4 Metastudie zu Ökobilanzen von Transformationslösungen im Flugsektor**

Der übergeordnete Untersuchungsrahmen dieser Arbeit bildet LCA von TTS ab. Aufgrund des geringen Entwicklungsstandes der Transformation des Flugsektors zu einer nachhaltigen Mobilität werden die TTS auf Flugzeuge eingegrenzt. Für diese wird eine systematische Literaturrecherche als erste Metastudie durchgeführt. In Abbildung 6 ist die Vorgehensweise der systematischen Literaturrecherche dargestellt, welche sich in einen vorgelagerten kondensierten Analyseteil und einen zusammenfassenden umfangreichen Syntheseteil unterteilt.

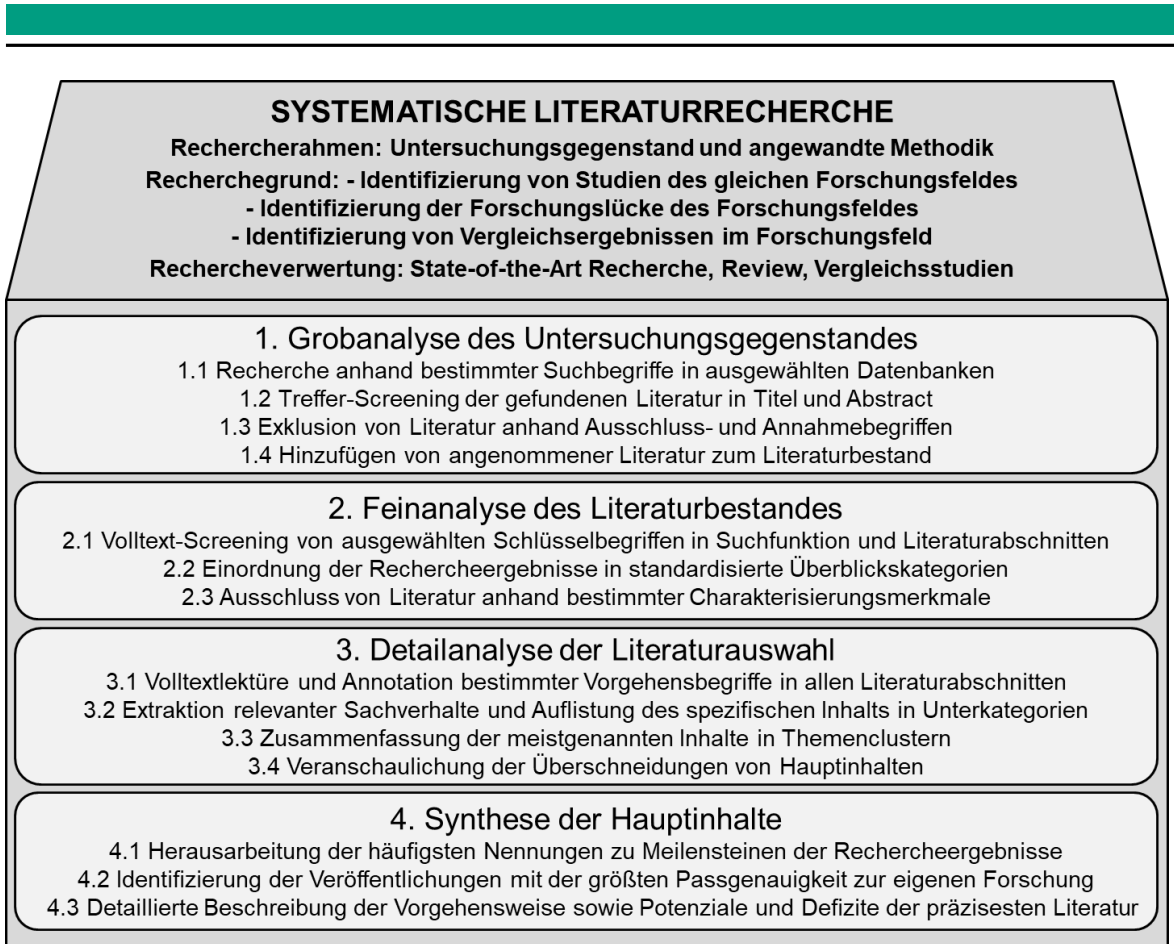


Abbildung 6 Vorgehensweise in der systematischen Literaturrecherche dieser Arbeit.

Der Rechercherahmen in der ersten systematischen Literaturrecherche dieser Arbeit umfasst die Nachhaltigkeitsmethode LCA in Kombination mit dem Verkehrsmittel Flugzeug, sowohl für CT als auch für TTS. Die Datenbanken *Web of Science* und *Science Direct* werden zur Recherche genutzt, die Dokumentation der Grobanalyse ist Anhang A1 zu entnehmen. Nach einer Eingrenzung von Suchzeitraum, Publikationstyp und nicht zugangsbeschränkten Veröffentlichungen resultierten etwa 2.000 Treffer insgesamt. Diese Artikel wurden in der Grobanalyse gefiltert mittels Screening von Titeln und Abstracts sowie Annahmebegriffe für die weitere Analyse wie „aircraft“, „life cycle“, „LCA“, etc. und Ausschlussbegriffe wie ausschließlich „costs“ und „fuels“. Die ausgewählte gefundene Literatur wurde um weitere Literatur ergänzt zu 57 Veröffentlichungen, die in Anhang A2 aufgelistet sind. Unterteilt in drei Bereiche LCA von elektrifizierten Flugzeugen, LCA von konventionellen Flugzeugen und Fallstudien elektrifizierter Flugzeuge wird eine Feinanalyse durchgeführt, diese befindet sich dokumentiert in Anhang A3-A5. Die Veröffentlichungen werden nach Existenz verbreiteter Schlüsselbegriffe wie für den Klimawandel mit „GWP“ geprüft und in Überblickskategorien wie FU und Energieträger tabellarisch aufgelistet. Mit diesen Charakterisierungsmerkmalen wird eine letzte Reduktion auf 30 Studien umgesetzt für die in dieser Arbeit relevanten Forschungsinhalte. Ausschlusskriterien sind fehlende Passgenauigkeit der Forschung bzw. Mehrfachveröffentlichungen zum selben Untersuchungsgegenstand. Die Detailanalyse ist in Anhang A6-A8 dokumentiert. Zur Synthese werden die 30 Veröffentlichungen in relevanten Themenbereichen untersucht und die Analyseergebnisse in Unterkategorien festgehalten. Abbildung 7 stellt in Clustern wichtige Schlüsselbegriffe und Charakterisierungsmerkmale der vielversprechendsten Studien für den Untersuchungsgegenstand Flugzeug dar.

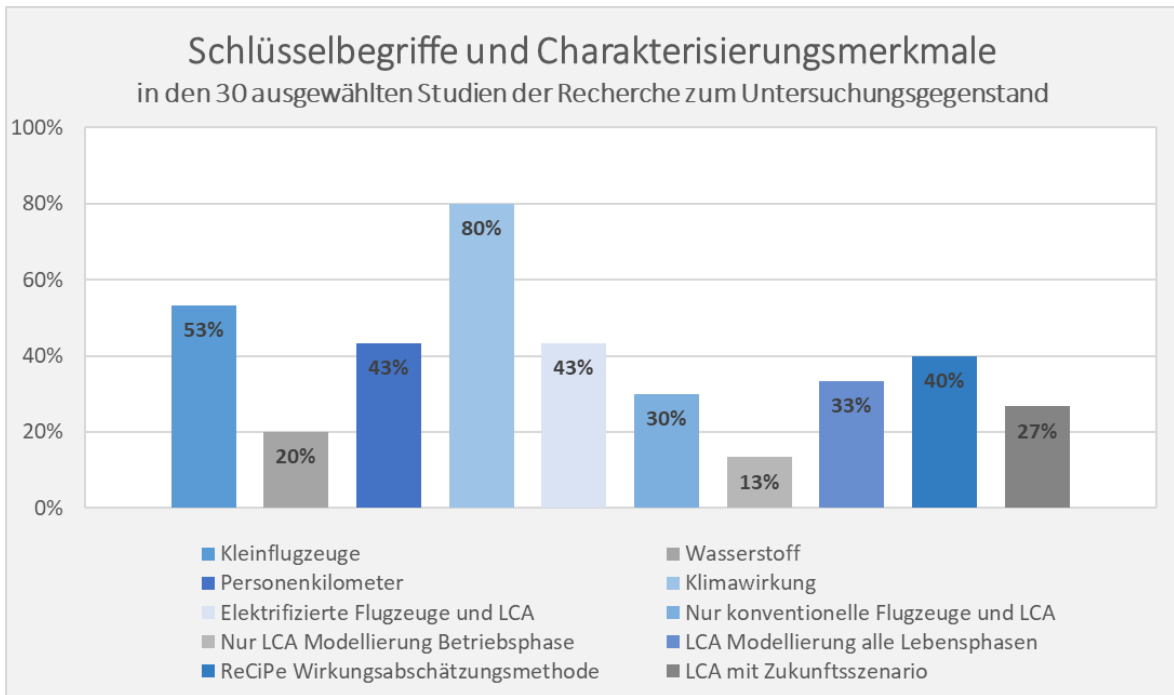


Abbildung 7 Auswertung von Schlüsselbegriffen und Charakterisierungsmerkmalen in den 30 relevantesten Veröffentlichungen der Metastudie zum flugzeugbasierten Untersuchungsgegenstand.

Die Hälfte der Studien untersucht explizit Kleinflugzeuge, welche bis zu 100 Personen transportieren und kurze Flugdistanzen überwinden können. Alle Studien zu elektrifizierten Antriebssystemen betrachten den Energieträger Strom, jedoch nur ein Fünftel der Studien Wasserstoff. Weniger als die Hälfte berücksichtigt als FU Personenkilometer und 80% der Studien ermitteln die Klimawirkung als CO<sub>2</sub>-Emissionen bzw. GWP. Nur in 73% der Studien wird LCA als Methode erwähnt, 13 Studien führen Ökobilanzen von elektrifizierten und neun von konventionellen Flugzeugen durch. Nur die Systemgrenze der Betriebsphase wird von 13% der Studien berücksichtigt, ein Drittel betrachtet den kompletten Lebensweg des Flugzeugs. Als Wirkungsabschätzungsmethode wird von 40% der Studien ReCiPe genannt, zudem integrieren acht Studien in die LCA einen in der Zukunft liegenden Zeithorizont.

Viele Veröffentlichungen richten sich nicht nach dem Standard der ISO Norm 14040/14044, weder in der Nennung der Methoden Anwendung noch in der allgemeinen Strukturierung in den vier Phasen. Zur LCA von elektrifizierten Flugzeugen besteht daher die Forschungslücke, eine Ökobilanz der neuartigen Flugzeuge nach ISO Norm durchzuführen. Weiterhin hat die Metastudie ergeben, dass einige Studien lediglich die technologische Entwicklung von neuen Flugzeugkonfigurationen für elektrische Flugzeuge betrachten bzw. CO<sub>2</sub>-Emissionen nicht auf die Durchführung einer Ökobilanz zurückgeführt werden (siehe Studien in Anhang A7). Umweltbewertungen werden umgesetzt zu konzeptionellen Elektroflugzeugen wie dem *Ce-Liner* (Ploetner et al., 2016) oder dem verworfenen *E-Fan-X* (Jayme, 2019). In den Studien zeigt sich besonders die Betrachtung elektrifizierter Kleinflugzeuge als sehr vielversprechend (siehe Anhang A5), da dies einen ersten Schritt zur Transformation des Flugsektors darstellt.

Die nach ISO Norm durchgeführten Veröffentlichungen ergeben eine Spannweite für CT im REF. Chester und Horvath ermitteln für ein konventionelles Flugzeug 180 g CO<sub>2</sub>-eq/pkm und 0,5 g NO<sub>x</sub>-eq/pkm (2009), während Cox et al. ohne zusätzliche höhenabhängige Effekte durch Cirruswolkenbildung 280 g CO<sub>2</sub>-eq/pkm und 0,6 g NO<sub>x</sub>-eq/pkm aufzeigen (2018b).

---

Eine noch größere Spannweite zu THG-Emissionen besteht bei LCA von Elektroflugzeugen, häufig sind nur einzelne Komponenten statt eines vollständigen Produktsystems modelliert. Scholz et al. erhalten im Vergleich von hybridelektrischen und konventionellen Flugzeugen auf Schadensendpunkt-Wirkungsebene höhere Umweltwirkungen für das elektrifizierte Flugzeug mit einer Verschiebung hin zu einer Erhöhung des Ressourceneinsatzes, welche sie auf den Mehrbedarf an Strom und Batteriekomponenten zurückführen, im FUT erreichen sie für ein Best Case Zukunftsszenario in allen drei Endpoint-Kategorien Verbesserungen von unter 10% für die TTS (2022). Ebenfalls wie im batterie- und brennstoffzellenbasierten Flugzeugmodell des Excel-Tools von Johanning, in dem aufgrund fehlender Daten ein vollständiges Produktsystem über den Lebensweg für Elektroflugzeuge nicht umgesetzt werden kann (2017), werden bei Ribeiro et al. nur ausgewählte Komponenten von Batterieeinsätzen und Strommix betrachtet, für diese jedoch in Zukunftsszenarien große Verbesserungen erreicht (2020). Ploetner et al. erhalten im REF eines CT gegenüber dem FUT einer hybridelektrischen TTS im Best Case Szenario 89% THG-Reduktionen (2016). Nicolay et al. zeigen für ein Wasserstoffflugzeug, dass die Menge der Lebenswegemissionen sehr stark von der Wasserstoffproduktion abhängen (2021). Strathoff et al. ermitteln in einer Vorstudie von Entwurfsdaten auf TRL 2 im GNOSIS Projekt, dass 80% THG-Emissionen zum konventionellen Flugzeug in der Nutzenphase des Wasserstoffflugzeugs reduzierbar sind mit verbessertem Strommix in 2050 (2022). Barke et al. zeigen, dass eine Wasserstoffnutzung für synthetisches Kerosin mittels nicht rein regenerativem Strom ca. dreieinhalbfach höhere THG-Emissionen im Vergleich zur konventionellen Kerosinnutzung verursacht, deutscher Netzstrom soll zu 63% und 100% regenerativer Strom zu 92% Verbesserung führen (2022a).

Diese große Varianz an Umweltwirkungsergebnissen benötigt als Grundlage eine fundierte Methodik zur Entwicklung von Zukunftsszenarien, damit die prospektiven LCA-Ergebnisse nachvollziehbar und vergleichbar sind. Denn aufgrund unterschiedlicher Annahmen und nur teilweiser Lebenswegbetrachtung von selektiven Prozessen im elektrifizierten Produktsystem gestaltet sich eine Ergebnisgegenüberstellung für TTS als nur sehr schwierig durchführbar. Deutliche Unterschiede zwischen den Studienergebnissen stellt zwar der Parameter des Strommix mit dem Anteil von regenerativen Energien dar, es fehlt jedoch eine Studie, die sich mit einer transparenten Darstellung von prospektiven Annahmen auseinandersetzt. Die meisten Studien betrachten zudem keine entwickelte Flugzeugkonzeption mindestens auf TRL 3 in Form einer Transformationslösung. Daher fehlt in allen identifizierten Studien zu LCA und elektrifizierten Flugzeugen die Kombination einer zuerst entwickelten TTS, welche Sachbilanz-Daten bereitstellt, mit der Durchführung der umfangreichen lebenswegbasierten Ökobilanz nach ISO Norm. Die Forschungslücke dieser Arbeit liegt in dem Fehlen von auf der ISO Norm basierenden LCA-Ergebnissen neuartiger Flugzeuge. Besonders wurden die Wirkungskategorien Photochemische Ozonbildung und Mineralischer Ressourcenverbrauch für neuartige elektrifizierte Flugzeuge noch in keiner der vorliegenden Studien untersucht.

### **2.1.5 Grundlagen zur Methode der Szenarioanalyse**

Die Vorausschaumethode der Szenarioanalyse für qualitativ hochwertige Zukunftsszenarien ist in die Ökobilanzierung zu integrieren. Denn die Modellierung von Zukunftstechnologien stellt die Nachhaltigkeitsbewertung ohne einen methodisch geeigneten Unterbau vor große Herausforderungen. Für die Anwendung der LCA auf TTS ist nicht nur die Datenaufnahme



---

besonders bei niedriger Reifegradentwicklung erschwert, sondern es ist auch eine Ergänzung um Zukunftsentwicklungen in die Modelle notwendig, woraus sich die Unsicherheit erhöht. Zur Entwicklung von Zukunftsszenarien sollte demnach ein Rückgriff auf die Methode der Szenarioanalyse erfolgen, die in ihrer Umsetzung nachfolgend näher dargelegt wird.

Mit steigender Unsicherheit und Komplexität gesellschaftlicher Rahmenbedingungen sind heutige Entscheidungen mehr denn je vorausschauend zu reflektieren und zukunftsfähig auszurichten, hierfür fehlt eine einheitliche, transparente Grundlage der Szenario-Methodik mit grundlegenden Anleitungen zur Auswahl von passenden Techniken und umfassenden Tools (Kosow & Gaßner, 2008). Seit den 1960er Jahren existiert der Szenario-Ansatz und erlangte breites öffentliches Interesse durch die Studie *Die Grenzen des Wachstums* (Meinert, 2014). 1998 bildete sich die SETAC-Europe LCA Arbeitsgruppe *Szenarioentwicklung in LCA*, um für prospektive Ökobilanzierung von künftigen Produktsystemen, die im Status Quo so noch nicht existieren, erste geeignete Vorgehensweisen zur Kombination beider Methoden vorzustellen (Pesonen et al., 2000). Zukunftsszenarien gelten als Abbild zukünftiger Situationen, die nach heutigem Wissensstand eintreten können und aus der Untersuchung heutiger Ausgangsbedingungen hervorgehen (Dieckhoff et al., 2014). Ein Zukunftsszenario legt nicht die Zukunft in ihrer Gesamtheit dar, sondern fokussiert auf für die Ausgangslage relevante Aspekte und ist definiert als ein spezifisches Zukunftsbild von einer möglichen zukünftigen Situation, die sich aus dahin führenden Entwicklungspfaden zusammensetzt (Kosow & Gaßner, 2008). In der Ökobilanzierung sind zwar Szenarien bereits Bestandteil der standardisierten ISO Norm, in welcher eine Durchführung von Sensitivitätsanalysen zur Ergebnisveränderung mit einem einzigen Parameter oder von Szenarien zur symbiotischen Ergebnisveränderung aufgrund mehrerer kombinierter Parameter empfohlen wird (DIN EN ISO 14040). Zukunftsszenarien unterscheiden sich davon, indem sie für die kombinierte Parametermodifizierung Zukunftsentwicklungen integrieren, da ein Szenario auch für den Referenzzustand ohne Zukunftsbetrachtung kombiniert werden kann.

Zukunftsszenarien haben Grundeigenschaften, die diesen inhärent sind und mit denen sich Szenarien voneinander abgrenzen lassen. Das Ziel von Szenarien kann von der Gegenwart aus gerichtet als explorativ oder vom Zielzustand zurückblickend als normativ unterschieden werden, die Rolle der Szenarien spannt sich auf zwischen ausgangslagebasierten Trends als Business-as-usual (BAU) Entwicklung und Szenarien des Wandels, während die Form von Szenarien die Art der übermittelten Informationen darstellt und sich als quantitativ mit zahlengestützten Daten oder als qualitativ mit einem nicht-nummerischen Erzählstrang unterscheidet (Fancourt, 2016). Van Notten differenzieren zudem Vorausschautechniken zur Datenmodifikation in die zwei Bereiche Schreibtischrecherche und Partizipation (2003).

Abbildung 8 zeigt den zeitlichen Verlauf von Entwicklungspfaden, die als Erweiterung des Referenzzustands unter einer gesetzten Entwicklung der Vergangenheit bis zu einem bzw. mehreren Zuständen in der Zukunft gelten. Sie sind durch unsichere Events und Dynamiken beeinflusst und durch Nichtlinearität der Pfade gekennzeichnet. Für deren Eintreten besteht nie Gewissheit, da weitere Entwicklungen möglich sind. Klimaresiliente Entwicklungspfade besitzen zudem die doppelte Zielsetzung zur Begrenzung der Erderwärmung unter 1,5°C und dem Erreichen einer nachhaltigen Entwicklung anhand von SDG (IPCC, 2018). Die Entscheidungsunterstützung in LCA sollte daher stets einen Beitrag zu Klimazielen und Nachhaltigkeitszielen leisten, um aus den unsicheren klimaresilienten Entwicklungspfaden praktische klimaresiliente Maßnahmen zu erzeugen.

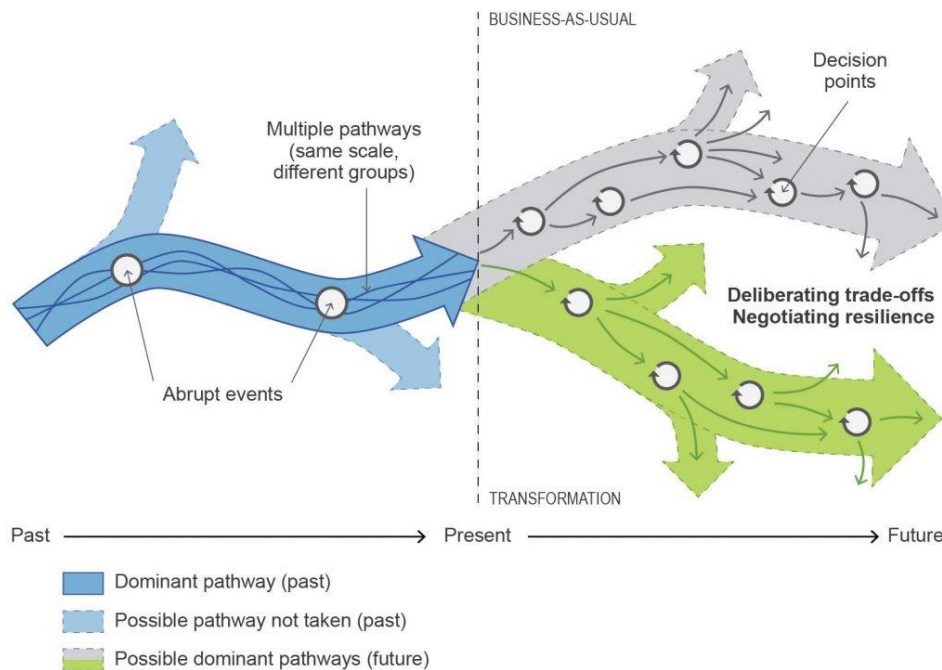


Abbildung 8 Zukunftspfade von Szenarien basierend auf Pfadabhängigkeiten, iterativer Problemlösung und Entscheidungsfindung (IPCC, 2018).

Es bilden sich drei Szenariotypen, für den kurzen Zeithorizont bis zu zehn Jahren können prädiktive Szenarien erzeugt werden, die meist eine BAU Entwicklung abbilden sowie keine starke Veränderung zu aktuellen Trends aufzeigen, und für den langen Zeithorizont sollten explorative oder normative Zukunftsszenarien entwickelt werden (Börjeson et al., 2006; Höjer et al., 2008). Zudem ist die umgebende sozioökonomische Entwicklung mit den spezifischen Entwicklungspfaden des Produktsystems in Interaktion zu bringen, um zu konsistenten Zukunftsszenarien zu gelangen (Steubing & Koning, 2021). Für die finalisierten Zukunftsszenarien, auf Basis von selbst erzeugten Parameterwerten in Vordergrund- und Hintergrundsystem bzw. von Expertengruppen erzeugten Parameterwerten aus bestehenden Szenarien integriert, berücksichtigen die wenigsten Ökobilanz-Studien einen mehrstufigen Entwicklungsprozess.

Die generellen Schritte des mehrstufigen Szenarioentwicklungsprozesses umfassen nach Kosow und Gaßner vier Entwicklungsphasen (Szenariofeld-Bestimmung, Schlüsselfaktor-Identifikation, Schlüsselfaktor-Analyse und Szenario-Generierung) sowie eine Transferphase (Szenario-Transfer) und sind in Abbildung 9 dargestellt (2008). Ähnlich wie die erste Phase der LCA wird in Phase eins der Szenarioanalyse das Umfeld des Szenarios bestimmt. Dieses stellt den Bezugsrahmen der Arbeit dar und berücksichtigt die zeitliche, geographische und thematische Reichweite (Kosow & Gaßner, 2008). Rounsevell und Metzger definieren die erste Phase als Identifizierung der zentralen Fragestellung (2010). In der zweiten und dritten Phase werden die Schlüsselfaktoren identifiziert und analysiert, bei denen es sich um die zentralen Einflussfaktoren und wichtigsten treibenden Kräfte der Entwicklung handelt (Kosow & Gaßner, 2008). Rounsevell und Metzger definieren als zweite Phase für die Identifizierung der Haupttriebkräfte die Schlüsselfaktoren als Ereignisse und Trends, welche die zentrale Fragestellung beeinflussen, sowie die Triebkräfte als zugrundeliegende Ursachen, welche die Schlüsselfaktoren antreiben; weiterhin empfehlen sie die Auswahl von Faktoren mit den größten Auswirkungen und Unsicherheiten auf eine bestimmte

Problemstellung zur Umsetzung der dritten Phase, welche sie als die Bestimmung der Szenario-Logik festlegen (2010). Als abschließende vierte Entwicklungsphase erfolgt die Szenario-Generierung, um aus zuvor bestimmten Entwicklungspfaden aussagekräftige Szenarien auszubilden, die nachfolgend in einem Szenario-Transfer überführt und weiterverwendet werden (Kosow & Gaßner, 2008). Rounsevell und Metzger definieren die letzten Phasen der Szenarioentwicklung als Beschreibung der Szenario-Annahmen und Bewertung der Szenario-Ergebnisse (2010). Bishop et al. unterteilen ihre generische Vorausschamethode ebenfalls in eine vorgelagerte Stufe der Rahmung, drei Kernstufen von Scannen, Vorausschau und Visualisierung sowie zwei nachgelagerten Stufen von Planen und Handeln (2007).

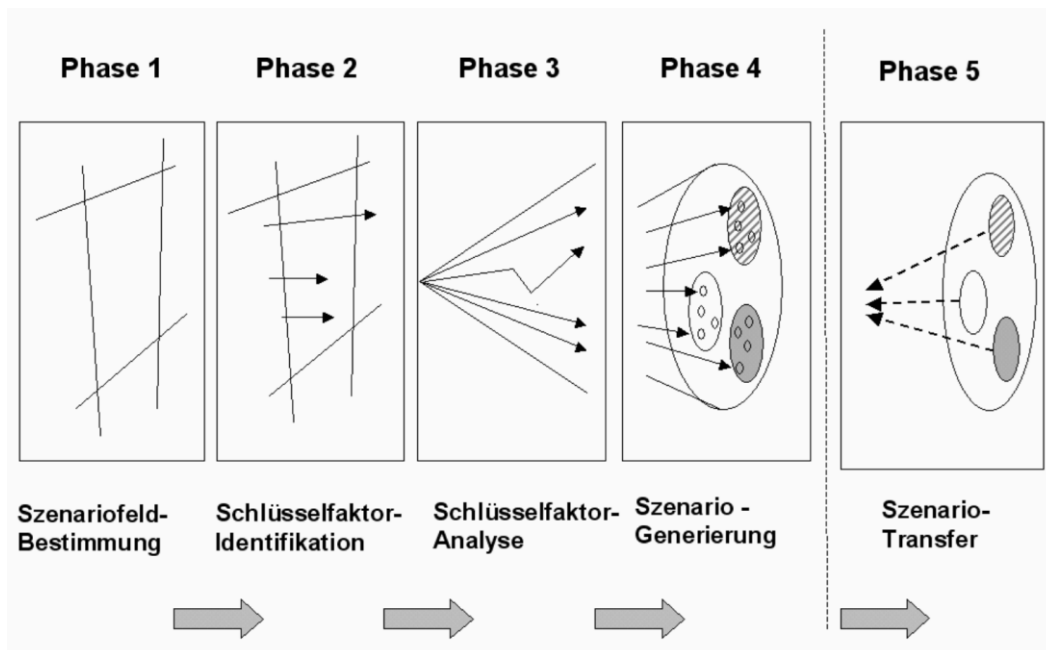


Abbildung 9 Die generelle Methode der Szenarioanalyse in fünf Phasen (Kosow & Gaßner, 2008).

Es zeigt sich, dass trotz verschiedener Szenario-Ansätze ein weitgehender Konsens in der Vorausschamethodik Forschungsgemeinschaft über Methodenkern und notwendige Stufen der Szenarioentwicklung besteht. Aufgrund der großen Komplexität sollte die Methode der Szenarioanalyse nur hinsichtlich der größten Relevanz im Vorgehen übernommen werden, sodass ein Fokus auf den drei Kernstufen zur Integration in die Methode der Ökobilanzierung liegt. Inwieweit eine Umsetzung der Szenarioanalyse in der LCA als Methodenkombination bereits erfolgt ist, soll nachfolgend genauer dargelegt werden.

### 2.1.6 Forschungsstand zur zukunftsgerichteten Nachbildung in Ökobilanzen als technologischer und zeitlicher Fortschritt

Um die Szenarioanalyse mit LCA zu kombinieren, sind die unterschiedlichen Phasen der zwei Methoden in eine gemeinsame Methode zu integrieren. Aufgrund der Fokussierung auf die Umweltbewertung werden die vier Phasen der Ökobilanz als Fundament betrachtet, in welche die Vorausschamethode hinzugefügt werden soll. Auf Grundlage des Vorgehens von Kosow und Gaßner (2008) integrieren Langkau et al. drei iterative Stufen in die Sachbilanz,



---

die Identifizierung relevanter Parameter, die Findung von Zukunftsannahmen für Parameter und die Kombination von Annahmen zu Zukunftsszenarien sowie eine separate Stufe in die erste Phase der Ökobilanz, die Definition der pLCA Forschungsfrage; wobei sie hervorheben, dass für die Reduktion der epistemologischen Unsicherheit eine Expertenteilnahme das Schlüsselement der Kombination von LCA und Zukunftsszenarien ist (2023). Eine LCA-basierte Anleitung zur Szenarioentwicklung existiert seit langem in Spielmann et al. (2005), jedoch sind bis heute Ökobilanzen meist ohne mehrstufigen Szenarioentwicklungsprozess ausgearbeitet und eine Offenlegung von dem Ergebnis dieses Prozesses beispielsweise mit einer Szenario-Narrative wie in (Fishman et al., 2021) wird kaum umgesetzt. Bisinella et al. zeigen in einem umfangreichen Review auf, dass 125 von 500 Studien eigene Methoden für pLCA erzeugen, allerdings nicht genügend generalistisch, unter fehlender Transparenz der Modellierungsentscheidungen und ungenügender Anwendung der Vorausschamethode Terminologie (2021). Eine gute Erläuterung der Methodik zur Szenarioentwicklung für pLCA in mindestens zwei Stufen findet sich bei Spielmann et al. (2005), Mendoza Beltran et al. (2020), Cucurachi et al. (2022) und Langkau et al. (2023), welche alle die Methode der Szenarioanalyse in die Sachbilanz übernehmen. Jedoch ist besonders die mittlere Kernstufe der Parametermodifizierung methodisch zu ungenügend ausgearbeitet und benötigt eine systematische Vorgehensweise als Anleitung für Ökobilanzierer. Zudem ist in keiner dieser Studien die Technologieentwicklung separat von der Zukunftsentwicklung berücksichtigt worden, sodass die methodischen Herausforderungen für Ökobilanzierer zur differenzierten Nachbildung von neuartigen Technologien und zukunftsgerichteten Technologien noch nicht sukzessive angegangen werden.

Für eine ganzheitliche Methodik von TTS und der Entwicklung von Zukunftsszenarien in Ökobilanzen können bereits vielfältige Einzelbausteine für eine optimale Anwendung von pLCA aus der Literatur entnommen werden. Diese werden den drei generischen Kernstufen Identifizierung von Schlüsselfaktoren, Erarbeitung von Zukunftsannahmen und Festlegung von Zukunftsszenarien zugeordnet, auf welche im Verlauf der Arbeit noch detailliert eingegangen wird. Für die Identifizierung eignet sich zur Übersichtlichkeit die Auswahl von maximal 20 Schlüsselfaktoren (Kosow & Gaßner, 2008). Zudem müssen Feedbackeffekte aus der übergeordneten Politik (Gibon et al., 2015) und weiteren gesamtgesellschaftlichen Bereichen erfasst werden, wie dies mit gewählten oder allen PESTEL Kategorien (Politische, wirtschaftliche, soziokulturelle, technologische, ökologische und gesetzliche Faktoren) umgesetzt werden kann (Cucurachi et al., 2022; Kosow & Gaßner, 2008; Langkau et al., 2023). Die Schlüsselfaktoren sollten weiterhin vor der konkreten Modifizierung hinsichtlich ihrer Eignung und Relevanz für das Produktsystem validiert werden wie im integrierten Kausalschleifendiagramm (Cucurachi et al., 2022; Langkau et al., 2023). Für die Erarbeitung fehlt bislang eine systematische Parameteränderung der Zukunftsannahmen, die explizit auf die methodischen Unterschiede für Vordergrund- und Hintergrundsystem eingeht. Zudem sollte deren zeitliche Korrelation und die große epistemologische Unsicherheit in der Zukunft berücksichtigt werden (Mendoza Beltran et al., 2020). Da Zukunftsentwicklungen als unbekannte Unbekannten gelten und auch alle methodischen Entscheidungen für eine frühe Bestimmung der Szenarienanzahl transparent festzulegen sind, existiert laut Bisinella et al. der Bedarf nach einem neuen systematischen Datenmodellierungsansatz für pLCA (2021). Ebenso haben Interpretation, Auswahl und Beurteilung des Ökobilanzierers einen Einfluss (Villares et al., 2017). Um zu berücksichtigen, dass subjektive und intuitive Anteile stets in Schlüsselfaktorausprägungen enthalten sind (Kosow & Gaßner, 2008), werden für

---

zukunftsveränderte Daten neue Techniken für die Erzeugung der Zukunftsannahmen als eine Erweiterung der Techniken zur Technologieabschätzung notwendig. Zwar wird der Formalisierungsgrad durch Kreativität reduziert, die aber neben Partizipation fundamental für die Qualität von Zukunftsszenarien ist (Bisinella et al., 2021; Kosow & Gaßner, 2008). Weiterhin wird eine Verbindung der divergierenden Ausprägungen durch die Szenario-Logik unterstützt (Rounsevell & Metzger, 2010), um zu konsistenten Zukunftsszenarien zu gelangen. Diese Kombinationslogik kann u.a. als ein Szenario-Kreuz erfolgen (Bisinella et al., 2021; Kosow & Gaßner, 2008). Für die Festlegung existieren Tools wie eine Konsistenzmatrix zur paarweisen Überprüfung der Parameter bezüglich ihrer Vereinbarkeit zueinander (Cucurachi et al., 2022; Kosow & Gaßner, 2008; Langkau et al., 2023; Spielmann et al., 2005). Zudem benötigt es Datenaufbereitungsstrukturen zur klaren Übersicht der Schlüsselfaktorausprägungen pro Szenario (Bisinella et al., 2021; Kosow & Gaßner, 2008). Kosow und Gaßner zeigen weiterhin als Möglichkeit für die Szenario-Generierung auf, dass mit der Verwendung sprechender Titel, der Darlegung überzeugender Handlungsstränge und einer Ausprägungsübersicht eine Verschriftung des Szenarios erfolgen kann (2008). Um eine sinnvolle Ergebnisauswertung und für Entscheidungsträger eine Nachvollziehbarkeit als Voraussetzung für eine erfolgreiche Anwendung der Ökobilanz-Ergebnisse zu erzeugen, sollte sich auf maximal drei Zukunftsszenarien beschränkt werden (Adrianto et al., 2021). Zudem sind alle relevanten Szenarioaspekte der spezifischen Zukunftssituation anzugeben und eine Gegenüberstellung kann die Effekte der modifizierten Parameter verdeutlichen (Bisinella et al., 2021), sodass sich ein Vergleich der Ökobilanz-Ergebnisse aus den Zukunftsszenarien mit denen des Status Quo der untersuchten Technologie anbietet. Alle adressierten Bedarfe und herausgearbeiteten Einzelerkenntnisse, die in dieser Arbeit als ein idealer Ablauf der Szenarioanalyse zusammengefasst wurden, sind noch nicht in eine gemeinsame pLCA-Methode integriert worden, obwohl eine solche die Entwicklung von Zukunftsszenarien vereinfachen sowie verbessern könnte und folglich Ökobilanzierern als Anleitung zur sukzessiven Nachbildung von zukunftsgerichteten Technologien dienen kann.

Im größeren Kontext der Ökobilanzierung empfehlen Bisinella et al. einen hybriden Ansatz mit der Umrahmung eines Zukunftsszenarios von einer vorgelagerten und nachgelagerten Umweltbewertung (2021). Erste methodische Ansätze zweigeteilter LCA-Modellierungen von zunächst einer standardisierten LCA für ein neuartiges Produktsystem und daraufhin einer prospektiven LCA existieren zwar bereits (Hanesch et al., 2022; Thonemann & Schulte, 2019; Villares et al., 2016; Villares et al., 2017), jedoch ohne eine detaillierte Anleitung der Vorgehensweise. Eine schrittweise Anleitung für Ökobilanzierer zur reinen Durchführung von pLCA ist im SIMPL Ansatz von Langkau et al. gut veranschaulicht (2023), die auf dem Vorgehen von Cucurachi et al. aufbaut (2022) sowie LCA mit der Vorausschaumethode und der Vorgehensweise von Kosow und Gaßner verbindet (2008). Hieraus bietet sich eine Übernahme, Anpassung und Erweiterung von Arbeitsschritten an, um diese mit allen aus dem vorherigen Abschnitt identifizierten Aspekten sowie komplett neuen Aspekten in einer ganzheitlichen Methode zu vereinen. Eine Methodenbeschreibung, die ein ganzheitliches Vorgehen zur Nachbildung von neuartigen und zukunftsgerichteten Technologien in der Sachbilanz inklusive allen Übergängen für die zweifache Umweltbewertung und unter Eliminierung redundanter Bestandteile in einer detaillierten Schritt-für-Schritt Anleitung umfasst, konnte bislang noch nicht gefunden werden. Inwieweit zudem eine Anwendung von pLCA auf Verkehrsmittel erfolgt ist, soll nachfolgend überprüft werden.

---

### 2.1.7 Metastudie zu prospektiver Ökobilanzierung im Verkehrssektor

Das Fehlen einer standardisierten Integration von Szenarioanalyse in LCA hat Ökobilanzierer nicht davon abgehalten, Zukunftsszenarien in der LCA zur Nachbildung für prospektive Umweltwirkungsergebnisse zu verwenden. In einer systematischen Literaturrecherche anhand einer zweiten Metastudie soll abschließend geprüft werden, ob im Forschungsfeld für Verkehrsmittel ein vergleichbares Vorgehen zur Zukunftsentwicklung mittels pLCA existiert und welche Potenziale bzw. Defizite zu berücksichtigen sind, bevor weiterführend auf die Methodenerstellung in dieser Arbeit eingegangen wird. Der Forschungsstand soll anhand der Vorgehensweise der systematischen Literaturrecherche von Abbildung 6 erneut umfassend zu prospektiver Ökobilanzierung im Verkehrssektor untersucht werden, eine Fokussierung auf Flugzeuge wird zwecks geringerer Verbreitung des Vorgehens nicht vorgenommen.

Als Spezifizierung für LCA, welche die Zukunft betrachten, ist der Begriff prospektive LCA verbreitet und wird zur Literaturrecherche in Kombination mit Studien verwendet, die sich mit der Zukunftsmodellierung des Verkehrssektors beschäftigen. Zur Literaturrecherche zukunftsgerichteter Ökobilanzierung im Transportbereich ist die Grobanalyse in Anhang A9 dokumentiert. Diese zweite umfangreiche Recherche mit knapp 2.650 Treffern in den beiden Datenbanken *Web of Science* and *Science Direct* zur Kombination der Suchbegriffe pLCA und Verkehrsmittel ergab lediglich 15 nutzbare Treffer in der ersten Datenbank und sieben Treffer in der zweiten Datenbank. Aufgrund Mehrfachnennung wurden zwei Studien daraus ausgeschlossen. Die Trefferanzahl wurde erweitert via Schneeballsystem oder anderweitig gefundenen Studien zu insgesamt 45 Veröffentlichungen, die in Anhang A10 aufgelistet sind. Für diese wurde eine Feinanalyse durchgeführt und die Rechercheergebnisse der Literatur in standardisierte Überblickskategorien eingeordnet wie in Anhang A11-A13 abgebildet ist. Die daraufhin reduzierten 30 vielversprechendsten Studien wurden im Rahmen der Detailanalyse bezüglich Gemeinsamkeiten der Veröffentlichungen sowie Überschneidungen zur Methodik der Szenarioanalyse untersucht und in Unterkategorien festgehalten. Die Ergebnisse aus den einzelnen Studien sind in Anhang A14-A18 dargestellt. In Abbildung 10 sind in Themenclustern die relevantesten Schlüsselbegriffe und Charakterisierungsmerkmale der vielversprechendsten Studien zur Forschungsmethodik zusammengefasst.

Aus den Analyseergebnissen der festgehaltenen zehn Themencluster ergibt sich, dass neben moderaten, prädiktiven Zukunftsszenarien jedoch meist extremere, explorative Szenarien empfohlen oder angewendet werden, die einen breiteren Möglichkeitsraum der Zukunft abbilden. Fast immer wird mindestens eine BAU Zukunftsentwicklung umgesetzt, die von historischen Trends und gleichbleibenden Mustern ausgeht. Knapp die Hälfte der Studien hat sich mit elektrifizierten Verkehrsmitteln auseinandergesetzt und Dreiviertel haben Transportszenarien berücksichtigt. Zwölf Studien zeigten eine Nutzung von IAM-Szenarien, welche von Experten entwickelt wurden und anerkannte übergeordnete sozioökonomische Entwicklungen darstellen, die in Worst Case bis Best Case Ausprägungen unterschiedliche Betrachtungsjahre und Regionen abbilden. Die häufigste Parametermodifizierung in 70% der Studien ist der zukünftige Strommix, während nur 43% eine materialbasierte Modifizierung der Parameter empfehlen bzw. anwenden. Ein Konsens besteht in allen Studien zur Nutzung und Integration von Zukunftsszenarien in prospektive LCA, jedoch weisen eine transparente Szenarioentwicklung in mehreren Methodenstufen nur 37% der Studien auf. Eine konkrete Beschreibung des entwickelten Szenarios anhand eines individuellen Erzählstrangs wurde ebenfalls nur in fünf Studien aufgegriffen.

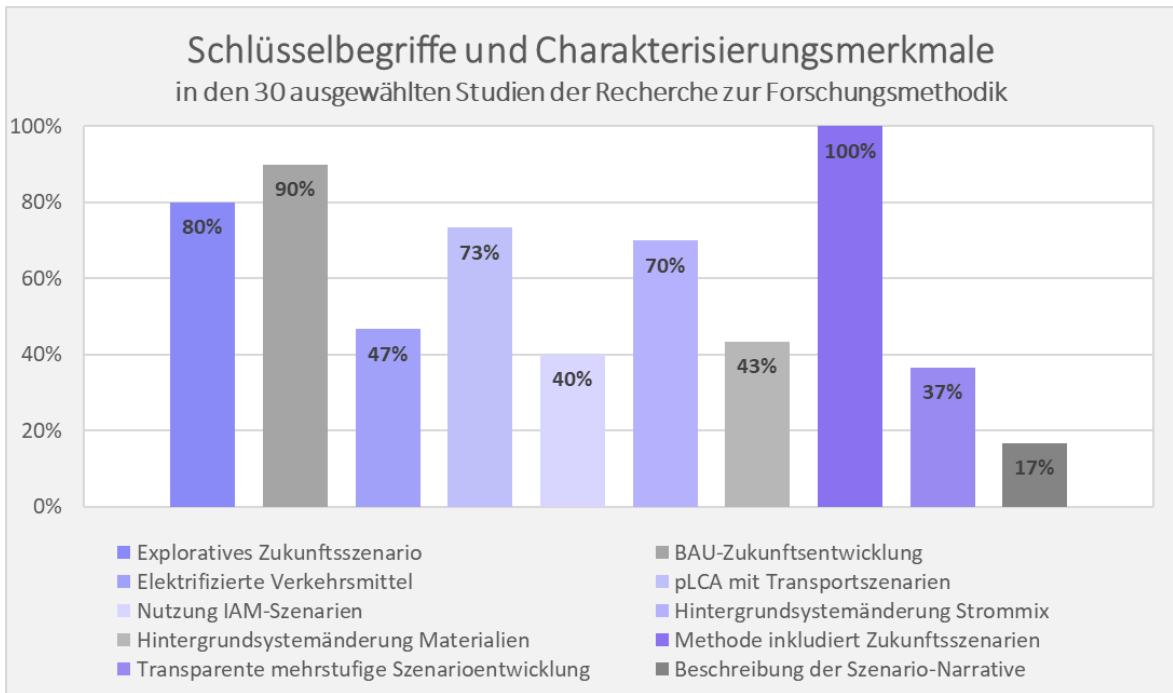


Abbildung 10 Auswertung von Schlüsselbegriffen und Charakterisierungsmerkmalen in den 30 relevantesten Veröffentlichungen der Metastudie zur Forschungsmethode für zukunftsgerichtete LCA von Verkehrsmitteln.

Die Synthese der Hauptinhalte der zweiten Metastudie fasst die wichtigsten Erkenntnisse weiterführend zusammen. Bereits knapp 20 Jahre zuvor zeigten Spielmann et al. auf, dass nicht nur das Vordergrundsystem von konventionellen Verkehrsmitteln, sondern auch ein sie umgebendes Hintergrundsystem anhand einer systematischen Vorgehensweise in der Sachbilanz modifiziert werden muss (2005). Nach einer Technologieveränderung von konventionellem zu neuartigem Verkehrsmittel und der detaillierten Nachbildung der TTS als erstes Veränderungslevel erfolgt im zweiten Level der Technologiefortschritt anhand einem sog. Upscaling. Insbesondere für Zukunftstechnologien, die sich noch in Entwicklung befinden, ist die Hochskalierung auf eine hohe TRL-Stufe mit Lernkurven für technologisches Lernen oder für industrielles Lernen nach TRL 9 mittels Upscaling durchzuführen, um den technologischen Fortschritt abzubilden, bevor sie mit marktreifen Technologien verglichen werden (Pizzol et al., 2021; Thonemann et al., 2020). Als drittes Level muss der Zeitfortschritt für Hintergrundsystemänderungen der umgebenden Märkte berücksichtigt werden (Bergerson et al., 2020). Generische Datensätze aus Datenbanken wie ecoinvent können anhand IAM-Szenarien bezüglich globalen Änderungen in IMAGE oder regionalen Änderungen in REMIND modifiziert werden, Sacchi et al. fassen auf IAM-Szenarien basierende Energiesektorenänderungen und einige weitere Sektorenänderungen des Hintergrundsystems in der prospektiven Datenbank premise zusammen (2022b). Zudem existieren weitere Tools wie FUTURA (Joyce & Björklund, 2022), mit denen uneingeschränkt Hintergrunddaten selber modifiziert und geteilt werden können, da für Ökobilanzierer vielfältige Hintergrundsysteme Relevanz besitzen wie künftige Materialbereitstellungspfade von Edelmetallen (Harpprecht et al., 2021). Materialien haben eine große Bedeutung für die Zukunftsbetrachtung von Verkehrsmitteln und besonders von elektrifizierten Fahrzeugen, sodass ein Bedarf nach materialbasierten Zukunftsannahmen wie Parametermodifizierungen von Abbaukonzentration, Verarbeitungseffizienz und Recyclingraten in mehreren Studien

---

herausgearbeitet wird (Fishman et al., 2021; Koroma et al., 2020; Nordelöf et al., 2014). Dagegen heben andere Studien für Transportszenarien die Verbesserung des Strommix als die wichtigste Zukunftsmaßnahme für das gesamte Produktsystem hervor (Cox et al., 2020; Mendoza Beltran et al., 2020; Rüdüsüli et al., 2022). Neuere Veröffentlichungen integrieren die beiden prospektiven Hintergrundsystemänderungen in eine gemeinsame aufeinander beziehende Modellierung von Rohstoffen und Energie, welche die zwei Kernbausteine der Ökobilanzierung von Transportsystemen darstellen (Dirnaichner et al., 2022; Harpprecht et al., 2021; Sacchi et al., 2022b).

Die zweite Metastudie verdeutlicht, dass zur Durchführung einer pLCA von Verkehrsmitteln Vorgehensweisen zur Szenarioentwicklung fehlen und ein allumfassendes Vorgehen daher noch in keiner der Studien vorhanden und für den weiteren Verlauf der Arbeit zur Anwendung geeignet ist. Zukunftsszenarien inkludieren Unsicherheiten, die mit dem fortgeschrittenen Entwicklungszustand des Produktsystems zu einem späteren Zeitpunkt einhergehen und kenntlichgemacht werden müssen. Es stellt sich heraus, dass die meisten Studien trotz Darstellung von Zukunftsszenarien den Weg dorthin nicht oder nicht hinreichend aufzeigen. Allerdings fokussieren viele Studien nicht auf die Entwicklung einer Methodik, sondern wenden Szenarien lediglich für individuelle Fallstudien an. In ihrer Vorgehensweise, wie pLCA bzw. die Zukunftsszenarien integriert werden, unterscheiden sich die Studien stark voneinander, jedoch hat sich ein Konsens über die Relevanz verschiedener Bereiche wie Szenarien zu Rohstoffen und Energie als Input in die Produktsysteme von Transportsystemen ergeben. Insgesamt fokussieren die Studien hauptsächlich auf prospektive Untersuchungen für den Personentransport in Pkw, Studien zu pLCA von Flugzeugen waren nicht für die Detailanalyse geeignet und fehlen daher im aktuellen Forschungsstand.

Die drei Veränderungslevel des Produktsystems gegenüber dem konventionellen Transport im Status Quo zur Berücksichtigung von erstens einem vollständigen Modell von einer TTS aufgrund einer technologischen Veränderung, zweitens nur von dem Modell im Vordergrundsystem mit einem technologischen Fortschritt und drittens nur von dem Modell im Hintergrundsystem mit einem zeitlichen Fortschritt werden in LCA-Studien üblicherweise nicht separat aufgezeigt. Sie dienen jedoch der Verständniserhöhung von pLCA gegenüber den Unterschieden zur nicht-modifizierten Ausgangslage und sind in eine ganzheitliche Methode mit transparentem Entwicklungsprozess folglich zu integrieren.

Die aus dem Stand der Wissenschaft herausgearbeiteten Ansätze, Herausforderungen und Bedarfe werden im nachfolgenden Kapitel 3 zur Forschungslücke angereichert und in detaillierte Forschungsfragen überführt, um die Vorgehensweise in dieser Arbeit einfürend zu erläutern. Der Aufbau der Forschungsarbeit gliedert sich in die weiteren Arbeitsschritte der Methodenentwicklung in Kapitel 4-6, der Methodenanwendung in Kapitel 7 sowie der abschließenden Diskussion und Schlussfolgerungen in Kapitel 8 und 9.



### **3.1 Herleitung des Forschungsvorhabens aus dem Stand der Wissenschaft**

Aus dem Überblick zur bisherigen Forschung im Stand der Wissenschaft und dem zuvor formulierten Forschungsbestreben soll nun das konkretisierte Forschungsvorhaben dieser Forschungsarbeit ausgebildet werden. Die zwei durchgeführten Metastudien für den Untersuchungsgegenstand neuartiger Flugzeuge und für die methodische Bewertung von Verkehrsmitteln anhand prospektiver Ökobilanzierung führen aus dem vorangegangenen Kapitel zusammen, dass einige Forschungslücken bestehen, welche mit dieser Arbeit zu untersuchen sind. Hierzu sollen in diesem Kapitel die Forschungslücke und die detaillierten Forschungsfragen definiert werden, bevor im Anschluss weiterführend auf die konkrete Forschungsmethodik eingegangen wird.

#### **3.1.1 Forschungslücke aus den untersuchten Studien der Literaturrecherche**

Aus den zuvor identifizierten Ansätzen, Herausforderungen sowie Bedarfen in der Literatur konzentriert sich in den Analyseresultaten der Forschungsbedarf für diese Arbeit zur Forschungslücke. Aus der Analyse des bisherigen Forschungsstandes ergibt sich in der ersten Metastudie die Forschungslücke zur Durchführung einer Ökobilanz für neuartige Flugzeuge nach ISO Norm, da TTS von Flugzeugen bislang kaum entwickelt, erforscht und korrekt umweltbewertet wurden. Die zweite Metastudie demonstriert die Notwendigkeit zur separaten Umsetzung der drei Veränderungslevel technologische Änderung, technologischer Fortschritt und zeitlicher Fortschritt, um zunächst die Technologieentwicklung zum aktuellen Stand und davon separiert die Zukunftsentwicklung des Produktsystems abzubilden. Hieraus soll ein holistisch mehrstufiges Vorgehen zur TTS-Nachbildung für pLCA von Verkehrsmitteln erarbeitet werden, um mit der Szenarioentwicklung nachvollziehbare und vergleichbare pLCA-Ergebnisse unter einer transparenten Darstellung von Zukunftsannahmen zu erreichen.

Ein großer Forschungsbedarf besteht in Bezug auf die Kombination der Forschungsmethoden LCA und Szenarioanalyse zur Nachbildung von Transport-Transformationslösungen aufgrund identifizierter Herausforderungen wie einer Hochskalierung der TTS auf den kommerziellen Maßstab. Eine vollständige Nachbildung trotz Datenlücken für neuartige Verkehrsmittel mit dem Fokus auf eine Energienutzungsveränderung in dieser Arbeit kann unter Rückgriff auf vielfältige Parameter für die Elektromobilität auf Basis von vorhandenem und neu generiertem Wissen erfolgen. Bislang fehlt für die in Entwicklung befindlichen TTS eine Forschungsarbeit zu einer Vorgehensweise, die nicht nur einzelne Komponenten oder ein generisches Fahrzeug nachbildet, sondern das gesamte Fahrzeugmodell nach bestätigtem Machbarkeitsnachweis von TRL 3 trotz fehlender Daten im Rahmen der ISO Norm 14040/14044 modellierbar macht. Um sich detailliert mit der modellbezogenen Nachbildung neuartiger gegenüber konventioneller Fahrzeuge hinsichtlich vergleichbarer Umweltwirkungsergebnisse auseinanderzusetzen, wird der Fokus auf die Sachbilanz gelegt. Folglich soll mit dieser Arbeit die Modellausbildung ab der frühen Technologieentwicklung ermöglicht werden. Das übergeordnete Ziel der Forschungsarbeit ist demnach, Transport-

---

Transformationslösungen im Rahmen der Sachbilanz nachzubilden, um diese für eine Adressierung bestimmter zukünftiger Umweltziele bewerten zu können.

Da die Veränderungslevel mit einem physischen Wechsel der TTS gegenüber dem CT sowie Fortschritt von Vordergrundsystem und Hintergrundsystem des Produktsystems je als Zukunftsveränderung üblicherweise nicht separat berücksichtigt werden, wird für diese daher eine ganzheitliche Methodik mit transparentem Entwicklungsprozess benötigt. Für das erste Level der Technologieentwicklung im aktuellen Zustand empfiehlt sich im Ablauf zur Elektrifizierung neu hinzugekommene Bestandteile wie Batterien fokussiert zu berücksichtigen und in Abgrenzung davon Zukunftsveränderungen umzusetzen. Eine differenzierte Nachbildung für Modelle von zunächst neuartigen und daraufhin zukunftsgerichteten Technologien wird im bisherigen Forschungsstand mit keiner stringenten Separation berücksichtigt, sodass ein ganzheitliches Vorgehen einer Methodenbeschreibung in Form einer detaillierten Schritt-für-Schritt Anleitung fehlt und in einer transparenten Systematik entwickelt werden soll.

Für die Modelle der Fahrzeugalternativen müssen demnach systematisch Zukunftsszenarien entwickelt und integriert werden, um den Pfad der Transformation bereits jetzt abzubilden. Auch konventionelle Verkehrsmittel müssen Zukunftsveränderungen beinhalten, um den gleichen Zustand im finalen Betrachtungsjahr der TTS zu berücksichtigen und diese untereinander vergleichen zu können. Hierfür sollen die identifizierten Gemeinsamkeiten im Methodenkernel der Szenarioanalyse sowie die Einzelerkenntnisse zu pLCA aus vorhandenem Wissen für die Entwicklung eines Vorgehens in dieser Forschungsarbeit weiterführend genutzt werden, da eine standardisierte Vorgehensweise wie die ISO Norm für pLCA noch fehlt. Etablierte Forschungsbausteine aus der Literaturrecherche sollen übertragen und gewinnbringend methodisch erweitert werden, um eine geeignete Vorgehensweise für die zukunftsgerichtete Modellierung von konventionellen und in Entwicklung befindlichen Verkehrsmitteln auszuarbeiten. Hieraus soll insgesamt eine Methode für pLCA von TTS als Framework geschaffen werden.

Die bisherige Forschung zum Untersuchungsgegenstand der Arbeit zeigt auf, dass insgesamt ein großer Forschungsbedarf zu Transformationslösungen im Flugsektor besteht, da sich diese aktuell im Vorentwurf befinden und bis auf Ausnahmen noch nicht die Pilot- bzw. Marktreife erlangt haben. Ökobilanzen von konventionellen Flugzeugen existieren auf einem hohen Niveau der Umsetzung nach ISO Norm, für neuartige Flugzeuge erfolgt jedoch in den wenigsten Fällen eine methodisch korrekte Umweltbewertung. Aufgrund des niedrigen Entwicklungsstandes zumeist im Labormaßstab werden vielfältige parametrisierte Modelle u.a. für elektrifizierte Kleinflugzeuge benötigt, die verschiedene technologische Änderungen wie einen Antriebswechsel bzw. Änderungen am Hüllkörper des Flugzeugs berücksichtigen. Aus dieser Veränderung ist für jedes neuartige Flugzeug eine komplette lebenswegbezogene LCA nach ISO Norm durchzuführen, um erste Aussagen über die Umweltleistung zu treffen. Weiterhin sind zukunftsgerichtete Ökobilanzen im Rahmen einer Durchführung der LCA in Kombination mit Szenarioanalyse notwendig, die sich jedoch bislang hauptsächlich auf den straßenbasierten Transport und dessen Transformationslösungen konzentrieren. Demnach stellt das Forschungsvorhaben dieser Arbeit – eine Erweiterung der Methode der Ökobilanzierung auf neuartige und zukunftsgerichtete Verkehrsmittel sowie eine Anwendung auf TTS im Flugsektor – eine gute Ergänzung des bisherigen Forschungsstandes dar.

---

Demzufolge möchte die Forschungsarbeit alle identifizierten Herausforderungen neuartiger Technologien adressieren und TTS ab der frühen Produktentwicklungsphase modellierbar machen sowie technologischen und zeitlichen Fortschritt in Zukunftsszenarien transparent umsetzen. Alle bislang bekannten methodischen Ansätze der Umsetzung von pLCA auf Verkehrsmittel möchte diese Arbeit zu einer allgemeingültigen Methodik für mittel-skalierte Technologie- und Systementwicklungen von Transportsystemen zusammenführen. Für den Entwicklungsprozess von Technologien und Szenarien soll in dieser Forschungsarbeit demnach ein systematisches Framework vorgestellt werden, mit welchem vollständigere sowie technologisch und zeitlich passgenauere Ergebnisse für eine verbesserte Entscheidungsunterstützung erstellt werden können. Methodisch soll für Ökobilanzierer eine schrittweise Handlungsanleitung bereitgestellt werden, welche die Nachbildung von neuartigen und zukunftsgerichteten Technologien ermöglicht. Praktisch soll der Ansatz für ausgewählte Technologien im Flugsektor erprobt werden.

### **3.1.2 Detaillierte Forschungsfragen für den Untersuchungsrahmen dieser Arbeit**

Um die etablierte Methode der Ökobilanzierung besser auf neuartige und zukunftsgerichtete Verkehrsmittel anwendbar zu machen, wurde die Forschungsfrage dieser Arbeit in Kapitel 1.3.2 formuliert. Als Forschungsziel sind neuartige Transport-Transformationslösungen zukunftsgerichtet zur Umweltbewertung nachzubilden. Für die in dieser Arbeit fokussierte Nachbildung von neuartigen und zukünftigen Verkehrsmitteln dient die zweite Phase der Ökobilanzierung mit der Sachbilanz. Weiterhin soll für den Verkehrssektor bereits jetzt eine Entscheidungsunterstützung zum Erreichen der künftigen Klima- und Nachhaltigkeitsziele gegeben werden. Für diese zukünftige Entscheidungsunterstützung ist die Entwicklung von Zukunftsszenarien unter einer geeigneten Methode notwendig. Schließlich soll mit dem Aufzeigen eines nachhaltigen Transformationsprozesses frühzeitig der Pfad zur tatsächlichen Konformität mit den übergeordneten Zielvorgaben beschrritten werden. Welche Möglichkeiten für einen erfolgreichen Transformationsprozess im Verkehrssektor existieren, soll am Beispiel von elektrifizierten Flugzeugen dargelegt werden.

Das Forschungsziel lässt sich folglich weiter untergliedern in den Untersuchungsgegenstand von neuartigen Transformationslösungen im Verkehrssektor, die zeitliche Perspektive der Zukunftsausrichtung und die praktische Umsetzung für den Flugsektor.

Die detaillierten Forschungsfragen dieser Arbeit lauten:

- 1. Wie kann ein geeignetes Vorgehen zur Nachbildung neuartiger Verkehrsmittelalternativen in der Sachbilanz umgesetzt werden?*
- 2. Wie können Transport-Transformationslösungen unter Berücksichtigung von Fortschritt zukunftsgerichtet modifiziert und hinsichtlich potenzieller Umweltwirkungen bewertet werden, um einen passgenauen Vergleich mit konventionellen Transportsystemen zu ermöglichen?*
- 3. Welche Spezifizierungen ergeben sich für Transformationslösungen im Flugsektor und welche Ergebnisse können mit der Elektrifizierung eines Kleinflugzeugs für den Transformationsprozess erzeugt werden?*



---

Aus den detaillierten Forschungsfragen, die für das zuvor beschriebene Vorgehen der Arbeit aufgestellt wurden, konkretisiert sich die Vorgehensweise in dieser Forschungsarbeit. Zunächst wird sich im theoretischen Teil der Methodenentwicklung mit konventionellen Verkehrsmitteln und daraufhin mit deren technologischer Veränderung aufgrund einer Elektrifizierung hin zu neuartigen Verkehrsmitteln beschäftigt, die als erste methodische Erweiterung in einer ex-ante Sachbilanz (eLCI, ex-ante life cycle inventory analysis) nachgebildet werden sollen. Daraufhin werden in dem neuen Vorgehen neben der technologischen Änderung der Verkehrsmittel Zukunftsveränderungen berücksichtigt, um alle Produktsysteme als zweite methodische Erweiterung in einer prospektiven Sachbilanz (pLCI, prospective life cycle inventory analysis) erneut modifiziert nachzubilden. Für diese Modelle von konventionellen und neuartigen Verkehrsmitteln ist aufgrund integriertem technologischen und zeitlichen Fortschritt für denselben Zeithorizont eine Vergleichbarkeit untereinander gewährleistet. Das zu erarbeitende Vorgehen zum Erhalt einer ganzheitlichen Methodik in der zweiten Phase der Sachbilanz innerhalb der Ökobilanzierung soll zur Quantifizierung künftiger Auswirkungen bezüglich Klimawandel, Humangesundheit und Rohstoffnutzung die anschließende Umweltbewertung in Präzision und Passgenauigkeit erhöhen. Der praktische Teil der Methodenentwicklung befasst sich mit der konkreten Mobilitätsart des flugbasierten Personentransports im Kurzstreckensegment. Das Verkehrsmittel Flugzeug eignet sich aufgrund des geringen Forschungsstands am meisten, zudem können Ergebnisse für Verkehrsmittel auf niedrigem TRL auch für Verkehrsmittel auf höherem TRL angewendet werden. Für das Anwendungsbeispiel eines Kleinflugzeugs werden mehrere TTS auf Basis einer Elektrifizierung nachgebildet und bewertet.

Die Vorgehensweise der Arbeit umfasst zunächst eine explizite Auseinandersetzung mit der Nachbildung etablierter Verkehrsmittel in der standardisierten Nachhaltigkeitsmethode der Ökobilanzierung, um diese daraufhin als erste Erweiterung auf neuartige Verkehrsmittel anzupassen und sie abschließend als zweite Erweiterung mit der Vorausschaumethode der Szenarioanalyse zu verbinden. Aus dem etablierten Vorgehen der Szenarioanalyse werden nur die drei Kernstufen Identifizierung von Schlüsselfaktoren, Erarbeitung von Zukunftsannahmen und Festlegung von Zukunftsszenarien in die Phase der Sachbilanz integriert. Die vorgelagerte Stufe der Rahmung entspricht weitgehend dem Vorgehen in der ersten Phase der Ökobilanzierung und benötigt keine weitere Anpassung. Die nachgelagerte Stufe der Ergebnis-Kommunikation kann der dritten sowie vierten Phase zugeordnet werden und wird in dieser Arbeit ebenfalls nicht im Detail betrachtet. Demnach werden die mittleren drei Kernstufen als Hauptstufen der pLCI in die Arbeit übernommen, da in der Sachbilanz das größte Potenzial für Veränderungen besteht und die drei anderen Phasen der LCA außerhalb des Betrachtungsbereichs liegen.

### **3.2 Konkretes Forschungsvorhaben in dieser Arbeit**

Im Forschungsvorhaben der erweiterten Ökobilanzierung soll ein Framework für neuartige und zukunftsgerichtete Technologien im Verkehrssektor entwickelt werden. Der Bedarf zur Erweiterung für die Methode der Ökobilanzierung ergibt sich in der zweiten Phase. In dieser LCI sollen für Produktsysteme der Eigenschaften *etabliert* oder *in Entwicklung befindlich* bzw. *zukunftsgerichtet*, nachfolgend als ex-post oder ex-ante bzw. prospektiv bezeichnet, auf unterschiedliche Weise qualitative, quantitative sowie verrechnete Informationen zur

---

Modellausbildung berücksichtigt werden, um nach den sukzessive zu integrierenden drei Veränderungslevel zum Abschluss differenzierte Modelle für die nachgelagerte Umweltbewertung zu erhalten. Diese Erweiterung der Sachbilanz soll die bislang erschwerte Umweltbewertung von neuartigen Technologien als Transport-Transformationslösungen unterstützen. Für diese ex-ante Produktsysteme dienen etablierte ex-post Produktsysteme als Vergleichsbasis, wobei abschließend im Rahmen einer pLCA für alle diese Technologien Zukunftsentwicklungen nachzubilden sind, um nicht ausschließlich die nicht-modifizierte Technologieentwicklung im aktuellen Zustand zu berücksichtigen.

Das Framework umfasst drei methodische Bestandteile in der Sachbilanz. Der erste Methodenbestandteil soll in der ex-post Sachbilanz in einem ausgebildeten Transportmodell münden, in welchem die Nachbildung eines konventionellen Fahrzeugs als Grundlage für eine parametrisiert entwickelte Sachbilanz von CT im Verkehrssektor dargestellt ist. Der zweite Methodenbestandteil hat zum Ziel, für die aktuelle Technologieentwicklung eine detaillierte Nachbildung von TTS zu ermöglichen, um zu einem kompletten Modell für die technologische Veränderung zu gelangen. Im Rahmen der ex-ante Sachbilanz soll ein Transformationsmodell ausgebildet werden, in welchem die Entwicklung eines neuartigen Fahrzeugmodells auf Basis des Transportmodells für eine technologisch vollständige Repräsentation von TTS enthalten ist. Der dritte Methodenbestandteil verfolgt das Ziel, ein bzw. mehrere Zukunftsszenarien auf Basis einer schrittweisen und transparenten Anleitung für Zukunftsentwicklungen auszubilden, um passgenauere Sachbilanz-Ergebnisse nach gleichermaßen erfolgtem technologischen und zeitlichen Fortschritt bereitzustellen. Hierzu sollen in der prospektiven Sachbilanz Zukunftsveränderungsmodelle ausgebildet werden, die zur Entwicklung zukünftiger Modellnachbildungen auf Basis des Transportmodells bzw. des Transformationsmodells dienen, um zum Abschluss eine technologisch und zeitlich korrekte Repräsentation des CT bzw. der TTS zu ermöglichen.

Zunächst wird die standardisierte Vorgehensweise der ex-post Sachbilanz unter den konkreten Herausforderungen für das neue Framework vorgestellt und daraufhin die neue Vorgehensweise in dieser Arbeit anhand der einzelnen Framework-Bestandteile als Erweiterung dargelegt.

### **3.2.1 Vorgehen, Herausforderungen und Erweiterung der ex-post Sachbilanz**

Die standardisierte ISO Norm 14040/14044 gibt einen klaren Ablauf zur Umsetzung einer Ökobilanz in vier Phasen vor. Übergeordnet wird dieser in Abbildung 11 in den vier Phasen Ziel und Untersuchungsrahmen, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung und Auswertung sowie relevanten Vorgehensbestandteilen dargestellt. In dieser visualisierten LCA-Methode sind bereits die beiden neu zu integrierenden Bestandteile ex-ante Sachbilanz und prospektive Sachbilanz berücksichtigt, auf die im Verlauf dieser Arbeit im Detail eingegangen werden soll. In der theoretischen Methodenentwicklung und der praktischen Methodenentwicklung dieser Forschungsarbeit liegt der Fokus auf der Sachbilanz als Fundament für die Erzeugung von Umweltwirkungsergebnissen, folglich wird in der Arbeit keine vollständige Ökobilanz nach ISO Norm aufgezeigt.

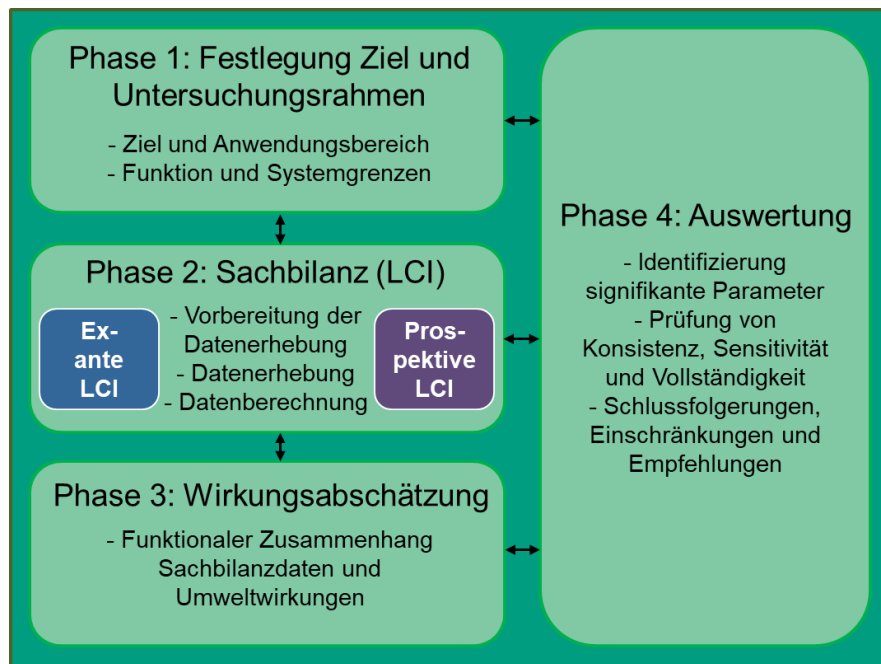


Abbildung 11 Vier Phasen der Ökobilanz mit den zwei LCI-Erweiterungen (in Anlehnung an DIN EN ISO 14040).

In der zweiten Phase der Sachbilanz, die für etablierte ex-post Produktsysteme retrospektiv mit vorhandenen Daten aus der Vergangenheit durchzuführen ist, wird das Kernvorgehen der Ökobilanz erarbeitet, das von größter Relevanz und Aufwand ist. Die LCI umfasst in der ersten Stufe die Vorbereitung der Datenerhebung zur Beschreibung des Produktsystems, in der zweiten Stufe die Datenerhebung für den Datenbeschaffungsprozess und in der dritten Stufe die Datenberechnung zur Quantifizierung des Produktsystems. Diese wesentlichen Arbeitsschritte in der LCI werden durch weitere Verfahrensstufen wie die Datenvalidierung oder Allokation ergänzt, die außerhalb des Veränderungsbestrebens dieser Arbeit liegen und daher nicht genauer betrachtet werden. Auf das übergeordnete Ziel der Sachbilanz, „die Quantifizierung relevanter Input- und Outputflüsse eines Produktsystems“ (DIN EN ISO 14040), haben die drei benannten Kernstufen der LCI einen hauptsächlichen Einfluss. Als erste Maßnahme der ersten Stufe sind die im Produktsystem enthaltenen Prozesse in einem graphischen Systemfließbild festzuhalten, zudem müssen die Prozesse und enthaltenen Prozessmodule genau beschrieben werden. Für diese Prozesse werden in der zweiten Stufe Daten erhoben, um deren Input- und Outputflüsse zu bestimmen. Die Erfassung von Energie- und Masseströmen in den Prozessen des Vordergrundsystems sowie deren verknüpfte Datensätze im Hintergrundsystem müssen in Datenerhebungsblättern festgehalten werden. Weiterhin sind Datenerhebungsverfahren sowie Datenreferenzen bzw. durchgeführte Berechnungsverfahren zu benennen. In der dritten Stufe endet die Berechnung des Produktsystems mit der Normierung auf die funktionelle Einheit, woraus als Ergebnis die quantifizierten Flüsse des Produktsystems an die dritte Phase der Wirkungsabschätzung übertragen werden können. Zur Datenvalidierung sind eine Bewertung der Datenqualität durchzuführen sowie der Umgang mit fehlenden Daten und bei Mehrproduktprozessen zudem die einheitlich angewendeten Allokationsverfahren darzulegen. (DIN EN ISO 14044)

Aus dem standardisierten Verfahren lassen sich allgemeine Herausforderungen für neuartige und zukunftsgerichtete Technologien entnehmen, für die Lösungsvorschläge als konkrete Vorgehensweise in der eLCI und pLCI vorgestellt werden sollen.

---

Die ISO Norm gibt vor, dass im Datenbeschaffungsprozess genaue Energie- und Masseströme zu erfassen sind, jedoch sind diese bei neuartigen Technologien teilweise noch unbekannt. Auch liegen keine gesicherten Werte für die Zukunftsbetrachtung vor, für welche die vorhandenen Daten des Status Quo zusätzlich modifiziert werden müssen. Für die Produktsysteme sollten keine Daten zur Modellierung fehlen, außer es kann eine geringe Relevanz nachgewiesen werden. Daher liegt das erste Erweiterungspotenzial in einem Umgang mit fehlenden Daten für das neuartige Produktsystem bzw. mit modifizierten Fortschrittsdaten für das zukunftsgerichtete Produktsystem. Die Ökobilanzierung neuartiger Technologien lässt sich mit diversifizierten Datengenerierungstechniken ermöglichen, um geeignete Daten zu erzeugen. Auch kann sich für Komponenten bei bekanntem Gewicht mit prozentualen Verteilungen der wichtigsten Materialien an die zur Vollständigkeit benötigten Masseströme angenähert werden. Die Energie- und Masseströme für prospektive Ökobilanzen können bestimmt werden, indem diese mittels Datenmodifikationstechniken beispielsweise mit Prozentangaben vom Parameterwert der Ausgangslage variiert werden.

Weiterhin besteht eine Problematik der ISO Norm darin, dass in der Gegenüberstellung zur etablierten Technologie stets die gleichen Prozesse und Lebensphasen bei der neuartigen Technologie betrachtet werden müssen. Auch für zukunftsveränderte Input- und Outputflüsse sollten die gleichen Prozessmodule in allen Produktsystemen modifiziert werden, um für einen daran anschließenden Vergleich dasselbe Set an quantifizierten Flüssen zu bewerten. Ein weiteres Erweiterungspotenzial besteht demnach in einer Gewährleistung von vergleichbaren Systemgrenzen, welche mit der eLCI noch nicht, jedoch mit der durchgeführten pLCI erreicht werden können. Stellt die neuartige Technologie eine Erweiterung der konventionellen Technologie dar, kann sich bei der Datenbeschaffung auf die physische Erweiterung fokussiert werden und Daten der gleichen Komponenten übernommen werden. Stellt die Veränderung beispielsweise eine Erweiterung des Antriebsstrangs dar, können baugleiche Komponenten vernachlässigt und von der Vergleichstechnologie als gleiche Parameter bzw. als identische Werte übertragen werden. Für die Zukunftsentwicklung ist darauf zu achten, dass alle Technologien nur hinsichtlich relevanter Aspekte zu verändern sind und den gleichen technologischen und zeitlichen Anwendungsbereich der Studie abbilden, sodass bei gleichartigen Komponenten derselbe Fortschritt angenommen wird. Zukunftsannahmen sollten bestenfalls mit einem Experten oder einer Expertengruppe diskutiert und überprüft werden. Weitere Herausforderungen wurden im Stand der Wissenschaft identifiziert, die es in dieser Arbeit zu lösen gilt.

Aus dem Stand der Wissenschaft können *ex-ante* als erster Begriff in Bezug auf eine in Entwicklung befindliche Veränderungsmaßnahme zu der etablierten Technologie und *prospektiv* als zweiter Begriff in Bezug auf eine zukunftsgerichtete Erweiterung der bisherigen Technologiebewertung herausgearbeitet werden. Die Literaturdefinition für die eLCI als zweiter Methodenbestandteil ergibt sich laut van der Giesen et al. und besagt, dass „der Begriff *ex-ante* für die Umweltbewertung der LCA von einer neuen Technologie vor kommerzieller Implementierung für Forschungs- und Entwicklungsentscheidungen steht zur ökologischen Konkurrenzfähigkeit gegenüber dem vorherrschenden Technologiemix [...], die Nutzung des Begriffs *ex-ante* verdeutlicht eine durchgeführte Bewertung vor der Markteinführung der Technologie“ (2020). Die Literaturdefinition für die pLCI als dritter Methodenbestandteil unterscheidet sich von der vorherigen Definition, indem „eine prospektive LCA auch für eine etablierte Technologie durchgeführt werden kann, um die

---

Umweltwirkungen in einer definierten Zukunft zu ermitteln“ (van der Giesen et al., 2020). Arvidsson et al. fassen zusammen, dass „eine LCA prospektiv ist, wenn eine (neuartige) Technologie sich in einer frühen Phase der Entwicklung (z.B. klein-skalierte Produktion) befindet, aber die Technologie in einer zukünftigen, mehr-entwickelten Phase (z.B. hochskalierte Produktion) modelliert wird“ (2018).

Diese Differenzierung wird nachfolgend in zwei eigenen Definitionen zusammengefasst. Die Vorgehensweise soll in den zwei Bestandteilen eLCI und pLCI jeweils als Erweiterung der ISO Norm zunächst vorgestellt und daraufhin näher erläutert werden.

In der neuartigen LCA-Erweiterung der ex-ante Sachbilanz wird eine neuartige Technologie in einer retrospektiven Ökobilanzierung vollständig im Referenzzustand bewertet, zwar in einer frühen Phase der Produktentwicklung vor der Markteinführung, jedoch mit der quantitativen Nachbildung aller veränderter und gleichgebliebener Prozesse des Produktsystems anhand Datengenerierungstechniken, die zur Gegenüberstellung mit etablierten Produktsystemen notwendig sind. Das Vorgehen in der eLCI erfolgt strukturiert auf Basis einer systematischen Typologie für neuartige Verkehrsmittel, um ein vollständiges Modell des Produktsystems in allen Lebensphasen wie die konventionelle Technologie nachzubilden. Es stellt die erste nachgelagerte Erweiterung der ex-post Sachbilanz dar und basiert auf einer Parameter-Generierung für das noch in Entwicklung befindliche Produktsystem. Die Umsetzung der eLCI im Rahmen der Ökobilanzierung berücksichtigt zwar die Vollständigkeit der Daten, jedoch die technologische und zeitliche Repräsentativität der Daten der Transport-Transformationslösung noch nicht hinreichend und ermöglicht eine Umweltbewertung in einer retrospektiven Ökobilanz für den Referenzzustand, aus der noch kein Vergleich zum konventionellen Transportsystem erfolgt.

In der zukunftsgerichteten LCA-Erweiterung der prospektiven Sachbilanz wird die neuartige Technologie ebenso wie die etablierte Technologie in einer prospektiven Ökobilanzierung passgenau im Zukunftszustand bewertet, indem konsistente Zukunftsveränderungen für alle Produktsysteme und ihre Systemumgebung abgebildet werden. Für einen aussagekräftigen Vergleich wird die neuartige Technologie zudem in einem Zustand der abgeschlossenen technologischen Reife nach erfolgtem Markteintritt modelliert. Das Vorgehen in der pLCI erfolgt strukturiert auf Basis einer übergeordneten Charakterisierung für zukunftsgerichtete Veränderungen, um in einer transparenten Vorgehensweise mit Zukunftsszenarien die konventionellen und neuartigen Verkehrsmittel in prospektiven Modellen zur Bewertung in einem Vergleichszustand nachzubilden. Es stellt die zweite nachgelagerte Erweiterung der ex-post Sachbilanz dar und basiert auf einer Parameter-Modifizierung für alle betrachteten Produktsysteme. Die Umsetzung der pLCI im Rahmen der Ökobilanzierung berücksichtigt die technologische und zeitliche Repräsentativität der Daten aller Produktsysteme und deren Systemumgebung hinreichend und ermöglicht eine Umweltbewertung in einer prospektiven Ökobilanz für einen Zukunftszustand bzw. für mehrere Zukunftszustände, aus dem jeweils ein Vergleich zwischen den Verkehrsmitteln erfolgen kann.

Die beiden Bestandteile der eLCI und pLCI werden jeweils in die zweite Phase der Sachbilanz mit systematisch durchzuführenden Schritten zur Nachbildung integriert und im Verlauf der Arbeit im Detail vorgestellt. Dies soll als Grundlage für die korrekte Modellierung von neuartigen und zukunftsgerichteten Verkehrsmitteln zur Umweltbewertung in den drei Wirkungsbereichen Klimawandel, Humangesundheit und Rohstoffnutzung dienen. Das Vorgehen ist in Abbildung 12 zusammengefasst und wird nachfolgend näher erläutert.



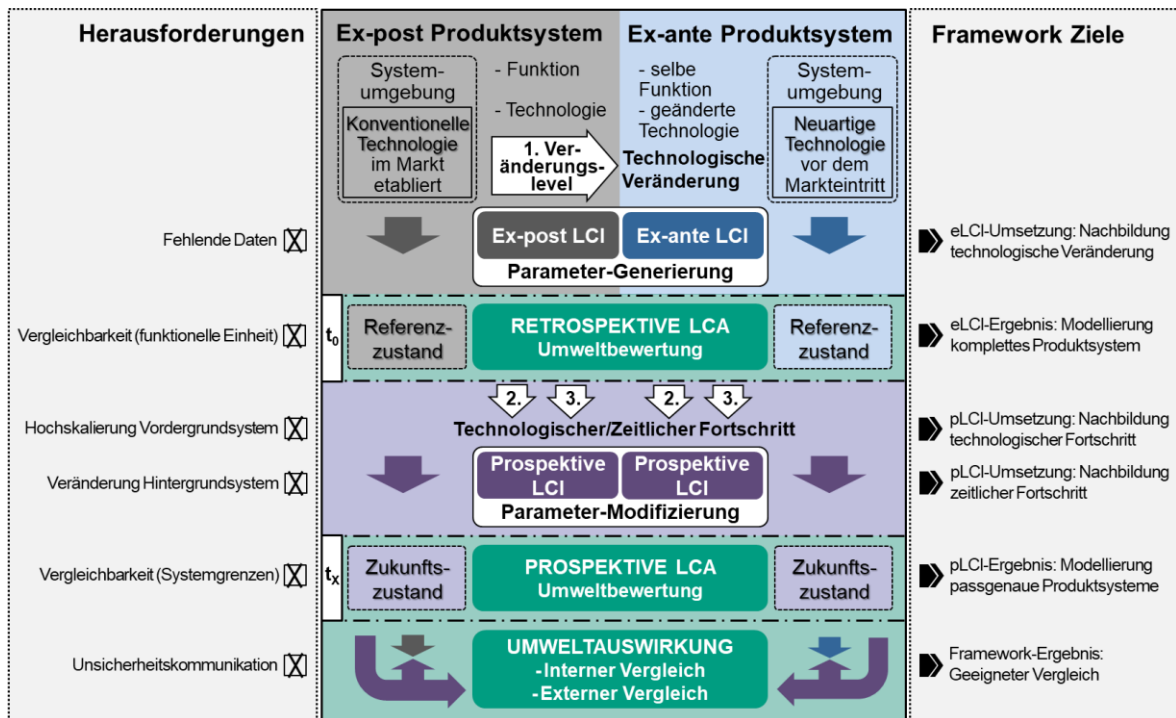


Abbildung 12 Methodischer Überblick und Einordnung der Bestandteile LCI, eLCI und pLCI im Framework.

### 3.2.2 Vorstellung der konkreten Bestandteile des Forschungsvorhabens

Für eine Nachbildung von Sachbilanz-Modellen zur Bewertung der neuartigen und zukunftsgerichteten Verkehrsmittel im Spannungsfeld von Veränderungen zeigt der Stand der Forschung kein klar abgegrenztes Vorgehen für in Entwicklung befindliche TTS und auf Szenarioanalyse basierende Zukunftsszenarien. Abbildung 12 ordnet die Herausforderungen für TTS von fehlenden Daten, Vergleichbarkeit, Hochskalierung, Hintergrundveränderungen und Unsicherheitskommunikation in die Methodik der Arbeit ein, um das Vorgehen der ISO Norm in der zweiten Phase der ex-post Sachbilanz mit einem integrierten Framework zu ergänzen. Das Framework zeigt eine systematische Technologie- und Szenarioentwicklung als holistische LCA-Methode zur Erweiterung der LCI, indem die separate Nachbildung mit der ex-ante Sachbilanz von Technologieveränderungen im Status Quo und der prospektiven Sachbilanz von Zukunftsveränderungen im abweichenden Betrachtungszeitpunkt erfolgt. Der Begriff *Generierung* steht für etwas Neues erschaffen wie ein anderes Fahrzeug, der Begriff *Modifizierung* steht demgegenüber für etwas Vorhandenes verändern wie ein verbessertes Fahrzeug. Die neuen Bestandteile der eLCI und pLCI sollen alle identifizierten Herausforderungen adressieren und Lösungen zur geeigneteren Umsetzung erarbeiten.

Mit den LCI-Modellen konventioneller Verkehrsmittel im Referenzzustand werden Modelle neuartiger Verkehrsmittel gleicher Funktion generiert, um daraufhin die Modelle von TTS im gleichen Zukunftszustand wie CT zu modifizieren. Eine vollständige Nachbildung von TTS mit retrospektiver LCA in der eLCI erfolgt, indem die frühe Entwicklungsphase mit technologischen Veränderungen gegenüber dem CT mittels Parameter-Generierung für alle Parameter der TTS umgesetzt wird, jedoch ohne eine zukunftsgerichtete Änderung an den Daten. Aus eLCI-Modellen nicht-modifizierter Daten lassen sich Umweltwirkungsergebnisse im Referenzzustand erzeugen und vielfältige Zukunftsszenarien entwickeln. Der Referenzzustand bildet als Status Quo die Ausgangslage ab, für den bei fehlender Marktreife

---

noch kein bewertender Vergleich zu marktreifen Technologien durchzuführen ist. Daraus folgt, dass nach dem ersten Veränderungslevel der TTS in der eLCI ein technologischer bzw. zeitlicher Fortschritt aller Technologien methodisch betrachtet werden muss, sowohl für das Vordergrundsystem als zweites Veränderungslevel als auch für das Hintergrundsystem als drittes Veränderungslevel. Eine passgenaue zukunftsgerichtete Nachbildung von CT und TTS in technologischer Reife wird mittels Parameter-Modifizierung für technologisch und zeitlich fortgeschrittene Daten zu ausgewählten Parametern in der pLCI mit dem zukünftigen Fortschritt aller Produktsysteme und ihrer Systemumgebung erreicht. Aus pLCI-Modellen modifizierter Daten können anhand von Zukunftsszenarien vielfältige Zukunftszustände gezeigt und Vergleiche innerhalb und zwischen den Verkehrsmitteln durchgeführt werden. Jeder ökobilanzielle Vergleich erfolgt somit für einen festgelegten Zeitpunkt, für den zuvor ein Referenzzustand und ein bzw. mehrere Vergleichszustände in der Zukunft definiert worden sind. Die Vergleichszustände beinhalten modifizierte Daten in der Zukunft, die aus ein bzw. mehreren Zukunftsszenarien kombiniert werden. Die Resultate im Zukunftszustand sind mit anderen Resultaten im gleichen Zukunftszustand vergleichbar oder können dem Referenzzustand zur Darstellung von Veränderungen gegenübergestellt werden. Daher ist zur Durchführung der lebenswegbezogenen Ökobilanz die Umweltbewertung stets in zwei Zeitzuständen umzusetzen. Hieraus sollen Empfehlungen zur Entscheidungsunterstützung gegeben werden, welche Technologie im spezifischen Zukunftsbild die beste Umweltleistung ermöglicht und weiter erforscht sowie eingesetzt werden sollte.

Aus dem Forschungsmethoden-Überblick zur Herausbildung der Methodik ergibt sich das übergeordnete Framework einer dreigeteilten Sachbilanz in die LCI, eLCI und pLCI sowie einer zweigeteilten Umweltbewertung in die LCA und pLCA. Aus dieser Vorgehensabfolge insgesamt entsteht eine detaillierte dreigeteilte Anleitung, für die zur Methodenumsetzung differenzierte Techniken benötigt werden.

Die ex-post Nachbildung eines Fahrzeugs in der LCI soll als Methodenziel aufzeigen, mit welcher Vorgehensweise ein konventionelles Fahrzeug für die Quantifizierung von Flüssen nachgebildet werden kann. Dies stellt das etablierte, standardisierte Vorgehen von Vorbereitung der Datenerhebung, Datenerhebung und Datenberechnung mit gewöhnlichen Standard-Parametern dar. Die ex-post Sachbilanz zeigt zunächst die generelle Nachbildung von einer konventionellen Technologie eines bestimmten Mobilitätstyps und Mobilitätszwecks zur Umsetzung der Sachbilanz nach ISO Norm. Es wird ein Transportmodell gebildet, das für die spezifische Transportfunktion alle Prozesse, Parameter und Flüsse und deren quantitative Werte enthält. Die Modellausbildung von konventionellem Transport erfolgt in einer parametrisierten LCA für alle Lebensphasen des Verkehrsmittels zur Erleichterung eines späteren Prozessaustauschs. Das Ergebnis der LCI stellt ein Gesamtflussinventar dar, welches bezogen auf die funktionelle Einheit alle quantifizierten Flüsse des Transportmodells bereitstellt. Dieses wird zum Abschluss der Sachbilanz zur Ermittlung der Umweltwirkungen für den Referenzzustand des CT erzeugt. Im Anschluss wird die erste Iteration der Sachbilanz für die ex-ante Sachbilanz durchgeführt.

Die ex-ante Nachbildung einer physischen Fahrzeug-Veränderung in der eLCI berücksichtigt als zweites Methodenziel, mit welcher Vorgehensweise ein neuartiges Fahrzeug für die Quantifizierung von Flüssen nachgebildet werden kann. Dies stellt das erste neu entwickelte Vorgehen mit neuen Transformations-Parametern dar. Die ex-ante Sachbilanz setzt eine generelle Nachbildung der Transport-Transformationslösung bzw. verschiedener neuartiger



---

Varianten mit derselben Transportfunktion im Mobilitätsfeld um, jedoch mit der Unterscheidung des Transformationstyps, einer Energienutzungsveränderung als Elektrifizierung. Wiederum in einem dreistufigen Vorgehen wie die ex-post Sachbilanz erfolgt die eLCI-Nachbildung für TTS basierend auf Bestandteilen des CT zunächst in einer qualitativen Ausbildung, daraufhin in der Generierung von Daten für alle veränderten und neuen Parameter und abschließend in der quantitativen Nachbildung unter Aufzeigen aller Unterschiede gegenüber der LCI und pLCI. Es wird das erste Level der Veränderung zum konventionellen Transport analysiert und der Datenbedarf festgelegt, um für die Veränderung die Datenaufnahme anhand von Datengenerierungstechniken umzusetzen. Die spezifische Modellausbildung des neuartigen Produktsystems wird in einer Erweiterung der parametrisierten LCI durchgeführt und für die TTS alle zusätzlichen bzw. in ihren Flüssen veränderten Prozesse integriert. Das Gesamtflussinventar, bezogen auf die FU, wird mit Abschluss der eLCI neu erzeugt zur Ermittlung der Umweltwirkungen für den Referenzzustand der TTS. Das erste Ziel der LCA-Erweiterung zur vollständigen Nachbildung im ersten Veränderungslevel ist mit dem finalen Umweltwirkungsergebnis für die retrospektive LCA erreicht. Aus dem zuvor ausgebildeten Transportmodell kann in der eLCI auf Basis aller veränderten Komponenten die Erweiterung zu einem Transformationsmodell umgesetzt werden, um technisch machbare TTS zu modellieren. Die technologisch vollständige Repräsentation der TTS kann in dem Aufwand für die Nachbildung aufgrund des Rückgriffs auf bereits vorhandene Prozesse und Daten reduziert werden. Im abgeschlossenen Zustand enthält die eLCI alle Daten in nicht-modifizierter Form, die intern für weitere Modelle und extern in anderen LCA-Studien unter der Voraussetzung einer transparenten Dokumentation genutzt werden können. Alle weiteren Veränderungen, die mit der Modifizierung dieser erzeugten Daten einhergehen, werden separat behandelt, da sie aufgrund einer nachträglichen Veränderung der zuvor gesammelten Primär- und Sekundärdaten eine höhere Unsicherheit aufweisen. Zum Abschluss erfolgt die zweite Iteration der Sachbilanz für die prospektive Sachbilanz.

Die prospektive Nachbildung von Zukunftsveränderungen in der pLCI forciert als drittes Methodenziel, mit welcher Vorgehensweise ein zukunftsgerichtetes Fahrzeug für die Quantifizierung von Flüssen nachgebildet werden kann. Dies stellt das zweite entwickelte Vorgehen mit zukunftsveränderten Inventar-Parametern dar, um passgenaue prospektive Modelle aller betrachteten Produktsysteme ohne zeitliche Inkongruenz für ein bestimmtes Betrachtungsjahr zu erzeugen. Diese Modellausbildung kann ermöglicht werden anhand der Auswahl aus den drei Szenariotypen prädiktiv, für kurze Zeithorizonte und der Darstellung, was wird geschehen, explorativ bzw. normativ, jeweils für längere Zeithorizonte und der Darstellung, was kann geschehen bzw. wie kann ein bestimmtes Ziel erreicht werden. Die dreistufige pLCI-Nachbildung für Zukunftsszenarien aller Technologien im gleichen Zeithorizont basiert auf den signifikantesten Bestandteilen der LCI und eLCI. Sie wird in neun untergeordneten Schritten iterativ umgesetzt zunächst in einer qualitativen Untersuchung der Parameter zum Modifikationsbedarf, daraufhin in der Modifizierung der Parameter für Zukunftsannahmen und abschließend in der quantitativen Nachbildung unter konsistenten und kommunizierten Szenarien. Die pLCA stellt die generelle Modifizierung von relevanten Parametern aus der LCI für die konventionelle Technologie und der eLCI für die neuartige Technologie dar, für die neue Datenmodifikationstechniken anzuwenden sind, um die Veränderungen abzubilden. Es sind alle Zukunftsveränderungen der konventionellen Technologie für das Vordergrundsystem zu integrieren, um zur Gegenüberstellung den

---

gleichen technologischen Fortschritt abzubilden. Auch ist für die neuartige Technologie der technologische Fortschritt von einem höheren Reifegrad zu berücksichtigen, um im Modell den Zeitpunkt des Erreichens der Marktetablierung korrekt abzubilden. Abschließend müssen sowohl für die neuartige Technologie als auch für die konventionelle Technologie der zeitliche Fortschritt im Hintergrundsystem hinsichtlich der Zukunftsbetrachtung für den jeweiligen Szenariotyp abgebildet werden, um daraus mindestens ein differenzierbares Zukunftsszenario auszubilden, das mit den Ergebnissen im Referenzzustand oder untereinander verglichen werden kann. Die spezifische Modellausbildung der prospektiven Produktsysteme wird in einer letzten Erweiterung der parametrisierten LCI umgesetzt und für alle Zukunftsszenarien sowie inhärenten geänderten Parameter jeweils pro Szenario und Technologie ein zukunftsverändertes Gesamtflussinventar erzeugt zur Ermittlung der Umweltwirkungen für einen Zukunftszustand bzw. für mehrere Zukunftszustände jeweils von CT und TTS. Das zweite Ziel der LCA-Erweiterung für eine technologisch und zeitlich korrekte Nachbildung im zweiten und dritten Veränderungslevel ist mit den Ergebnissen für den Zukunftszustand in der prospektiven LCA erreicht. Aus der zukunftsgerichteten Umweltbewertung von technisch möglichen TTS sowie CT kann anhand ausgewählter Veränderungen ein jeweiliges Zukunftsveränderungsmodell ausgebildet werden, um passgenaue TTS und CT für den Vergleich zu modellieren. Die technologisch und zeitlich korrekte Repräsentation von TTS und CT kann in dem Aufwand für die Nachbildung aufgrund der Auswahl einiger relevanter Parameter und deren Modifizierung in einer bzw. in wenigen Ausprägungen begrenzt werden. Das abschließende Ergebnis der pLCI sollte unter Angabe der inhärenten Unsicherheiten weitergenutzt und kommuniziert werden, um Aussagen bezüglich einer nachhaltigen Mobilität in der Zukunft treffen zu können.

Eine Bewertung von in Entwicklung befindlichen Verkehrsmitteln sollte in den Modellen stets diese beiden Bestandteile der Parameter-Generierung und Parameter-Modifizierung beinhalten, um Fehlinterpretationen bezüglich der ökologischen Vorteilhaftigkeit zu vermeiden und den in einer noch nicht abgeschlossenen Entwicklung befindlichen Untersuchungsgegenstand vollständig und umfassend korrekt abzubilden. Neben dem auf die Sachbilanz zugeschnittenen Vorgehen in den drei Methodenteilen existieren für die eLCI und pLCI jeweils eine vorgelagerte und nachgelagerte Stufe, die den Phasen eins bzw. drei und vier des standardisierten Vorgehens der ISO Norm zugeordnet und darin integriert werden können. Sie umrahmen den Fokus der Methodenentwicklung, welche übergeordnet eine Parameter-Identifizierung, eine Parameter-Erarbeitung und eine Fluss-Bestimmung darstellt. Um das Framework im Detail zu erarbeiten, benötigt es jedoch noch einige Festlegungen für die drei Methodenteile, auf die nachfolgend eingegangen wird.

### **3.3 Methodische Festlegungen in der Arbeit zu konventionellen, neuartigen und zukunftsgerichteten Verkehrsmitteln**

Nachdem das Forschungsvorhaben in der etablierten Vorgehensweise der Sachbilanz vorgestellt und methodisch erweitert wurde, wird nun auf die notwendigen Grundlagen zur Entwicklung der Forschungsmethodik in der Arbeit genauer eingegangen. Zur Nachbildung der Verkehrsmittel in der Sachbilanz erfolgt eine einleitende Vorstellung zu Vorgehen und Begrifflichkeiten für eine einordnende Charakterisierung bzw. eine neue umfassende Typologie von konventionellen, neuartigen und zukunftsgerichteten Verkehrsmitteln. Diese

---

sollen einem geeigneten Verständnis für den Untersuchungsgegenstand Verkehrsmittel sowie für die inhärenten Parameter und ihren jeweiligen Bezug zueinander dienlich sein, welches zur Erweiterung der Sachbilanz notwendig ist. Die LCI-Erweiterung benötigt im ersten Bestandteil die Ausbildung einer Typologie von Transport-Transformationslösungen zur Erarbeitung der ex-ante Sachbilanz für die Technologieentwicklung und im zweiten Bestandteil die Ausbildung einer Charakterisierung von Zukunftsveränderungen der konventionellen und neuartigen Verkehrsmittel zur Erarbeitung der prospektiven Sachbilanz für die Szenarioentwicklung. In den nachfolgenden drei Unterkapiteln wird das Verständnis zur Vorbereitung der Forschungsmethodik für die Kapitel 4-6 spezifiziert. Die wichtigsten Begriffe sind zum Abschluss in einem Glossar zusammengefasst.

### **3.3.1 Charakterisierung konventioneller Verkehrsmittel zur Darstellung des Produktsystem-Aufbaus von konventionellem Transport**

Im ersten Teil der Methodenfestlegung wird kategorisch ein geeignetes Verständnis für den Untersuchungsgegenstand Fahrzeug und die Funktion des Transports geschaffen sowie mit dem Ökobilanzverständnis verbunden. Ziel der Festlegung stellt die Ausarbeitung von Grundlagen für die ex-post Sachbilanz dar, um mit einer Charakterisierung von Verkehrsmitteln die Ausbildung des Transportmodells vorzubereiten. Das Transportmodell der LCI basiert auf einer Nachbildung des konventionellen Fahrzeugs in einer parametrisierten Sachbilanz und die Bestandteile der Ökobilanz über den Lebensweg sind Prozesse, Parameter und Flüsse als generische Modellbausteine. Als LCI-Ergebnis wird ein Modell des spezifischen Fahrzeugs mit abschließend quantifiziertem Gesamtflussinventar ausgebildet zur Umweltbewertung im Referenzzustand. Es folgt die ausführliche Darstellung der Modellbausteine, aus denen die parametrisierte LCI ausgeführt werden soll.

Zur hinreichenden Berücksichtigung des kompletten Produktsystems für den Transport in einem konventionellen Fahrzeug werden Fahrzeugbegriffe wie die Tragstruktur festgelegt und in ihrer Funktion beschrieben zur übergeordneten Ausbildung des Fahrzeugs in wenigen Hauptgruppen. In diese können die einzelnen Prozesse für das Produktsystem der Ökobilanz eingeordnet und daraufhin eine Vielzahl an Parametern definiert werden, die in den Prozessen enthalten sind, um jeden Bestandteil des Produktsystems hinreichend beschreiben, beschaffen und quantifizieren zu können. Die Entwicklung der Modellbausteine für die parametrisierte LCI erfolgt anhand der Definition von masseabhängigen Fahrzeugbegriffen und Funktionsbeschreibungen.

Der generelle Technologieaufbau muss bestimmt werden, um die komplexe Struktur von Verkehrsmitteln korrekt und unter Vereinfachungen wiederzugeben. Es eignet sich die Aufteilung nach Masse und nach Funktion, um die relevantesten Bauteile zu identifizieren und zu ordnen. Als Ausgangsbasis für Veränderungen wird die Systematik einzelner Komponenten eines Fahrzeugs genutzt, die auf Basis von DIN 9020 in Teil 1 und Teil 2 für Flugzeuge herausgearbeitet und definiert ist. Der Aufbau gliedert sich in die Hauptgruppen Antriebssystem, Tragstruktur, Standardausrüstung, zusätzliche Masse, Nutzlast und Energieträgermasse. Das Antriebssystem enthält alle zur Fortbewegung notwendigen physischen Komponenten bestehend aus dem Energiewandler Verbrennungsmotor, Getriebe und Übertragungselementen, um Antriebsleistung in Bewegung umzusetzen. Die Tragstruktur ist das Grundgerüst des Fahrzeugs und beinhaltet alle tragenden Bauteile, in

welche das Antriebssystem sowie weitere Fahrzeugausrüstung eingebaut sind sowie die umgebende Ummantelung des Fahrzeugs. Die Standardausrüstung besteht aus gesetzlich notwendiger Grundausrüstung für das Fahrzeug sowie zusätzlicher Herstellerausrüstung und beinhaltet Ausstattung und Einrichtung im Innenraum des Fahrzeugs sowie alle Fahrzeugsysteme. Die zusätzliche Masse gliedert sich in weitere Komponenten wie Extraausstattungs-Kundenwünsche, Ausrüstungsgegenstände, welche je nach Einsatz des betreffenden Fahrzeugs eingebaut werden, mitzuführende Fahrzeugunterlagen und die für jeden Transport spezifische Betriebsausrüstung, zudem wird das Gewicht aus der zur Bedienung des Fahrzeugs notwendigen Personenanzahl miteingerechnet. Die Nutzlast stellt die Menge an Personen bzw. Gütern dar, die im Fahrzeug transportiert werden können unter der Berücksichtigung von der maximalen Beladegrenze, die aus einer Massebegrenzung und einer Volumenbegrenzung besteht. Die Energieträgermasse stellt die Gesamtmenge an zur Fortbewegung benötigten Energieträgern dar, welche im Fahrzeug durch Verbrennung oder andere Energieumwandlungsformen zur Krafterzeugung aufgebraucht werden. Diese unterteilt sich in den eingesetzten Streckenkraftstoff als Kraftstoffmenge, die während eines Fahrzyklus verbraucht wird, sowie in eine Reserve, die für Ökobilanzen im Modell jedoch nicht mitberücksichtigt wird. (DIN 9020-2)

Tabelle 3 Massehauptgruppen von Fahrzeugen zur Aufteilung der Transportmasse nach funktionellen Aspekten (in Anlehnung an DIN 9020-1) und Zuordnung zur Ökobilanz.

Massehauptgruppen-Zuordnung	Gewichts-Zuordnung		Ökobilanz-Zuordnung
Antriebssystem	Produktions-Leermasse	Fahrzeugmasse	Transportmasse
Tragstruktur			
Standardausrüstung			
Zusätzliche Masse (Sonderausrüstung, Fahrer inkl. Betriebsausrüstung)	Zuladung – (Nutzlast + Energieträgermasse)		Vernachlässigbar
Nutzlast (Transportgutmenge)	Verfügbare Ladung – Energieträgermasse		Funktionelle Einheit
Energieträgermasse	Transportmasse – Leertankmasse		Nutzenphase (B)

Die sechs Massehauptgruppen im Fahrzeug können den einzelnen Bestandteilen der Ökobilanz zugeordnet werden und sind in Tabelle 3 zusammengefasst. Die komplette Produktions-Leermasse als Fahrzeugmasse, bestehend aus Antriebssystem, Tragstruktur und Standardausrüstung, wird der ersten Lebensphase der Herstellung zugeordnet und zum Lebensende des Fahrzeugs wieder zurückgeführt. Die Energieträgermasse wird in der zweiten Lebensphase des Betriebs berücksichtigt und die Nutzlast kann der funktionellen Einheit zugeordnet werden. Die zusätzliche Masse wird aufgrund der durchschnittlichen Berechnung von Transportfahrten und der Unbestimmbarkeit vieler Massen aus dieser Hauptgruppe für die weitere Berechnung in der Ökobilanz vernachlässigt. Zur Nachbildung des Fahrzeugs in einer parametrisierten LCI wird sich an dieser herausgearbeiteten Grundstruktur und der Zuordnung orientiert, um alle Teilssegmente des Fahrzeugs in diese Gruppen zu untergliedern.

Aus den wichtigsten Prozessgruppen und Bestandteilzuordnungen im Fahrzeug lässt sich die übergeordnete Struktur des Transportmodells aufsetzen, welche in der ex-post Sachbilanz in Kapitel 4 im Detail dargelegt wird. Zur weiteren Einordnung der Modellbausteine für die parametrisierte Sachbilanz erfolgt die Ausbildung fahrzeugspezifischer Parameter. Für die einzelnen Prozesse des Produktsystems sind eine Vielzahl an Transportparametern zur funktionellen Einheit und den drei Lebensphasen von Relevanz. Beispielsweise benötigt die FU u.a. die Parameter durchschnittliche Transportdistanz und Transportgutmenge, um die erzeugten Fahrzeugaufwendungen auf die Transportfunktion zu beziehen. Für alle Parameter ist eine umfangreiche Datensammlung notwendig und fehlende Parameter sind mit Datengenerierungstechniken zu ergänzen. Zur Übersicht von allgemeingültigen Parametern werden Standard-Parameter für Verkehrsmittel in Tabelle 4 aufgelistet, die sich aufgrund kritischer Durchsicht aus der vorhandenen Literatur und der eigenen Erprobung als notwendige Dateninputs in der Ökobilanzierung festhalten lassen. Diese fassen alle wichtigen Parameter aus dem Transportmodell zu Nachbildung von konventionellen Verkehrsmitteln im Rahmen von 20 Standard-Parametern zusammen, die zur weiteren Bearbeitung in der Sachbilanz unterstützen sollen.

Tabelle 4 Standard-Parameter für Verkehrsmittel zur Ausbildung des Transportmodells.

<b>Standard-Parameter für Verkehrsmittel</b>		
Funktionelle Einheit	Jahresfahrleistung	[km/a]
	Jahresfahrzyklen	[Fahrten/a]
	Durchschnittliche Transportdistanz	[km/Fahrt]
	Transportgutmenge	[t], [n]
	Durchschnittliche Auslastung	[%]
Herstellungsphase (A)	Gesamtfahrzeugmasse	[kg]
	Modellfahrzeugmasse	[kg]
	Fahrzeugmaterialverteilung	Material <sub>1-n</sub> [%]
	Komponentenprozessenergie	[MJ], [kWh], [kg]
	Komponentenanzahl	Komponente <sub>1-n</sub> [n]
	Komponententransportdistanz	Komponente <sub>1-n</sub> [km]
	Komponentenmasse	Komponente <sub>1-n</sub> [kg]
Nutzenphase (B)	Komponentenmaterialverteilung	Komponente <sub>1</sub> - Material <sub>1-n</sub> [%], etc.
	Durchschnittlicher Energieverbrauch	[l/km], [kg/km], [kWh/km]
	Energieverbrauch (während Fahrzyklus)	[l/Fahrt], [kg/Fahrt], [kWh/Fahrt]
Entsorgungsphase (C)	Energieverbrauch (Start/Stop Fahrzyklus)	[l/Fahrt], [kg/Fahrt], [kWh/Fahrt]
	Fahrzeuglebensdauer	[a]
	Komponentenlebensdauer	[a]
	Fahrzeugverwertungsverteilung	Beseitigung [%], Verbrennung [%], Recycling [%]
	Materialverwertungsverteilung	Beseitigung - Material <sub>1-n</sub> [%], etc.



Für die gelisteten Parameter ist wie zu anderen Transporttools im Stand der Wissenschaft anzumerken, dass noch mehr Parameter zur vollständigen Transportberechnung notwendig sind. Die Auflistung stellt jedoch die wichtigsten Bestandteile der Fahrzeugcharakterisierung dar, um die Zusammensetzung von Verkehrsmitteln hinreichend zu kategorisieren und mit anderen Fahrzeugen vergleichbar zu machen. Nach Abschluss der Charakterisierung von konventionellen Verkehrsmitteln wird daran anschließend eine Typologie von neuartigen Verkehrsmitteln entwickelt, die auf den vorgestellten Bestandteilen aufbaut.

### 3.3.2 Typologie der Fahrzeugveränderung zur Darstellung des Produktsystem-Aufbaus von Transport-Transformationslösungen

Im zweiten Teil der Methodenfestlegung wird kategorisch ein geeignetes Verständnis für den Untersuchungsgegenstand der Fahrzeugveränderung herausgearbeitet zur Ermittlung einer konkreten Transport-Transformationslösung. Ziel der Festlegung für die ex-ante Sachbilanz ist die Vereinigung von ausgebildetem Transportverständnis und Ökobilanzverständnis mit einem neuen Transformationsverständnis zur Vorbereitung des Transformationsmodells. Dies soll anhand einer neu entwickelten Typologie zur Identifizierung von allen zusätzlichen Prozessen der neuartigen Technologie erfolgen. Dieser sogenannte Transformationstyp muss strukturiert eingeordnet und differenziert werden. Zudem unterstützt die Typologie bei der TTS-Zuordnung zur geeigneten Vergleichstechnologie. Das Transformationsmodell der eLCI basiert auf einer veränderungsbasierten Nachbildung des neuartigen Fahrzeugs auf Grundlage von allen physischen Abweichungen in der parametrisierten Sachbilanz des konventionellen Fahrzeugs. Die Veränderungen wirken sich auf die lebenswegbezogenen Bestandteile der Ökobilanz bezüglich der Modellstruktur von Prozessen, Parametern und Flüssen sowie der Quantifizierung von Flüssen aus. Als eLCI-Ergebnis entsteht ein Modell des transformierten Fahrzeugs mit abschließend quantifiziertem Gesamtflussinventar zur Umweltbewertung im Referenzzustand. Die neu ausgebildeten Modellbausteine für die eLCI werden nachfolgend genauer vorgestellt.

Als Transformationsverständnis sollen alle Aspekte zur Fahrzeugveränderung des ersten Veränderungslevels integriert werden, um das gebildete Produktsystem des konventionellen Fahrzeugs zu erweitern. Es kann sich bei einer TTS um eine oder mehrere Fahrzeugvarianten handeln, die zum ursprünglichen Fahrzeug verschiedene technologische Veränderungen wie Substitutionen und Erweiterungen beinhalten wie in Abbildung 13 rechts dargestellt ist.

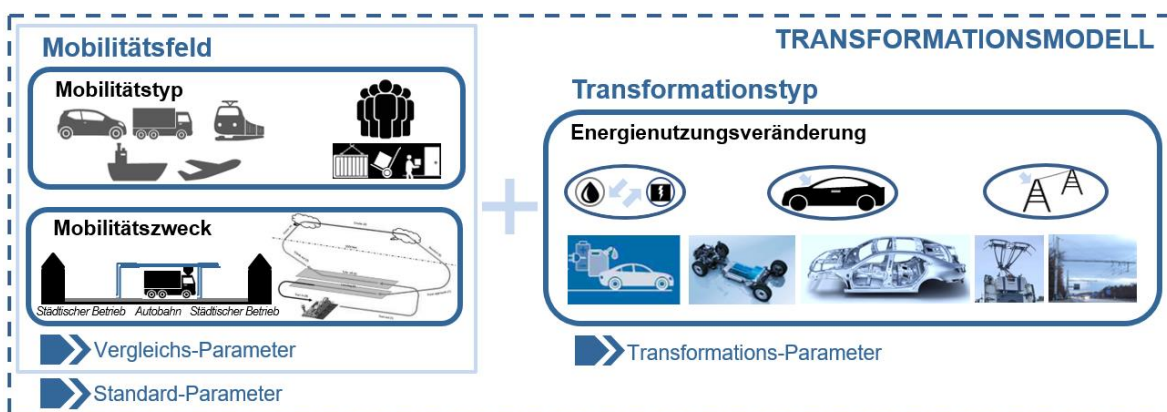


Abbildung 13 Überblick über die Systembausteine des Transformationsmodells.



Die Vorstellung der Modellbausteine der eLCI für die Transformation des Verkehrssektors erfolgt in der Festlegung des Mobilitätsfeldes und des Transformationstyps von Abbildung 13. Ersteres basiert auf dem qualitativen Mobilitätstyp zur Bestimmung des Verkehrsmittels wie Lkw und des Transportguts wie Güter sowie dem quantitativen Mobilitätszweck zur Festlegung von Fahrzyklus wie Kurzstrecke und Transportgutmenge wie 40 Tonnen. Der Transformationstyp stellt eine Energienutzungsveränderung dar und basiert auf einem Wechsel von Energieträgern wie Wasserstoff, neuen Komponenten im Antriebssystem wie Elektromotoren, Veränderungen der umgebenden Tragstruktur wie Masseverzicht bzw. Infrastrukturerweiterungen wie elektrische Straßensysteme. Der Transformationstyp umfasst neben der Maßnahmenkombination zur Energienutzungsveränderung den TRL Entwicklungsstand wie Pilotmaßstab und den Betrachtungszeitpunkt der Umweltbewertung wie Referenzzustand. Die konkret gebildete Verkehrsmittelvariante differenziert sich zum Vergleichsfahrzeug in einen reinen Energieträgerwechsel, einen Antriebssystemwechsel unter möglicher zusätzlicher Inklusion neuer Energieträger, einen Tragstrukturwechsel, der die beiden vorherigen Wechsel integrieren kann, sowie einen Strominfrastrukturwechsel, der vorherige Änderungen am Fahrzeug alle oder nur teilweise miteinschließen kann.

Aus dem Mobilitätsfeld und dem Transformationstyp lassen sich unterschiedliche Parameter ableiten. Die Vergleichs-Parameter bilden das Umfeld für die korrekte Gegenüberstellung ab. Zur Klassifizierung von Fahrzeug und Transportprozess erfolgt die Parameterauswahl der Vergleichs-Parameter als erste Einordnung des neuartigen Produktsystems mit dem Zweck der fundierten Zuordnung für den Verkehrsmittelvergleich. Tabelle 5 zeigt die Liste von 13 Vergleichs-Parametern zur Fahrzeugspezifizierung für die im Framework betrachteten TTS.

Tabelle 5 Vergleichs-Parameter für Verkehrsmittel zur Gegenüberstellung der Vergleichstechnologie.

<b>Vergleichs-Parameter für Verkehrsmittel</b>		
Mobilitätstyp	Verkehrsmittel	Pkw, Lkw, Bus, Bahn, Zug, Schiff, Flugzeug, Mikromobilität
	Fahrzeuggröße	Klein, Mittel, Groß, Sehr groß
	Fahrzeugbaureihe mit Fahrzeugbaujahr	Fahrzeugmodell-/Produktsystemname, Fertigungs-/Marktetalbierungsjahr
	Transportgut	Personen, Güter
Mobilitätszweck	Konventionelle Leistung	[kW], [PS]
	Fahrzyklus	Kurzstrecke, Mittelstrecke, Langstrecke
	Transportradius	Regionalverkehr, Nationalverkehr, Fernverkehr, Interkontinentalverkehr
	Transportgutmenge	[n], [t]
Transformationstyp	Elektrische Leistung	[kW], [PS]
	Energienutzungsveränderung	Energieträgerwechsel, Antriebssystemwechsel, Tragstrukturwechsel, Strominfrastrukturwechsel
	Energieträgerart	Benzin, Diesel, Kerosin, Gas, Strom, Wasserstoff
	Technologiereifegrad	Labormaßstab, Pilotmaßstab, Marktmaßstab, Industrieller Maßstab
	Zeitlicher Zustand mit Betrachtungszeitpunkt	Referenzzustand, prädiktiver / explorativer / normativer Zukunftszustand, Betrachtungsjahr

Die Transformations-Parameter gehen als erstes Veränderungslevel auf direkte physische Änderungen konventioneller zu neuartiger Fahrzeuge ein und stellen eine Erweiterung der Standard-Parameter des konventionellen Fahrzeugs dar. Transformations-Parameter als neu hinzugekommene Parameter lassen sich in die vier Wechsel differenzieren wie für den ersten Wechsel als Parameter der Anteil an regenerativen Energien im Strommix integriert werden kann. Die Transformations-Parameter dienen der Umwandlung des Transformationsmodells aus dem Transportmodell und sind in Tabelle 6 zusammengefasst, die sich aus der Erfahrung vorangegangener Forschungsprojekte und der Literatur ergeben. Die 20 Transformations-Parameter sind ausschließlich die TTS charakterisierende Parameter, die sich übergeordnet in die vier Wechsel unterteilen lassen, innerhalb dieser jedoch nicht vollumfänglich sind. Je nach TTS ist sich im Datenbeschaffungsprozess nur auf die jeweils betrachteten Wechsel zu beschränken, die als Energienutzungsveränderung zuvor in Tabelle 5 ausgewählt wurden.

Tabelle 6 Transformations-Parameter für Verkehrsmittel zur Ausbildung des Transformationsmodells.

<b>Transformations-Parameter für Verkehrsmittel</b>		
Energieträger (Geringe Transformationsintensität)	Neuer Herstellungspfad	Prozess (PTL, SMR), Input (Strom, Gas), Output (Kraftstoff, Wasserstoff)
	Elektrischer Fahranteil	[%]
	Regenerative Energien Anteil	[%]
Antriebssystem (Mittlere Transformationsintensität)	Elektromotorart	Permanenterregte Synchronmotoren
	Batterieart	Lithium-Ionen (LFP, LMO, NCA, NMC) Lithium-Schwefel, Feststoffbatterie
	Batterieenergiedichte	[Wh/kg]
	Ladezyklen Anzahl	[n]
	Brennstoffzellenart	Polymerelektrolytmembran, Festoxid
	Leistungselektronik Komponenten	Gleichrichter, Wechselrichter, Kühler, Wärmetauscher
	Lebensdauer	[a]
Tragstruktur (Große Transformationsintensität)	Materialsubstitutionsmenge	[kg]
	Formgebung	Größere Stromlinienform, geringere Stromlinienform
	Fertigungsmethode	Metallbauweise, Verbundbauweise, Zerspanung, Additive Fertigung
Strominfrastruktur (Zusätzliche Transformationsintensität)	Materialeffizienz	[%]
	Elektrisches Straßensystem	Oberleitung, Stromschiene, Induktives Laden
	Batterieladeleistung	[kWh/km]
	Gesamtlänge	[km]
	Komponentenanzahl	[n]
	Herstellungsort	[km]
	Durchschnittliche Infrastrukturnutzung	[n]

Auf Basis der Kombinationen von Parametern in unterschiedlicher Transformationsintensität können vielfältige Varianten für TTS nachgebildet werden wie als Energieträgerwechsel ein mit synthetisch hergestelltem Kraftstoff betriebenes Frachtschiff, als Energieträger- und Antriebssystemwechsel ein wasserstoffbetriebenes Brennstoffzellenauto, als Energieträger-,

---

Antriebssystem- und Tragstrukturwechsel ein vollelektrisches Zweipersonen-Leichtflugzeug sowie als Energieträger-, Antriebssystem- und Strominfrastrukturwechsel ein hybrider Schwerlast-Lkw mit elektrischem Oberleitungssystem. Ein Funktionswechsel als komplett neuer Fahrzeugentwurf ohne Vergleichsfahrzeug im selben Mobilitätsfeld wäre ein Lufttaxi. Dieser fünfte Wechsel liegt jedoch außerhalb des Betrachtungsrahmens der Arbeit, da keine Transformationslösung im Verkehrssektor als Ersatz für eine konventionelle Technologie nachgebildet wird, sondern dies eine neue Art von Mobilität kategorisiert.

Weiterhin müssen für die konkret ausgebildeten TTS auch alle Standard-Parameter in den drei Lebensphasen neu bestimmt oder übernommen werden. Dagegen sollten Daten zur funktionellen Einheit aufgrund der Vergleichbarkeit immer bestehen bleiben und können vom konventionellen Fahrzeug übertragen werden. Die in Tabelle 4 gelisteten Standard-Parameter müssen zu diesem Zweck in identische und veränderte Parameter differenziert werden, sodass nur für die veränderten Standard-Parameter neue Daten beschafft werden können. Zudem ist die Auflistung bei Bedarf stets zu erweitern, um die TTS vollständig nachzubilden.

Da eine Vielzahl an Daten für die konkrete TTS aufzunehmen sind, um im Modell den neuen Fahrzeugentwurf ab TRL 3 gegenüber dem Vergleichsfahrzeug abzubilden, erhöht sich die Komplexität in der ex-ante Sachbilanz. Der Zweck der Typologie mittels einer Klassifizierung in Vergleichs-Parameter, Transformations-Parameter und Standard-Parameter soll mit der Einordnung in neue, veränderte, gleichgebliebene und weggelassene Bestandteile eine Erleichterung der Datenaufnahme für TTS zur Ausbildung des neuartigen Produktsystems darstellen. Unter einer Anwendung dieser Typologie für TTS kann folglich ein effizienterer Datenbeschaffungsprozess resultieren, da sich auf veränderte und neue Daten fokussiert werden kann, die eine Erweiterung des vorherigen Produktsystems abbilden. Zudem haben in der Gegenüberstellung mit der etablierten Technologie alle Komponenten und Bausteine die gleiche Grundlage, die für einen transparenten Vergleich notwendig ist. Ein bewertender Vergleich zwischen den Technologien kann jedoch erst erfolgen, wenn alle technologischen und zeitlichen Ungleichheiten beseitigt wurden und die Verkehrsmittel einen entwickelten Zustand unter denselben Zukunftsannahmen widerspiegeln. Auf alle Veränderungen zur Ausbildung der Modelle im Zukunftszustand wird nachfolgend in der Charakterisierung von zukunftsgerichteten Verkehrsmitteln genauer eingegangen.

### **3.3.3 Charakterisierung der Zukunftsveränderung zur Darstellung prospektiver Methodenbausteine für die Nachbildung mittels Zukunftsszenarien**

Im dritten Teil der Methodenfestlegung wird auf Grundlage zuvor identifizierter Standard-Parameter und Transformations-Parameter für die zukunftsgerichtete Modellausbildung von Verkehrsmitteln eine Charakterisierung vorgestellt, die alle Entwicklungen der Fahrzeuge in die Zukunft beinhalten soll. Ziel ist zur Vorbereitung der Methodenentwicklung in der prospektiven Sachbilanz die strukturierte Herausarbeitung eines geeigneten Verständnisses für Zukunftsveränderungen. Mit diesem soll auf alle Arten von Fortschritt in den Parametern anhand von Datenmodifikationstechniken eingegangen werden für den Zielzustand einer künftig nachhaltigen Mobilität und zur Ausbildung von Zukunftsveränderungsmodellen. Für Modelle im Zukunftszustand benötigt es die Entwicklung von Zukunftsszenarien. Diese Szenarien werden als bestimmtes Zukunftsbild auf Basis von Entwicklungen, Dynamiken

sowie treibenden Kräften ausgebildet und lenken den Fokus gezielt auf ausgewählte interessante Veränderungsaspekte, ohne die Zukunft in Gänze darzustellen oder einen Wahrheitsanspruch zu erheben (Kosow & Gaßner, 2008). Das Zukunftsveränderungsmodell der pLCI basiert auf einer zukunftsveränderungsbasierten Nachbildung des zukünftigen Fahrzeugs anhand ausgewählter Fortschrittsabweichungen entweder in der parametrisierten Sachbilanz des Transportmodells für das konventionelle Fahrzeug oder des Transformationsmodells für das neuartige Fahrzeug. Die Zukunftsveränderungen wirken sich auf die Modellstruktur von Parametern und Flüssen sowie die Quantifizierung von Flüssen aus. Als pLCI-Ergebnis entsteht ein Modell des zukünftigen konventionellen bzw. neuartigen Fahrzeugs mit abschließend quantifiziertem prospektiven Gesamtflussinventar pro Zukunftsszenario zur Umweltbewertung im Zukunftszustand. Auf die Art der Veränderung und die Eignung für den Untersuchungsgegenstand zur Erfüllung bestimmter Veränderungsbedarfe wird nun genauer eingegangen.

Die Entwicklung der einzelnen Modellbausteine für die pLCI wird auf Basis eines generellen Zukunftsverständnisses erzeugt, wofür die entsprechenden Begriffe zu definieren sind. Diese sollen die Erkenntnisse aus dem Stand der Wissenschaft aufgreifen, jedoch merken Kosow und Gaßner an, dass keine einfache, überblicksorientierte Typologie existiert, welche es bestimmten Zielen und Funktionen generell ermöglichen würde, eine passgenaue, konkrete Szenariotechnik zuzuordnen (2008). Dennoch soll eine vereinfachte Typologie in Form einer Charakterisierung von Bestandteilen der Szenarioanalyse vorgestellt werden. Eine Einordnung in die einzelnen Systembausteine von dem Prozess der Szenarioentwicklung und dem Ergebnis des Zukunftsszenarios ist in Abbildung 14 dargestellt, mit welchem das Zukunftsveränderungsmodell in der prospektiven Sachbilanz nachgebildet werden kann.

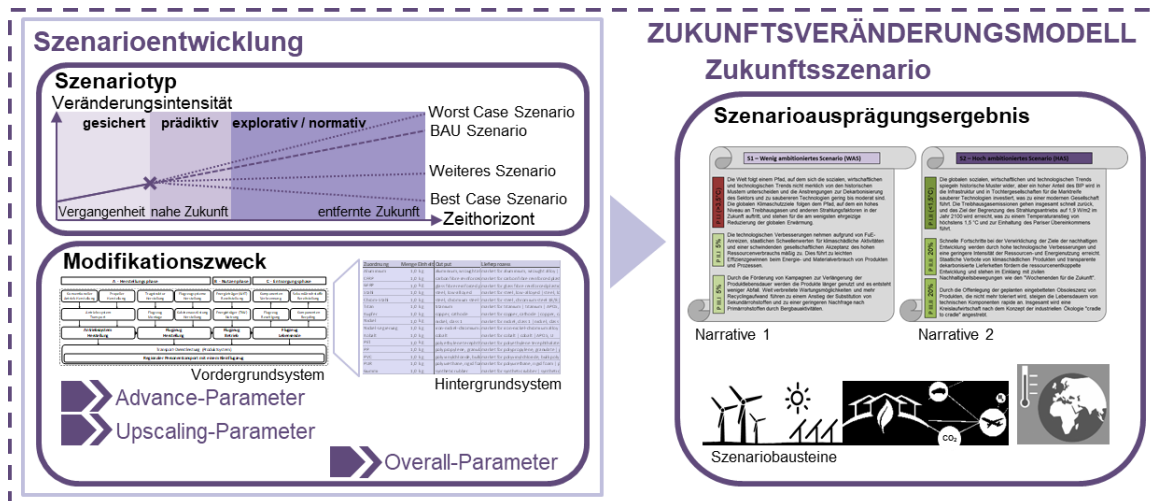


Abbildung 14 Überblick über die Systembausteine des Zukunftsveränderungsmodells.

Zur Ausbildung des Zukunftsverständnisses muss der qualitative Szenariotyp bezogen auf den zeitlichen Rahmen bestimmt werden. Für diesen ist festzulegen, ob es sich um einen kurzfristigen Zeithorizont als prädiktives Szenario oder einen langfristigen Zeithorizont als exploratives oder normatives Szenario handelt und wie hoch die Veränderungsintensität ist von einer gemäßigten BAU Entwicklung mit geringen Veränderungen bis zu einer Best Case Entwicklung mit größtmöglicher Abweichung zum Referenzzustand. Das prädiktive Szenario lässt sich mit zu erwartenden Entwicklungspfaden charakterisieren, während das explorative

---

Szenario auch unvorhergesehene Veränderungen beinhaltet und einen Szenario-Trichter von gemäßigten Entwicklungspfaden im Kernbereich und extremeren Entwicklungspfaden in den Randausschnitten aufspannt, welche zurückblickend auch ein normatives Szenario abbilden können. Weiterhin muss im Verlauf der Szenarioentwicklung der quantitative Modifikationszweck zur Modifizierung von Vordergrundsystem und Hintergrundsystem zugeordnet werden. Dieser teilt sich auf in Advance-Parameter (AP) für den technologischen Fortschritt der konventionellen Technologie, Upscaling-Parameter (UP) für den technologischen Fortschritt der neuartigen Technologie und Overall-Parameter (OP) für den zeitlichen Fortschritt im Hintergrundsystem sowohl des CT als auch der TTS. Die ersten beiden Parameterarten stellen das zweite Veränderungslevel dar und die dritte Parameterart das dritte Veränderungslevel. Technologischer Fortschritt, der für das Vordergrundsystem der TTS gilt, sollte in gleicher Weise für das konventionelle Fahrzeug nachgebildet werden wie als AP Verbesserungen des Kraftstoffverbrauchs über die Zeit, um in der Zukunft einen aussagekräftigen Vergleich zwischen beiden zu erzeugen. Für das neuartige Fahrzeug und die in Entwicklung befindlichen Komponenten sind Fahrzeugveränderungen von einem niedrigen TRL bis zur Massenproduktion zu berücksichtigen, besonders für die Bestandteile der vier Wechsel der Energienutzungsveränderung wie verbesserte Batteriekomponenten, um ebenfalls wie die CT marktreife Technologien im industriellen Maßstab nachzubilden. Die Parameterart der UP führt für die TTS zu einer Erhöhung der technologischen Reife im Zukunftszustand. Allen drei Parameterarten ist zu eigen, dass eine Unsicherheit bezüglich des Eintretens in der Zukunft existiert. Diese ist tendenziell am Größten für Veränderungen, die auf Vorprozessen basieren und im Hintergrund auftreten, sodass für diese OP mehr als eine Ausprägung für den Zukunftszustand von konventionellen und neuartigen Fahrzeugen modifiziert werden kann. Für die drei Parameterarten als Modifikationsbereiche müssen selektive Standard-Parameter oder Transformations-Parameter aus dem Transportmodell bzw. dem Transformationsmodell berücksichtigt und abgewandelt werden. Relevante Parameter aus diesen beiden Modellen, die jedoch nicht modifiziert werden, können als Incumbent-Parameter (IP) für den CT bzw. als Emerging-Parameter (EP) für die TTS zusätzlich aufgelistet werden. Zusammen mit den AP, UP und OP bilden sie die Inventar-Parameter aller zukunftsgerichteten Produktsysteme ab, wobei IP, AP und OP dem CT und EP, UP und OP der TTS zugeordnet werden.

Auf Grundlage der Einordnung von Szenariotyp und Modifikationszweck wird das konkrete Zukunftsszenario gebildet, das als Szenarioausprägungsergebnis alle eingeschlagenen Entwicklungspfade enthält, die qualitativ in einem konsistenten Erzählstrang der Narrative beschrieben und quantitativ in einzelnen Szenariobausteinen dargelegt werden können. Es enthält alle modifizierten Parameter für den Zukunftszustand, die zudem in einen größeren Kontext gesetzt und mit der gesamtgesellschaftlichen Entwicklung als umgebender Rahmen verknüpft werden. Zur Parameterausbildung für die Zukunftsszenarien der parametrisierten pLCI müssen die internen Sachbilanzparameter, als Inventar-Parameter zusammengefasst, identifiziert werden. Weiterhin sind die externen PESTEL-Faktoren zu sammeln, um die sozioökonomische Entwicklung des Umfelds mit abzubilden. Eine exemplarische Auflistung der Inventar-Parameter für zukunftsgerichtete Verkehrsmittel zeigt Tabelle 7. Diese sind teilweise auf Basis von Tabelle 6 aus den Parametern der vier Wechsel entstanden und können den drei Parameterarten AP, UP und OP zugeordnet werden, um aus der LCI des CT bzw. der eLCI der TTS selektive Änderungen abzubilden wie die Energieverbrauchsreduktion als AP oder die Regenerative Energien Anteilserhöhung als OP.

Tabelle 7 Inventar-Parameter zur Ausbildung des Zukunftsveränderungsmodells.

<b>Inventar-Parameter für zukunftsgerichtete Verkehrsmittel</b>		
Advance-Parameter (AP)	Energieverbrauchsreduktion	[l/km], [kg/km], [kWh/km]
	Materialartveränderung	Material <sub>1-n</sub> [kg]
	Produktartwechsel	z.B. neuere Generation Motoren
Upscaling-Parameter (UP)	Herstellungsortveränderung	[km]
	Herstellungsinpudreduktion	[MJ], [kWh], [kg]
	Materialeffizienzerhöhung	[%]
	Komponentenanzahlreduktion	[n]
Overall-Parameter (OP)	Lebensdauererhöhung	[%]
	Herstellungspfadverbesserung	[MJ], [kWh], [kg], [%]
	Regenerative Energien	Energieerzeugungstechnologie <sub>1-n</sub>
	Anteilserhöhung	[%]
	Recyclinginputrateerhöhung	[%]
	Infrastrukturnutzungserhöhung	[n]

Die externen Faktoren stehen in keiner direkten Verbindung zum Produktsystem, sondern listen nur das breite Feld der Faktoren auf, welche die Zukunftsentwicklung beeinflussen. Sie lassen sich differenzieren in politische, wirtschaftliche, soziokulturelle, technologische, ökologische und gesetzliche Faktoren, die anhand verschiedener Beispielfaktoren in Tabelle 8 gelistet sind. Sie sind notwendig, um die übergeordnete Entwicklung für die Ausbildung von Zukunftsszenarien in vielfältigen Bereichen mit einzubeziehen.

Tabelle 8 Externe Faktoren für den übergeordneten Einfluss auf das Zukunftsveränderungsmodell.

<b>Externe Faktoren für zukunftsgerichtete Verkehrsmittel</b>	
P – Politisch	Klimapolitik, Umweltpolitik, Rohstoffpolitik, Energiepolitik, Forschung und Entwicklung Förderung, Subventionen
E – Wirtschaftlich	Bruttoinlandsprodukt, Kohlenstoffpreis, Rohstoffpreis, Strompreis, Wärmepreis, Produktionsstandortkonditionen, Lieferkettentransport
S – Soziokulturell	Verhaltensänderung, soziale Akzeptanz, öffentliche Missbilligung, Bildung, Kommunikation, Nachfragereduktion, Verzicht
T – Technologisch	Allgemeiner technologischer Fortschritt, Innovation, Verbreitungsgrad, Fortschritt grüner Schlüsseltechnologien
E – Ökologisch	Klimaauswirkungen Produkte, Umweltwirkungen Dienstleistungen, Kohlenstofffußabdruck Energieträger, Lebenswegbedarf Rohstoffe
L – Gesetzlich	Pariser Klimaschutzabkommen, sektorenspezifische Zielsetzungen, Grenzwert Emissionen, Verbot, Kreislaufpflicht, Klimakonformität

Für alle relevanten ausgewählten Inventar-Parameter sind prospektive Daten einzuholen, indem beispielsweise Experten des jeweiligen Betrachtungsfeldes befragt werden. Die externen Faktoren von Tabelle 8 sind in den Modifikationsprozess der Inventar-Parameter qualitativ zu integrieren, um übergeordnete Begründungen für die Höhe der Veränderung zu erhalten und eine fundierte Basis für deren Entwicklung im Vordergrundsystem und im Hintergrundsystem des Fahrzeugtransports zu schaffen.



---

### 3.3.4 Überblick zu den konkreten Bestandteilen der Forschungsmethode

Zur nachfolgenden Darstellung der Methodik werden abschließend die zuvor vorgestellten Begriffe und Klassifizierungen der konkreten Methodenbestandteile von den drei Teilen der Methodenfestlegung übersichtlich herausgearbeitet. Ein Wörterverzeichnis der verwendeten Hauptbegriffe mit beigefügten Bedeutungserklärungen des Forschungsvorhabens wird in drei Glossaren zusammengestellt, das Glossar für den ersten Bestandteil der ex-post Sachbilanz befindet sich in Anhang B1, das Glossar für den zweiten Bestandteil der ex-ante Sachbilanz in Anhang B2 und das Glossar für den dritten Bestandteil der prospektiven Sachbilanz in Anhang B3.

Das spezifische Vorgehen dieser Arbeit wird mit präzisierten Methodenbestandteilen und ausführlichen Anleitungen in den nachfolgenden Kapiteln vorgestellt. Diese sollen alle relevanten und konsensbildenden Elemente aus der bestehenden Literatur beinhalten und in Symbiose mit neuen Elementen verknüpft werden, um eine größtmögliche Schnittmenge der neuen Forschungsmethode mit dem vorhandenen Wissen zu erzeugen. Die strukturierten Arbeitsschritte der drei LCI-Bestandteile von Abbildung 12 stellen den theoretischen Teil der Methodenentwicklung in der Arbeit als übergeordnete Vorgehensweise für alle Arten von Verkehrsmitteln dar. Die Durchführung der Vorgehensabfolge umfasst die Vorstellung des Transportmodells in Kapitel 4, die Entwicklung des Transformationsmodells der eLCI in Kapitel 5 und die Entwicklung des Zukunftsveränderungsmodells der pLCI in Kapitel 6. Hieraus sollen die ersten beiden detaillierten Forschungsfragen adressiert werden für eine geeignete Vorgehensweise zur Nachbildung neuartiger Transport-Transformationslösungen und der Modellierung für einen passgenauen Vergleich mit dem konventionellen Transport. Darauf aufbauend erfolgt der praktische Teil, bei dem die entwickelte Methodik auf ihre Robustheit überprüft wird, indem die dargestellte Vorgehensweise in allen Arbeitsschritten auf ein konkretes Beispiel angewendet wird. Die Anwendung der Methodenentwicklung soll im Rahmen einer Fallstudie anhand von Modellen eines 19-Sitzer Kleinflugzeugs aus dem GNOSIS Projekt in Kapitel 7 erfolgen. Mit diesen Resultaten soll die letzte detaillierte Forschungsfrage zur Spezifizierung der Methodik auf TTS von Kleinflugzeugen und der Ableitung von konkreten Ergebnissen für einen Teilbereich des Verkehrssektors adressiert werden.

## 4 Erster Methodenteil der ex-post Sachbilanz zur Nachbildung konventioneller Verkehrsmittel

### 4.1 Allgemeines zur ex-post Sachbilanz Methodik

Für die in Kapitel 3 herausgearbeitete übergeordnete Methodik der Arbeit wurden drei Bestandteile identifiziert, von denen der erste Methodenteil der ex-post Sachbilanz zur Nachbildung einer konventionellen Technologie in diesem Kapitel behandelt wird. Auf Basis der Charakterisierung von Verkehrsmitteln aus Kapitel 3.3.1 und den getätigten Festlegungen wird nachfolgend die Nachbildung und Modellierung eines parametrisierten Transportmodells vorgestellt. Ein in sich schlüssiges Verständnis über das zu modellierende Produktsystem *konventioneller Transport* soll mit Abschluss des Kapitels erreicht werden, indem anhand der strukturellen Einordnung des konventionellen Fahrzeugs bezüglich allen Modellbausteinen von Prozessen, Parametern und Flüssen als Ergebnis ein Transportmodell mit einem quantifizierten Gesamtflussinventar erhalten wird. Das Vorgehen basiert auf den aus der ISO Norm herausgearbeiteten Stufen Vorbereitung der Datenerhebung, Datenerhebung und Datenberechnung. Die dreistufige Vorgehensweise wird im Detail für die LCI anhand einem generischen Modell für konventionellen Transport nachgebildet, in dem aufgrund der Parametrisierung einzelne Bestandteile ausgetauscht werden können. Die generischen Modellbausteine der Ökobilanz sollen für alle Verkehrsmittelarten übertragbar sein, um diese in der iterativen Sachbilanz weiter zu nutzen oder einen Vergleich mit anderen konventionellen Fahrzeugen zum aktuellen Zeitpunkt durchzuführen. Mit dem Vorgehen soll eine zielgerichtete Anleitung von Ökobilanzierern und Praktikern erfolgen, die konventionelle Technologie korrekt nachzubilden, um Entscheidungsträgern mit dem abschließenden Ergebnis ein größtmögliches Verständnis über die durchgeführte Ökobilanz zu vermitteln.

Innerhalb der Ökobilanz umfasst die zweite Phase der Sachbilanz die Zusammenstellung der Input- und Outputflüsse eines Produktsystems im Verlauf des Lebenswegs mit dem Ergebnis quantifizierter Flüsse für die nachgelagerte Ermittlung und Beurteilung der potenziellen Umweltwirkungen (DIN EN ISO 14044). Das standardisierte Verfahren zur Durchführung einer Sachbilanz im Rahmen einer Ökobilanz nach ISO Norm ist in Abbildung 15 dargestellt mit dem übergeordneten Ziel der Parameter-Generierung für konventionelle Verkehrsmittel zur Entwicklung des Sachbilanz-Modells als Transportmodell.

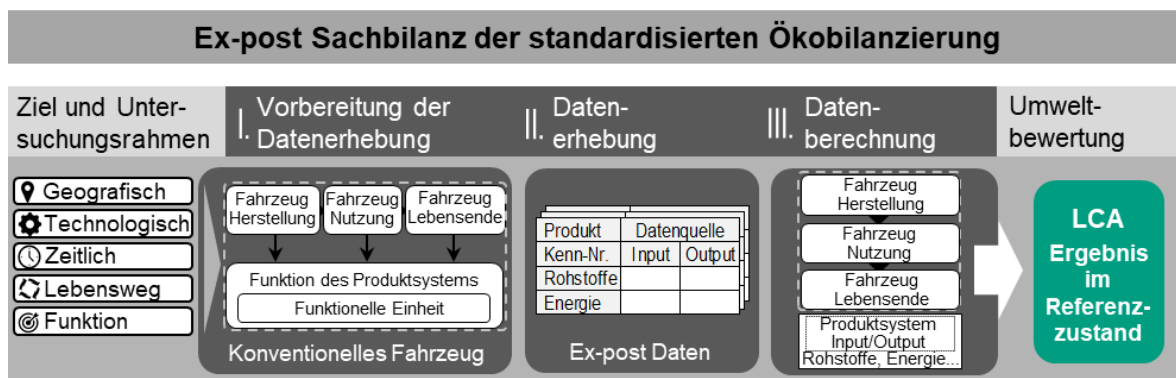


Abbildung 15 Dreistufiger Ansatz zur Durchführung der ex-post Sachbilanz der standardisierten Ökobilanzierung.

---

In der ersten Phase der Ziel- und Untersuchungsrahmenfestlegung wird das Produktsystem über den Lebensweg definiert, indem die Funktion eingeordnet sowie die geographischen, technologischen und zeitlichen Systemgrenzen bestimmt werden. Daraufhin erfolgt in der zweiten Phase der LCI das dreistufige Vorgehen. Die erste Stufe der ex-post Sachbilanz beinhaltet die Ausbildung der qualitativen Modellstruktur des CT über den Fahrzeulebensweg und die Beschreibung der Bestandteile. Die zweite Stufe enthält die quantitative Beschaffung von Informationen zu allen Bestandteilen anhand einer Generierung aller Datenwerte. Die dritte Stufe umfasst die aggregierte Modellquantifizierung für eine vollständige Nachbildung des CT. Als Sachbilanz-Ergebnis wird das quantifizierte Gesamtflussinventar, das alle Flusswerte des Fahrzeugs über den Lebensweg enthält, übertragen an die dritte und vierte Phase von Wirkungsabschätzung und Auswertung, um die Umweltwirkungen im Referenzzustand zu ermitteln und zu beurteilen. Nachfolgend werden die drei Stufen der ex-post Sachbilanz und ihre jeweiligen Bestandteile hinsichtlich einer Spezifizierung auf den Untersuchungsgegenstand des konventionellen Transports in einem generischen Fahrzeug genauer vorgestellt.

#### **4.2 Erste Stufe der Vorbereitung der Datenerhebung zur Ausbildung der Modellstruktur von konventionellem Transport**

In der Charakterisierung wurden bereits relevante Parameter für Fahrzeuge ausgebildet und die übergeordnete Fahrzeugstruktur aufgesetzt, worauf dieses Kapitel aufbaut. Aus diesen kann in der ersten Stufe die qualitative Nachbildung des parametrisierten Transportmodells der konventionellen Technologie erfolgen, um mit Abschluss des dreistufigen Vorgehens alle Input- und Outputflüsse sowie deren quantitative Werte für die Umweltbewertung im Referenzzustand zu erhalten. Zur Bereitstellung von quantitativen Werten in der Sachbilanz muss ein LCI-Modell ausgebildet werden, das alle Bestandteile des transportbasierten Produktsystems beinhaltet. Übergeordnet werden die quantitativen Werte für alle Elementarflüsse aus der Biosphäre in die Technosphäre benötigt und vice versa. Diese können als Inputflüsse natürliche Ressourcen wie Rohstoffe und Energie darstellen und als Outputflüsse umweltschädliche Stoffe wie Emissionen und Abfälle. Die Flüsse können u.a. aus Prozessen des Transports, der Material- und Energiebereitstellung, der Abfallbehandlung und der Verbrennung resultieren, welche die Technosphäre auf dieser Ebene nicht verlassen und Input bzw. Output für das Produktsystem in Form von Produktflüssen darstellen. Der Zusammenhang zwischen diesen Ebenen und Flüssen für die Sachbilanz wird in Tabelle 9 anhand der Nachbildung eines generischen Fahrzeugtransports und den umgewandelten natürlichen Ressourcen in Abhängigkeit der Lebensphasen als erstes Modell des späteren komplexen Transportmodells verdeutlicht.

Die drei Lebensphasen des Fahrzeugs beinhalten eine Vielzahl von Prozessen, aus welchen die Input- und Outputflüsse innerhalb der Technosphäre erzeugt werden. Das Produktsystem für ein generisches Fahrzeug ist in Abbildung 16 anhand der lebenswegbezogenen Prozesse für die vier Massehauptgruppen Antriebssystem, Tragstruktur, Standardausrüstung und Energieträgermasse dargestellt. In dem sog. Systemfließbild, das in Ökobilanzen immer angegeben werden muss, sind die berücksichtigten Prozesse in Form von Boxen innerhalb der Systemgrenzen visualisiert sowie die Produktflüsse als Pfeile wiedergegeben.

Tabelle 9 Generischer Aufbau des Transportmodells auf Basis der Biosphärenflüsse eines Fahrzeugtransports.

Übergeordnetes Transportmodell eines generischen Fahrzeugs						
Biosphärenflüsse		Technosphäre			Biosphärenflüsse	
Herstellung	Rohstoffe	Input	Bedarfsmenge zur Funktionserfüllung aggregiert zu Gesamtflussinventar	Output	Ressourcenerschöpfung	Umweltwirkung pro funktionelle Einheit
	Energie	Input		Output	Emissionen	
Nutzen	Energie	Input		Output	Emissionen	
Entsorgung	Rohstoffe	Output		Output	Abfälle	
	Energie	Input/Output		Output	Emissionen	

Des Weiteren muss in der ersten Stufe der Sachbilanz eine Prozessmodulbeschreibung erfolgen. Aus den drei Lebensphasen des generischen Produktsystems des CT ergeben sich sechs Herstellungs-Prozesse, zwei Betriebs-Prozesse und vier Lebensende-Prozesse, die je nach Fahrzeugtyp in den inhärenten Prozessmodulen variieren können. Diese Prozesse sind mit den in Tabelle 4 gezeigten Parametern qualitativ zu verknüpfen, um anhand beschaffter Daten für die Prozesse die Input- und Outputflüsse zu quantifizieren.

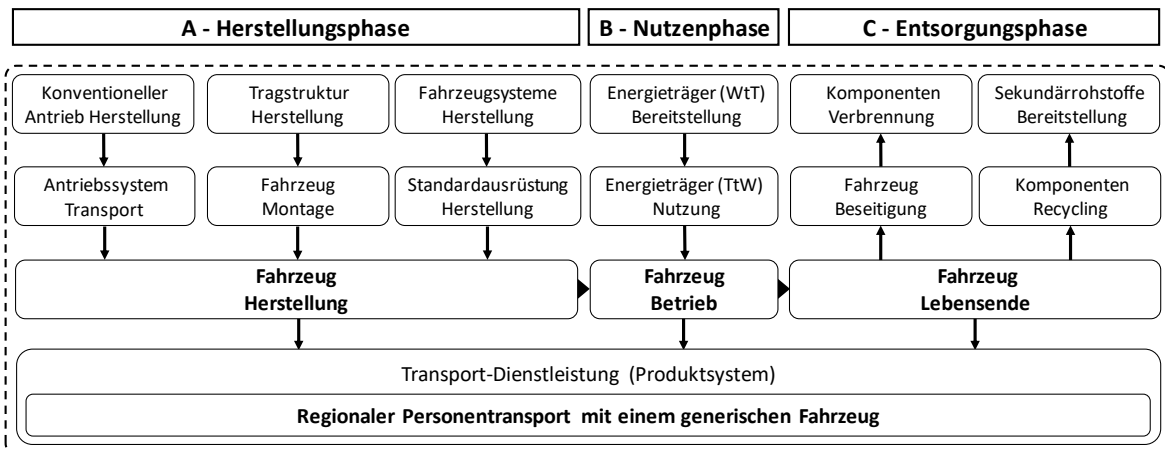


Abbildung 16 Systemflussbild eines Transport-Produktsystems und den Prozessen über den Lebensweg.

Zur Vorbereitung der Datenerhebung müssen die Prozesse weiter untergliedert werden in die kleinsten Einheiten, denen die Produktflüsse zugeordnet sind. Diese Prozessmodule basieren ebenfalls auf den Inputs und Outputs aus der Technosphäre, welche sich aus vielfältigen vorgelagerten oder nachgelagerten natürlichen Ressourcen und deren Verarbeitungsschritten zusammensetzen. Als exemplarische Prozessmodule für die Herstellung einer Gasturbine sind diese in den einzelnen Bestandteilen in Abbildung 17 herausgearbeitet.

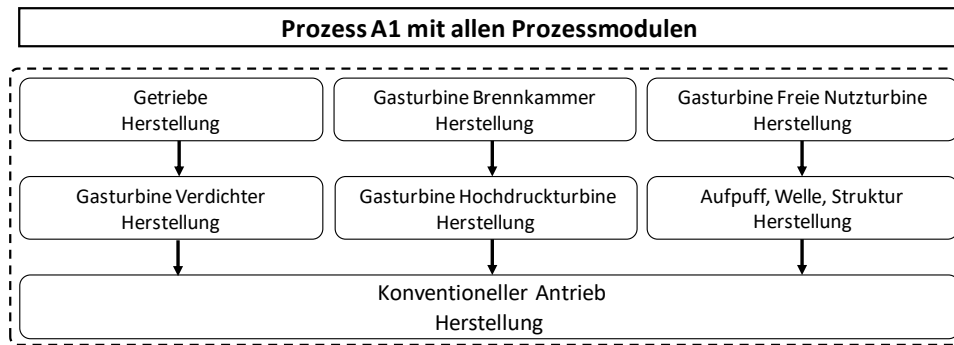


Abbildung 17 Modellstrukturierung in die kleinste Einheit der Prozessmodule im konventionellen Antriebssystem.

Die Unterteilung in Prozesse sowie integrierte Prozessmodule zur Beschreibung des Produktsystems mit dem daraus resultierenden Verlassen der obersten Aggregationsebene des Fahrzeugs ist notwendig, um die Sachbilanz in ihren Bestandteilen parametrisiert aufzusetzen und den späteren Austausch von Prozessen, Parametern und Flüssen in der Modellstruktur zu erleichtern. Nachdem die übergeordnete Struktur des Transportmodells für das Produktsystem eines CT vollständig nachgebildet wurde, ist abschließend auf die modellbasierten Unsicherheiten zu verweisen, welche durch die ausgebildeten Prozesse und gewählten Parameterbeziehungen gegenüber der Realität erzeugt werden. Aus der Vorbereitung der Datenbeschaffung erfolgt in der nächsten Stufe die tatsächliche Datenbeschaffung, aus der wertbasierte Unsicherheiten entstehen und worauf nachfolgend genauer eingegangen werden soll.

Als durchzuführende Schritte für Ökobilanzierer in der ersten Stufe zur Vorbereitung der Datenerhebung muss die Beschreibung der enthaltenen Prozessmodule dokumentiert werden. Zur Umsetzung notwendige Maßnahmen sind die graphische Darstellung des Systemfließbilds mit allen zu modellierenden Prozessen und deren Wechselbeziehungen sowie die genaue Beschreibung der Prozessmodule zur strukturellen Berücksichtigung aller Inputs und Outputs. (DIN EN ISO 14044)

### 4.3 Zweite Stufe der Datenerhebung zur Beschaffung der quantitativen Informationen von konventionellem Transport

Die Beschaffung von quantitativen Daten für die einzelnen Prozessmodule erfolgt auf Basis der vorherigen qualitativen Nachbildung und Beschreibung des Produktsystems. Sind die Biosphärenflüsse untergliedert in die einzelnen Rohstoffe und Energieträger, können diese spezifischen Hintergrunddaten für die Datenaufnahme des Produktsystems zugeordnet werden. Anhand der üblicherweise genutzten retrospektiven Datenbanken ist die Auflistung der generischen Datensätze vorzunehmen, die mit den Input- bzw. Outputflüssen über den Lebensweg des Produktsystems verknüpft sind. Ein exemplarischer Ausschnitt vorgelagerter Rohstoffflüsse sowie vor- und nachgelagerter Energieflüsse kann der Datensatz-Fluss-Liste in Tabelle 10 entnommen werden, wobei für letztere keine generischen Datensätze zur Verfügung stehen und spezifische Datensätze aus anderen Quellen erzeugt werden müssen. Die für das Produktsystem zu vervollständigende Liste gibt alle Flüsse an, die für das Transportmodell quantifiziert werden müssen. Verwendete Datenquellen können die

Datenbank ecoinvent Version 3.8 oder Literaturangaben sein, Modifizierungen vorhandener Datensätze sind unter zusätzlicher Nennung der Datenquelle anzugeben.

Tabelle 10 Ausschnitt einer Datensatz-Fluss-Liste des Produktsystems zur Datenerhebung.

Fluss-Bezeichnung	Zuordnung Daten bzw. Datensätze aus Datenquellen
Aluminium Bereitstellung	market for aluminium, wrought alloy   aluminium, wrought alloy   APOS, U – GLO [ecoinvent v3.8]
Stahl Bereitstellung	market for steel, low-alloyed   steel, low alloyed   APOS, U – GLO [ecoinvent v3.8]
Kobalt Bereitstellung	market for cobalt   cobalt   APOS, U [ecoinvent v3.8]
Nickel Bereitstellung	market for nickel, class 1   nickel, class 1   APOS, U – GLO [ecoinvent v3.8]
Nickel-Legierung Bereitstellung	market for iron-nickel-chromium alloy   ironnickel-chromium alloy   APOS, U – GLO [ecoinvent v3.8]
Kerosin Bereitstellung	market for kerosene   kerosene   APOS, U [ecoinvent v3.8]
Kerosin Verbrennung Reiseflug	(EMEP/EEA, 2019)
Kerosin Verbrennung LTO	(EMEP/EEA, 2019)

Auf Basis der Grundstruktur sind produktsystemspezifische Datenerhebungsblätter vom Ökobilanzierer zu erstellen und gemeinsam mit den Praktikern auszufüllen, um auf transparente Weise die Datensammlung zu dokumentieren und diese dem Ökobilanz-Bericht anzuhängen, der für jede Ökobilanz zu verfassen ist. Tabelle 11 zeigt anhand der Prozessmodule zur Antriebssystemherstellung von Abbildung 17 ein beispielhaft befülltes Datenerhebungsblatt. Aus diesem geht hervor, wie sich Flüsse in Abhängigkeit verschiedener Standard-Parameter wie Komponentenmasse und Komponentenmaterialverteilung für die Prozessmodule und zusammengefasst für den Prozess quantifizieren lassen. Beispielsweise ist der Beitrag der Teilkomponente Gasturbine Brennkammer Herstellung zunächst für die Rohstoffe Kobalt, Nickel und Nickel-Legierung quantitativ zu bestimmen, um anschließend die Rohstoff-Beiträge für das konventionelle Antriebssystem aufzusummieren und wiederum auf die Gesamtmenge eines Flusses für das Fahrzeug über den Lebensweg hochzurechnen.

Tabelle 11 Datenerhebungsblatt für die Rohstoffflüsse der Prozessmodule im konventionellen Antriebssystem.

Datenerhebungsblatt: Prozess A1 Komponentenherstellung Antriebssystem				
Komponentenmasse	Teilkomponente Name	Masseverteilung	Material Fluss-Zuordnung	Materialverteilung
200 kg	Prozessmodul 1	33%	Stahl Bereitstellung	100%
	Prozessmodul 2	18%	Titan Bereitstellung	40%
			Chrom-Stahl Bereitstellung	60%
	Prozessmodul 3	19%	Kobalt Bereitstellung	8%
			Nickel Bereitstellung	2%
			Nickel-Legierung Bereitstellung	90%
	Prozessmodul 4	4%	Nickel-Legierung Bereitstellung	100%
	Prozessmodul 5	10%	Nickel-Legierung Bereitstellung	100%
	Prozessmodul 6	16%	Nickel-Legierung Bereitstellung	25%
			Aluminium Bereitstellung	30%
Stahl Bereitstellung			45%	



---

Aus der detaillierten Prozessmodulnachbildung und in Beziehung gesetzten Parametern für das komplette Fahrzeug kann das komplexe Produktsystem in seinen vielfältigen Prozessen mit integrierten Prozessmodulen in allen Lebensphasen handhabbar für die nachfolgende Datengenerierung gemacht werden, wobei aufgrund der Parameterbeziehungen weniger Daten insgesamt aufgenommen werden müssen und aus der Umwandlung mit Standard-Parametern zudem auf fehlende Datenwerte geschlossen werden kann.

Zur Datenvalidierung sollte in iterativen Schritten jedes Datenerhebungsblatt hinsichtlich Zuordnungen und Werten überarbeitet werden. Eine Überprüfung ist beispielweise mit einer Massebilanz vorzunehmen, indem der korrekte Erhalt der Masse jedes Prozessmoduls durch eine Masseverteilung von insgesamt 100% pro Komponente oder in geringen Abschlägen von Vernachlässigungen gewährleistet wird. Durch die Komplexität von Transportsystemen ist es von Vorteil, eine Beschränkung auf die relevantesten Materialien vorzunehmen, kritische Rohstoffe wie Titan und Kobalt sind trotz geringer Masse aufzunehmen, da sie eine hohe Umweltrelevanz besitzen. Auch ist bei der Datenvalidierung für das in Tabelle 11 gezeigte Datenerhebungsblatt anzumerken, dass die Prozessenergie der Fahrzeugherstellung in einem separaten Prozess berücksichtigt wird und somit nicht in den einzelnen Prozessmodulen der Komponentenherstellung enthalten ist. Für diese können zur Überprüfung Energiebilanzen nach dem Energieerhaltungssatz durchgeführt werden.

Damit die Modellstruktur zur Berechnung des Fahrzeugs in größtmöglicher Weise dem realen Fahrzeug und allen physisch eingesetzten Komponenten und Energieverbräuchen entspricht, ist ein iterativer Austausch mit entsprechenden Fahrzeugherstellern bzw. mit weiteren Praktikern und Experten notwendig. Für das Erreichen einer hohen Vollständigkeit in den quantitativen Daten für das Produktsystem trotz vorerst fehlenden Daten können diversifizierte Datengenerierungstechniken hinzugezogen werden, um insbesondere vom Fertigungsprozess entfernte Prozesse in den relevantesten Bestandteilen quantifizieren zu können. Denn wie bereits dargelegt, beinhaltet die Datenerhebung in diesem letzten Schritt der Generierung quantitativer Daten weitere Unsicherheiten bezüglich der genauen Mengen, die umso größer werden, je geringer der Anteil an gemessenen Primärdaten gegenüber den Sekundärdaten wird. Für die konventionelle, bereits Marktreife erlangte Technologie stehen jedoch für gewöhnlich eine große Anzahl an Primärdaten zur Verfügung. Zu allen weiterhin fehlenden Daten existieren vielfältige Datengenerierungstechniken für die Beschaffung quantitativer Daten der Input- und Outputflüsse. Tabelle 12 zeigt eine Übersicht an Datengenerierungstechniken, die aus der Literatur aufgegriffen, spezifisch umgewandelt und erweitert wurden zur Anwendung auf Produktsysteme von Fahrzeugtransporten.

Unter Rückgriff einer Bewertung der Passgenauigkeit von Parvatker und Eckelman (2019) sowie der Erweiterung auf neue Techniken resultiert für die Datenlieferung die größte Sicherheit, wenn Daten zum gleichen Produktsystem bzw. Prozessmodul mittels eigenen Verbrauchsmessungen, softwarebasierten Simulationen zu Komponentenspezifikationen bzw. Energieverbrauch, Fahrzeugbetriebshandbüchern sowie weiteren intern auswertbaren und nicht öffentlich zugänglichen Informationen erzeugt werden können. Weiterhin lassen sich spezifische Daten von ähnlichen existierenden oder generischen Produktsystemen bzw. Prozessmodulen verwenden. Es ergibt sich, dass zur Nachbildung einer konventionellen Technologie im Bereich Transport vielfältige Techniken und Arten der Datenlieferung für vorerst fehlende Daten existieren, da für vollständige Produktsysteme große Mengen an komplexen Daten für Transportsysteme generiert werden müssen.

Tabelle 12 Datengenerierungstechniken zur Vervollständigung von fehlenden Daten für Transportprozesse.

<b>Datengenerierungs- techniken</b>	<b>Technologie- bezug</b>	<b>Transportbeispiel zur Datenherkunft</b>	<b>Bewertung der Passgenauigkeit</b>
Eigene Messung	Zu gleichem Produktsystem	Reale Verbrauchsmessung anhand Hodometer	hoch
Simulation	Zu gleichem Produktsystem	Energieträgermenge und Fahrzeuggewicht eines Fahrzeugentwurfsmodells	mittel bis hoch
Veröffentlichte Messung	Zu ähnlichem Produktsystem	Komponentengewicht aus Fachvortrag	mittel bis hoch
Datenbank	Zu generischem Produktsystem	Durchschnittlicher Flusswert eines Prozesses	mittel
Produktbandbuch	Zu gleichem Prozessmodul	Komponentenanzahl in Fahrzeugbetriebshandbuch	hoch
Interne auswertbare Information	Zu gleichem Prozessmodul	Maschineneinsatzdauer in Bautagebuch	hoch
Expertenabschätzung	Zu gleichem Prozessmodul	Durchschnittslebensdauer eingesetzter Komponente	mittel bis hoch
Literaturwert	Zu ähnlichem Prozessmodul	Materialzusammensetzung anderer Forschungsstudie	mittel bis hoch
Formeln und Naturgesetze	Zu generischem Prozessmodul	Kraftstoffverbrennung durch Stöchiometrie	mittel
Geometrische Berechnung	Zu generischem Prozessmodul	Ermittelte Rohstoffmenge zu realer Bauteilzeichnung	mittel
Hochskalierte Teilberechnung	Zu generischem Prozessmodul	Berechnete Prozessenergie für gesamte Fertigung	niedrig bis mittel
Eigene Schätzung	Zu generischem Prozessmodul	Distanz eines Transportprozesses	niedrig
Vernachlässigung	Von irrelevanten Prozessmodulen	Geringe Rohstoffmenge in Prozessmodulherstellung	-

Die Datengenerierung eines generischen Fahrzeugtransports wird abschließend differenziert in die Datensammlung für die funktionelle Einheit sowie für die einzelnen Prozesse in den Lebensphasen. Für Daten der FU eines Fahrzeugtransports sollte eine Verwendung von Durchschnittswerten erfolgen, da selbst unter einem kontinuierlichen Monitoring von Transportfahrten die Vielzahl von einzelnen Datenmesspunkten in das LCI-Modell nicht integriert werden können. Die durchschnittlichen Daten können eigenen Messungen zu Fahrzyklus, Tages- oder Jahresfahrten und deren Beladung oder statistischen Zahlen in veröffentlichten Berichten zu dem jeweiligen Mobilitätstyp entnommen werden. Neben der Aktualität der Daten sollten zur Vergleichbarkeit die Daten das Produktsystem hinreichend widerspiegeln, jedoch statistische Ausreißer wie den Beginn der Corona Pandemie vernachlässigen. Sind die Daten der funktionellen Einheit quantitativ dokumentiert, müssen die Daten über den Lebensweg des Produktsystems gesammelt werden.

Zur Herstellung des Verkehrsmittels können spezifische bis generische Daten für die Prozesse der Massehauptgruppen Antriebssystem, Tragstruktur und Standardausrüstung sowie Komponententransport und Montage beschafft werden. Spezifische Werte können einer Stückliste der Teilkomponenten aus den Massehauptgruppen entnommen werden, zudem kann auf veröffentlichte Daten von Fahrzeugherstellern für ähnliche Produktsysteme zurückgegriffen werden. Sind Standorte der Fabriken bekannt, können Transportwege

---

bestimmt werden, und sind diese zudem zugänglich, können Verbrauchsmessungen für die Herstellungsverfahren vorgenommen werden. Für alle unbekanntenen Werte ist sich mit generischen Datengenerierungstechniken wie eigenen Schätzungen daran anzunähern oder diese müssen komplett vernachlässigt werden.

Für den Fahrzeugbetrieb können ebenfalls Durchschnittswerte anhand von Transportfahrten beschafft und auf Basis der Standard-Parameter Energieverbrauch während dem Fahrzyklus sowie Energieverbrauch zu Beginn und zum Ende jedes Fahrzyklus der durchschnittliche Kraftstoffverbrauch ermittelt werden. Sind keine spezifischen Daten zum Energieverbrauch messbar, unterstützen statistische Zahlen in veröffentlichten Berichten. Aus dem Verbrauch der Energieträger lassen sich die Inputflüsse der Kraftstoffherstellung im Hintergrundsystem mittels LCA-Datenbanken wie ecoinvent und Datensätzen zur generischen Bereitstellung des Kraftstoffs bestimmen und quantifizieren. Zur Verbrennung der Kraftstoffe als Outputflüsse ist der spezifische Motor zu berücksichtigen, der im Verbrennungsprozess Emissionen wie Kohlendioxid, Stickoxide und Schwefeloxide erzeugt. Generische Verbrennungsprozesse können aus Umweltberichten und Handbüchern entnommen werden, die anhand durchschnittlicher Fahrprofile für bestimmte Fahrzeuggrößen und Fahrzyklen die durchschnittlich emittierten Schadstoffe angeben. Beispiele für Emissionshandbücher sind *Air pollutant emission inventory guidebook 2019* (EMEP/EEA, 2019), *UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting* (GOV.UK, 2022) oder das *Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs* (INFRAS, 2022).

Am Lebensende des Verkehrsmittels müssen alle Fahrzeugkomponenten anhand der Standard-Parameter Fahrzeugverwertungsverteilung bzw. Materialverwertungsverteilung in ihre Verwertungswege unterteilt werden, wobei die inhärenten Rohstoffe entweder beseitigt, verbrannt oder recycelt und dann als Sekundärrohstoffe wiederaufbereitet werden können. Welcher Anteil eines Rohstoffs von der Gesamtmenge dem Recycling zugeführt und wiedergewonnen werden kann, hängt einerseits von der Möglichkeit der Trennung der Komponenten in die einzelnen Bestandteile ab und ist umso schwieriger, je größer das Fahrzeug ist und je komplexer die Komponenten verbaut sind, andererseits können im Recyclingprozess nicht alle Stoffe gleichermaßen wiederaufbereitet werden, sodass sich auf die wertvollsten Materialien fokussiert wird. Weiterhin sind Recyclingtechnologien noch nicht flächendeckend verbreitet, sodass je nach Standort des Fahrzeuglebensendes ggf. keine Möglichkeiten der Komponententrennung zur Verfügung stehen, wobei sich die Etablierung von Recyclingprozessen an den untersuchten Standorten bis zum Lebensende verbessert haben könnte. Aktuelle Recyclingmengen auf Rohstoffebene der wichtigsten Rohstoffe lassen sich globalen Berichten wie *Recycling Rates of Metals* (UNEP, 2011) oder dem alle vier Jahre für die EU erscheinenden Bericht *Study on the EU's list of Critical Raw Materials* (EU COM, 2020) entnehmen. Die Ermittlung und Quantifizierung von Daten zur Trennung und Verteilung der Materialien auf die verschiedenen Verwertungswege erfordert eine komplexe Untersuchung auf Fahrzeugbauteilebene, die von Fahrzeugingenieuren begleitet oder von Herstellerseite eingeschätzt werden sollte.

Als durchzuführende Schritte für Ökobilanzierer in der zweiten Stufe zur Datenerhebung sind in die Sachbilanz einzubeziehende Daten für alle Prozessmodule innerhalb der Systemgrenzen qualitativ und quantitativ zu sammeln. Zur Umsetzung notwendige Maßnahmen sind die Auflistung von Flüssen anhand von Datensatz-Fluss-Listen und von relevanten Daten aller Prozessmodule anhand von Datenerhebungsblättern. Weiterhin ist

die Bestimmung von Datengenerierungstechniken notwendig und alle Unregelmäßigkeiten der quantifizierten Daten müssen eindeutig dokumentiert bzw. bestenfalls beseitigt werden. (DIN EN ISO 14044)

#### 4.4 Dritte Stufe der Datenberechnung zur Modellquantifizierung des Transportmodells

Nach abgeschlossener Modellausbildung und Datenerfassung lässt sich in der letzten Stufe der ex-post Sachbilanz das konventionelle Fahrzeug nun in allen Modellbausteinen von Prozessen, Parametern und Flüssen quantitativ nachbilden. Hierfür sind alle beschafften Daten über den Lebensweg des Fahrzeugs in das Transportmodell zu integrieren und zu verrechnen, woraus die finalisierten Sachbilanz-Ergebnisse ermittelt werden können. Zum Abschluss der LCI entsteht daher eine ganzheitliche Verknüpfung der einzelnen qualitativen Prozesse der ersten Stufe mit den quantitativen Input- und Outputflüssen der zweiten Stufe, um die Quantifizierung aller gesammelten Daten durchzuführen. Die Berechnung des Produktsystems erfolgt sukzessive, indem die Werte der einzelnen Prozessmodule und Prozesse zunächst zu Lebensphasen und daraufhin zu dem gesamten Transportprozess des Fahrzeugs bezogen auf die FU zusammengefasst werden. Das Vorgehen ist in Abbildung 18 übergeordnet dargestellt.

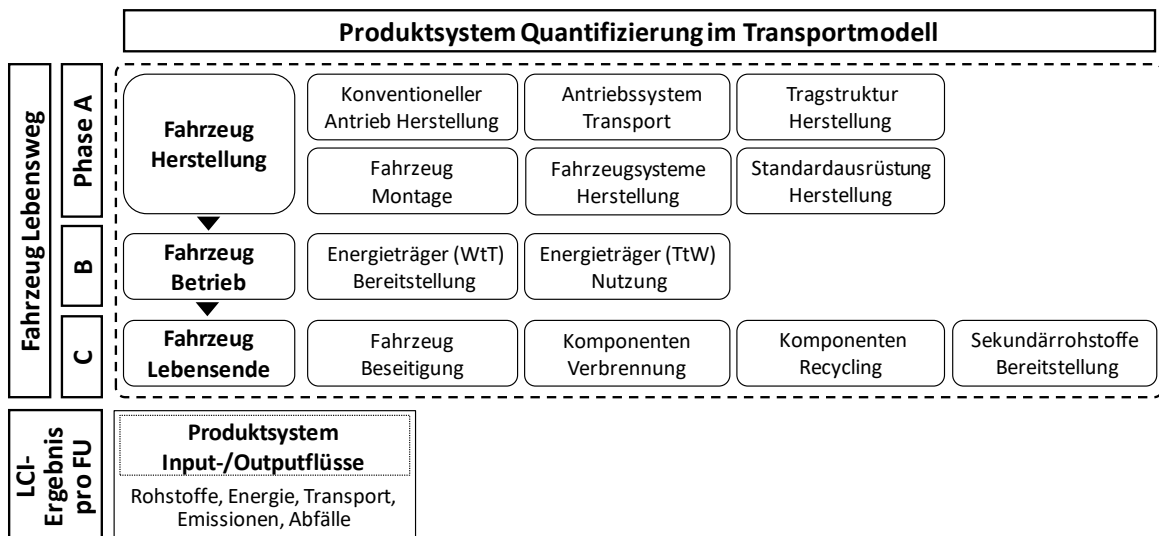


Abbildung 18 Übergeordnete Prozessstruktur im Transportmodell zur Integration und Verrechnung von Daten.

Die detaillierte Verrechnung erfolgt zunächst auf Prozessmodulebene, bei welcher die Daten auf einen Prozess mit den jeweils integrierten Prozessmodulen bezogen werden, wie im Datenerhebungsblatt von Tabelle 11 aufgezeigt ist, um daraufhin über den Lebensweg alle Flusswerte zu bestimmen. Aufgrund vielfältiger Aggregationsschritte der komplexen Fahrzeugstruktur und der damit einhergehenden Fehleranfälligkeit der Datenzuordnung des Produktsystems ist eine Excel-basierte Modellnachbildung für Fahrzeugtransporte ratsam, zudem dient dieses Modell zur Dokumentation der Verrechnungsverfahren. Die generische Struktur und das Berechnungsverfahren zur Modellnachbildung der ex-post Sachbilanz eines konventionellen Verkehrsmittels ist in Abbildung 19 dargestellt.

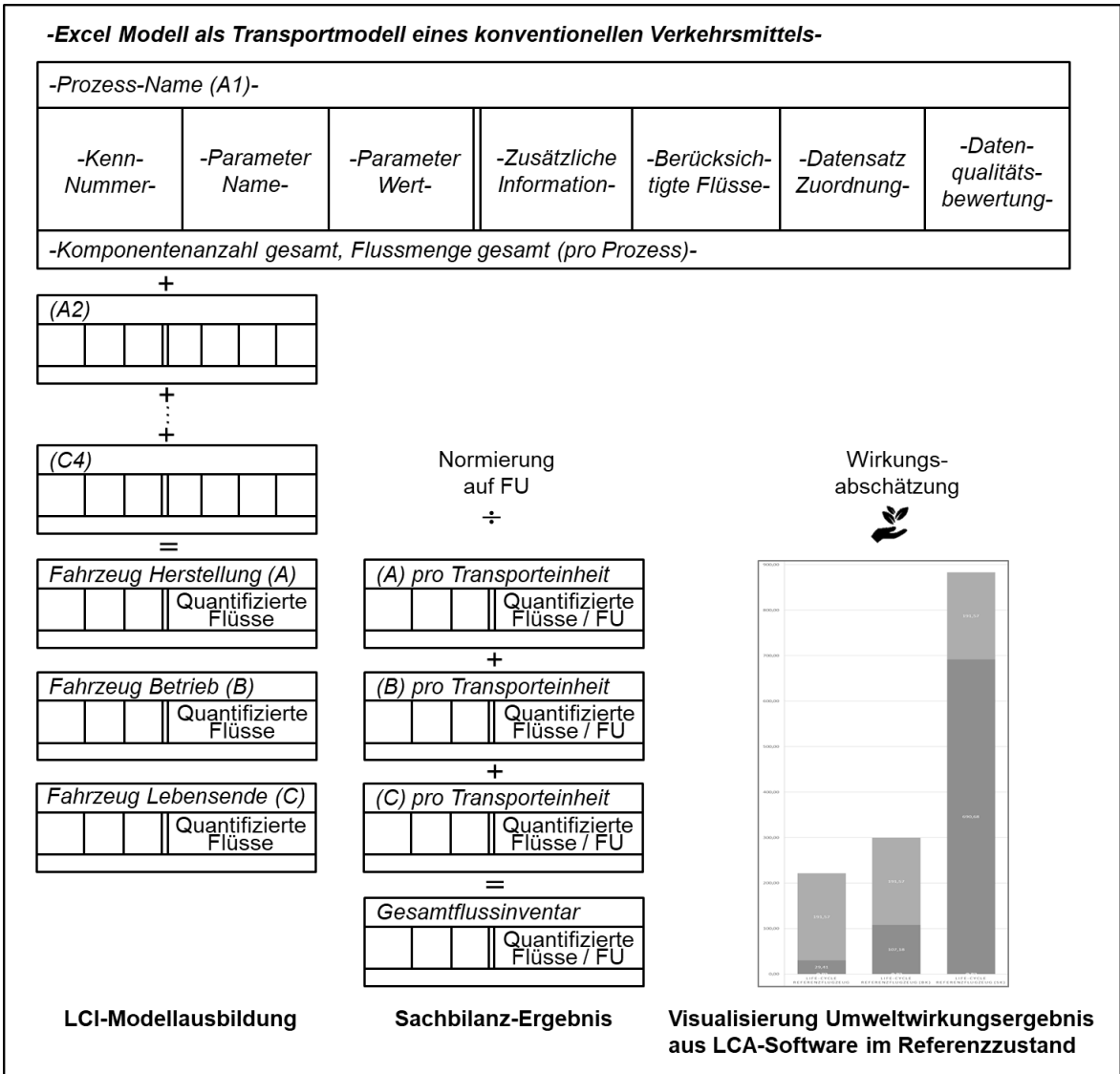


Abbildung 19 Excel-basierte Verrechnung quantifizierter Flüsse zur Nachbildung eines konventionellen Fahrzeugs im parametrisierten Transportmodell.

Es wird empfohlen, das Sachbilanz-Modell für komplexe Produktsysteme wie Verkehrsmittel in einer solchen Excel-Datei als Transportmodell nachzubilden und zu verrechnen, um alle Flüsse der einzelnen Prozessmodule korrekt zu quantifizieren und dem Gesamtflussinventar zuzuordnen. Das Gesamtflussinventar stellt das abschließend zusammengefasste und normierte Ergebnis der Sachbilanz dar, welches auf allen Bestandteilen des parametrisierten und vollumfänglichen Transportmodells der LCI basiert. Mit diesem sollen für die funktionelle Einheit des Fahrzeugtransports alle lebenswegbezogenen Input- und Outputflüsse zusammengefasst werden, die sich auf die Biosphärenflüsse u.a. von Rohstoffen und Energie bzw. Emissionen und Abfällen zurückführen lassen. Die quantifizierten Flüsse bilden in der Gesamtmenge die Sachbilanz des Produktsystems ab, aus welcher die Umweltwirkungen für das konventionelle Verkehrsmittel ermittelt werden können. Das Produktsystem des CT kann als LCI-Ergebnis mit den in Tabelle 13 aufgelisteten Flüssen über den Lebensweg dargestellt werden und ist in Abhängigkeit des nachgebildeten Fahrzeugs weiter zu spezifizieren.

Tabelle 13 Quantifiziertes und normiertes Gesamtflussinventar zur Bereitstellung der Transportfunktion.

Lebensweg	<b>Gesamtflussinventar des Fahrzeugtransports</b>			
	Enthält die Sachbilanz aller Flüsse pro funktioneller Einheit für die Bereitstellung eines spezifischen Produktsystems zu einem bestimmten Modellierungszeitpunkt			
	<b>Fluss-kategorie</b>	<b>Fluss-richtung</b>	<b>Produkt- und Elementarflüsse</b>	<b>Normierter Einheitsanteil</b>
A – Herstellungsphase	Rohstoffe	Input	Aluminium Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	Stahl Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	Chrom-Stahl Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	Kupfer Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	Nickel Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	Nickel-Legierung Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	Titan Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	Kobalt Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	CFK Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	GFK Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	PET Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	PP Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	PVC Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	PUR Bereitstellung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Input	Gummi Bereitstellung	+ kg/FU
	Transport	Input	Transport Straße	+ tkm/FU
	Transport	Input	Transport Luft	+ tkm/FU
	Energie	Input	Strom Bereitstellung	+ kWh/FU
	Energie	Input	Wärme Bereitstellung	+ MJ/FU
	Energie	Input	Lackierung Bereitstellung	+ kg/FU
B – Nutzenphase	Energie	Input	Kraftstoff Bereitstellung	+ kg/FU
	Emissionen	Output	Kohlendioxid Emission	- kg/FU
	Emissionen	Output	Stickoxide Emission	- kg/FU
	Emissionen	Output	Schwefeloxide Emission	- kg/FU
	Emissionen	Output	Wasser Emission	- m3/FU
	Emissionen	Output	Kohlenmonoxid Emission	- kg/FU
	Emissionen	Output	Kohlenwasserstoffe Emission	- kg/FU
C – Entsorgungsphase	Transport	Input	Transport Straße	+ tkm/FU
	Energie	Input	Strom Bereitstellung	+ kWh/FU
	Abfälle	Output	Abfall Deponierung	- kg/FU
	Energie	Output+Input	Verbundwerkstoffe Verbrennung	+ kg/FU
	Energie	Output+Input	PET Verbrennung	+ kg/FU
	Energie	Output+Input	PP Verbrennung	+ kg/FU
	Energie	Output+Input	PVC Verbrennung	+ kg/FU
	Energie	Output+Input	PUR Verbrennung	+ kg/FU
	Energie	Output+Input	Gummi Verbrennung	+ kg/FU
	Rohstoffe	Output	Aluminium Recycling	- kg/FU
	Rohstoffe	Output	Stahl Recycling	- kg/FU
	Rohstoffe	Output	Edelmetalle Recycling	- kg/FU
	Rohstoffe	Output	Polymere Recycling	- kg/FU
	Rohstoffe	Output+Input	Aluminium Sekundärrohstoffe	+ kg/FU
	Rohstoffe	Output+Input	Stahl Sekundärrohstoffe	+ kg/FU
	Rohstoffe	Output+Input	Edelmetalle Sekundärrohstoffe	+ kg/FU
Rohstoffe	Output+Input	Polymere Sekundärrohstoffe	+ kg/FU	



---

Das Gesamtflussinventar besteht aus allen im Modell quantifizierten Flüssen und stellt die Summe jedes vorhandenen Flusses wie die Aluminium Bereitstellung heruntergerechnet auf z.B. einen Personenkilometer als Normierung auf die funktionelle Einheit im Produktsystem dar. Die Flüsse sind unterteilt in Produktflüsse, die als Input- und Outputflüsse innerhalb der Technosphäre beispielsweise die Bereitstellung des Primärmaterials Aluminium oder das Recycling des genutzten Materials Aluminium umfassen sowie alle zu diesem Zweck vor- bzw. nachgelagerten Prozesse mit weiteren Flüssen, und in Elementarflüsse, bei denen Outputflüsse wie Kohlendioxid und Stickoxide aus Verbrennungsprozessen direkt in die Biosphäre gelangen. Das Produktsystem des Fahrzeugs als Vordergrundsystem ist mit allen quantifizierten Flüssen folglich in einen größeren Kontext von vor- und nachgelagerten Prozessen des Hintergrundsystems im Rahmen von Datensätzen eingebettet, aus denen als letzte Umwandlung stets Elementarflüsse aus der bzw. in die Biosphäre resultieren. Die normierte Menge von allen Flüssen des Fahrzeugtransports kann abschließend vollständig in nur einer Spalte pro Produktsystem dargestellt werden und veranschaulicht für einen bestimmten zeitlichen Zustand das Resultat der Sachbilanz.

Im Nachgang zur Quantifizierung der Sachbilanz, welche nach der Verrechnung des Transportmodells mit dem Erhalt des Gesamtflussinventars abgeschlossen ist, erfolgt aus dem LCI-Ergebnis als Gesamtheit vollständig aggregierter Flüsse die Wirkungsabschätzung, die üblicherweise auf Basis einer Modellierung in einer Ökobilanz-Software durchgeführt wird. Entweder kann die softwaretechnische Umsetzung der Sachbilanz des Produktsystems aus dem Gesamtflussinventar anhand einer Blackbox-Modellierung in nur einem Datensatz erfolgen oder aus dem prozessbasierten Transportmodell anhand einer Whitebox-Modellierung in vielfältigen Datensätzen, die alle Prozesse und inhärenten Prozessmodule wiedergeben. Da die Umweltwirkungen erst auf verschiedene Prozesse bzw. Prozessmodule zurückführbar sind, wenn sie einzeln modelliert werden, wird eine detaillierte Modellierung anhand aller Bestandteile des Excel-basierten Transportmodells in der Ökobilanz-Software empfohlen. Aus der Modellierung lassen sich die jeweiligen Umweltwirkungsergebnisse ermitteln u.a. in den Wirkungskategorien Klimawandel, Photochemische Ozonbildung und Mineralischer Ressourcenverbrauch. Nach der Umsetzung der vier Phasen der Ökobilanz kann daher ein Wirkungsabschätzungsprofil für die Ergebnisse des CT im Referenzzustand erzeugt werden, welches sich mit anderen etablierten Produktsystemen vergleichen lässt.

Folglich bildet das in der LCI entwickelte Transportmodell die vollständige prozessbasierte Nachbildung des verrechneten Vordergrundsystems anhand von Parametern und Flüssen ab und endet mit dem LCI-Ergebnis eines spezifischen Gesamtflussinventars, das alle Flüsse enthält, die zusammenfasst die Gesamtauswirkung des Fahrzeugtransports auf die Umwelt ergeben. Als abschließendes Ergebnis der zweiten Phase der Ökobilanz sind mit Vollendung der ex-post Sachbilanz alle LCI-Daten an die dritte Phase der Wirkungsabschätzung zu übermitteln, um in iterativen Schritten zum Umweltwirkungsergebnis der Ökobilanz im Referenzzustand zu gelangen. Weiterhin kann die Sachbilanz erneut umgesetzt werden, um auf Grundlage des entwickelten Transportmodells und allen darin enthaltenen Bestandteilen ein neues Produktsystem in Form eines neuartigen Verkehrsmittels nachzubilden, worauf im nachfolgenden Kapitel im Detail eingegangen wird.

Als durchzuführende Schritte für Ökobilanzierer in der dritten Stufe zur Datenberechnung werden alle durch Messung, Berechnung oder Schätzung beschafften Daten verwendet zur quantitativen Bestimmung der Input- und Outputflüsse eines Prozessmoduls. Zur Umsetzung

notwendige Maßnahmen sind die Bestimmung und Quantifizierung der Flüsse für jedes Prozessmodul und die Dokumentation der Berechnungsverfahren, die im Transportmodell zusammengefasst werden, sowie der Bezug aller Inputs und Outputs des Produktsystems auf die funktionelle Einheit und die Erstellung einer Liste mit den verwendeten Einheiten, die im Gesamtflussinventar bereitgestellt werden. (DIN EN ISO 14044)

#### **4.5 Zusammenfassung von Kernelementen der ex-post Sachbilanz für konventionellen Transport**

Das Vorgehen in diesem Kapitel zur Nachbildung konventioneller Verkehrsmittel kann in die drei Stufen von Abbildung 20 differenziert werden, die auf den Bearbeitungsschritten der Sachbilanz aus der ISO Norm basieren.

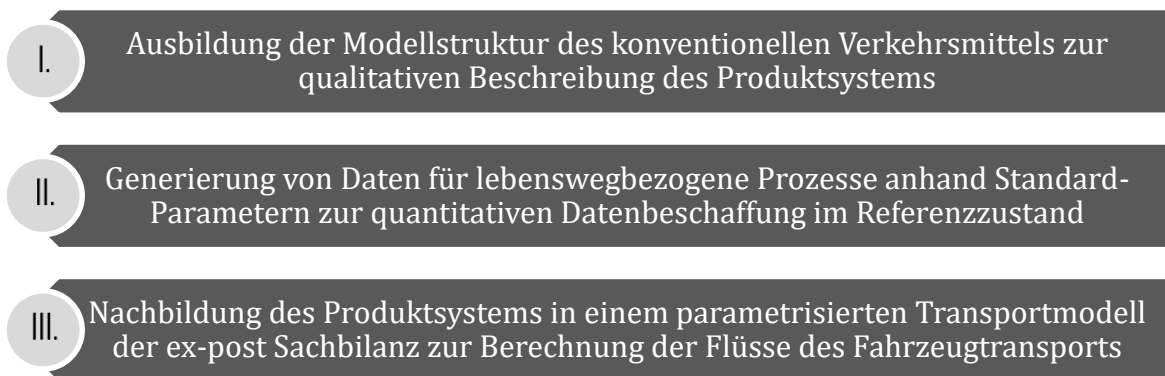


Abbildung 20 Vorgehensweise für die dreistufige Durchführung der ex-post Sachbilanz von konventionellen Verkehrsmitteln zur Entwicklung des Transportmodells.

Für die Anwendung der Methode von Kapitel 4 ist für Ökobilanzierer zusammenzufassen, dass in der ersten Stufe das Modell strukturell ausgebildet werden muss, in der zweiten Stufe die Daten für das Modell gesammelt und in der dritten Stufe die Daten zur Quantifizierung in das Modell integriert und verrechnet werden müssen. Mit dieser Vorgehensweise erhalten Ökobilanzierer ein vollständiges Transportmodell, mit dem einerseits die Umweltwirkungen für den abgebildeten Zustand zur Entscheidungsunterstützung von Entscheidungsträgern ermittelt werden können und andererseits dieses Modell als Vorlage zur weiterführenden Nachbildung von neuartigen und zukunftsgerichteten Verkehrsmitteln in der erweiterten Sachbilanz genutzt werden kann.

## 5 Zweiter Methodenteil der ex-ante Sachbilanz zur Nachbildung neuartiger Verkehrsmittel

### 5.1 Allgemeines zur ex-ante Sachbilanz Methodik

Für die in Kapitel 3 herausgearbeitete übergeordnete Methodik der Arbeit wurden drei Bestandteile identifiziert, von denen nach der Vorstellung der ex-post Sachbilanz in Kapitel 4 nun in diesem Kapitel der zweite Methodenteil der ex-ante Sachbilanz zur Nachbildung einer in Entwicklung befindlichen Technologie behandelt wird. Auf Basis der Typologie von Verkehrsmitteländerungen und den getätigten Festlegungen in Kapitel 3.3.2 wird das Modell neuartiger Fahrzeuge sukzessive anhand der Umwandlung des Transportmodells vorgestellt. Ein umfassendes Verständnis über das vollständig nachzubildende Produktsystem *Transport-Transformationslösung* soll zum Abschluss erreicht werden, indem anhand der strukturellen Einordnung des neuartigen Fahrzeugs zu allen veränderten Modellbausteinen von Prozessen, Parametern und Flüssen als Ergebnis ein Transformationsmodell mit quantifiziertem Gesamtflussinventar entsteht. Die generischen Modellbausteine der TTS und deren Integration in das parametrisierte Modell der ex-post Sachbilanz sollen die Durchführung einer Ökobilanz von in Entwicklung befindlichen Fahrzeugen handhabbar machen. Die Vorgehensweise der eLCI demonstriert auf Basis von klassifizierten Technologieveränderungen aus der Typologie die methodischen Änderungen für die Nachbildung von TTS in drei Stufen zur Verwendung des nicht-modifizierten Modells für die Umweltbewertung bzw. für die weitere Modifizierung. Mit dem Vorgehen der ersten Erweiterung der Ökobilanzierung sollen Ökobilanzierer und Praktiker angeleitet werden zur qualitativen Aufbereitung neu hinzugekommener und veränderter Bausteine der Sachbilanz sowie der quantitativen Beschaffung zur Entwicklung des Transformationsmodells unter der Kennzeichnung von Endresultaten für die Umweltbewertung. Den Entscheidungsträgern sollen die eLCI-Ergebnisse hieraus klar ersichtlich in Abgrenzung zur Vergleichstechnologie und nachgelagerten Zukunftsveränderung aufbereitet werden.

Grundlage der Methodenerweiterung sind die standardisierten drei Stufen Vorbereitung der Datenerhebung, Datenerhebung und Datenberechnung aus der ISO Norm, die im vorherigen Kapitel der ex-post Sachbilanz ausführlich behandelt worden sind. Das erweiterte Verfahren zur Durchführung der neu entwickelten ex-ante Sachbilanz für Technologieveränderungen ist in Abbildung 21 dargestellt mit dem übergeordneten Ziel der Parameter-Generierung für neuartige Fahrzeuge zur Entwicklung des Sachbilanz-Modells als Transformationsmodell.

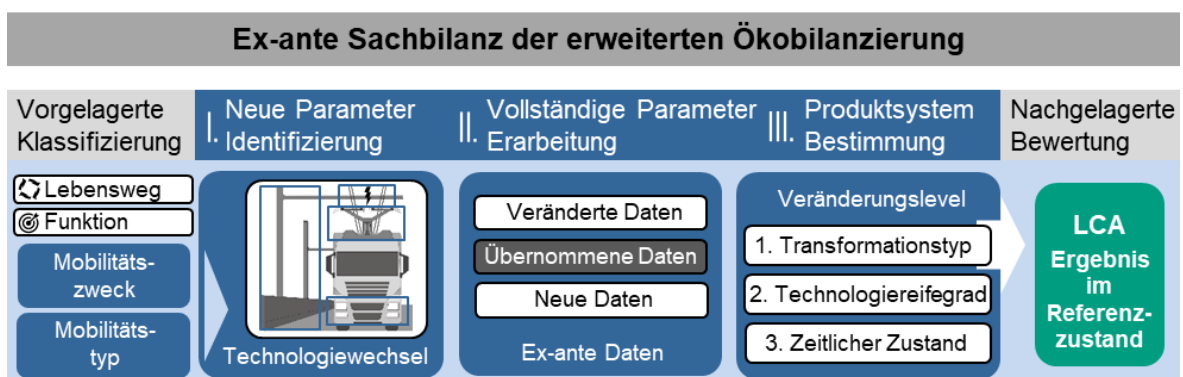


Abbildung 21 Dreistufiger Ansatz zur Durchführung der ex-ante Sachbilanz als Erweiterung der Ökobilanzierung.

---

Die vorgelagerte Stufe der TTS-Klassifizierung basiert auf der Einordnung in die Kategorien Mobilitätstyp, Mobilitätszweck und Transformationstyp zur Abgrenzung und zugleich zur Gewährleistung der funktionalen Vergleichbarkeit mit dem CT. In der ersten Stufe *Neue Parameter Identifizierung* erfolgt anhand der Differenzierung in identische Standard-Parameter und zusätzliche Transformations-Parameter die qualitative Untersuchung von sich verändernden und neu hinzukommenden Bestandteilen des spezifisch kombinierten Transformationstyps. Die strukturelle Nachbildung der Veränderungen und die Bereitstellung aller Parameter des vollständigen Modells einer konkreten TTS-Variante und deren detaillierter Beschreibung ermöglicht die weitere quantitative Untersuchung. In der zweiten Stufe *Vollständige Parameter Erarbeitung* werden anhand einer Differenzierung in veränderte, übernommene und neue Datenwerte für die TTS alle vorhandenen veränderten Daten beschafft, identische Daten des konventionellen Produktsystems übernommen und neue fehlende Daten anhand von Techniken generiert. In der dritten Stufe *Produktsystem Bestimmung* werden die veränderten quantifizierten Bestandteile in das vorhandene Transportmodell übertragen und verrechnet zur quantitativen Nachbildung der TTS im erweiterten Transformationsmodell mit dem finalisierten Sachbilanz-Ergebnis der eLCI. Daraufhin erfolgt die Kenntlichmachung relevanter Veränderungsbereiche für die TTS in drei Level anhand erstens der Maßnahmenkombination der Energienutzungsveränderung für den Transformationstyp, zweitens des Reifegrads der TTS und drittens des zeitlichen Zustands der Umweltbewertung für einen bestimmten Betrachtungszeitpunkt. Die nachgelagerte Stufe der Umweltbewertung resultiert in einem neuen Wirkungsabschätzungsprofil pro TTS für den Referenzzustand. Nachfolgend werden als ganzheitliche Betrachtung neuartiger Fahrzeuge zur Modellierung während der Technologieentwicklung die drei Hauptstufen sowie die vor- und nachgelagerte Stufe der ex-ante Sachbilanz für Transport-Transformationslösungen in allen veränderten Bestandteilen im Detail dargelegt.

## **5.2 Vorgelagerte Stufe der ex-ante Sachbilanz zur Klassifizierung von Transport-Transformationslösungen**

Das Vorgehen in der eLCI soll eine Erweiterung der LCI für eine technologisch vollständige Repräsentation der TTS darstellen. Hierfür ist in der vorgelagerten Stufe das neuartige Fahrzeug in seinen Spezifikationen zunächst genauer einzuordnen, um daraufhin zur TTS-Ausbildung die konkrete technologische Veränderung aufzuzeigen. Um ein neuartiges Verkehrsmittel hinsichtlich technologischer Änderungen vollständig nachzubilden, muss für eine vergleichbare funktionelle Einheit unter Rückgriff der Vergleichstechnologie die Transportfunktion definiert werden, für welche der Mobilitätzweck zu bestimmen ist, der dem konventionellen Verkehrsmittel entsprechen sollte. Zur Zuordnung der Modelle von den Technologiealternativen wird die zu verändernde Technologie auf einen bestimmten Mobilitätstyp festgelegt, der für CT und TTS ebenfalls identisch sein sollte. Als Erweiterung des konventionellen Transports ist für die Transport-Transformationslösungen der Transformationstyp zu definieren, welcher die Veränderungen des neuartigen Fahrzeugs gegenüber dem konventionellen Fahrzeug aufzeigt. Die Kombinationen des Transformationstyps können in vier Änderungsintensitäten unterteilt werden. Eine geringe Transformationsintensität stellt einen Energieträgerwechsel in der Nutzenphase dar, eine mittlere Transformationsintensität besteht bei einem physischen Komponentenaustausch im

---

Produktsystem anhand eines Antriebssystemwechsels, eine große Transformationsintensität umfasst eine Formänderung des Fahrzeugs anhand von einem Tragstrukturwechsel und eine zusätzliche Transformationsintensität besteht bei dem Bedarf an weiteren kontinuierlichen Infrastrukturkomponenten als Strominfrastrukturwechsel. Die vier Wechsel für das Fahrzeug werden jeweils unter gleichbleibender FU umgesetzt. Zur Übersichtlichkeit für die weitere Durchführung der eLCI sollte das Ausfüllen des Datenblatts der Vergleichs-Parameter von Tabelle 5 erfolgen, um die Festlegungen aufzulisten. Zur Dokumentation für Ökobilanzierer dient das editierbare Parameterverzeichnis im ersten Dokumentationsblatt für Vergleichs-Parameter zur Ökobilanzierung, welches öffentlich zugänglich ist über die DOI <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1349> (Hanesch, 2024a). Die Vorstufe der eLCI gewährleistet für vergleichende Ökobilanz-Studien, dass TTS mit gleicher Funktion CT substituieren können und präzisiert die TTS zur weiteren Untersuchung. Auf die strukturelle Ausbildung der TTS in allen Bestandteilen wird nachfolgend genauer eingegangen.

### **5.3 Erste Stufe der Neue Parameter Identifizierung zur Ausbildung der Modellstruktur von Transport-Transformationslösungen**

Nachdem in Kapitel 4 bereits eine detaillierte Darstellung der Modellbausteine zu Prozessen, Parametern und Flüssen für das parametrisierte LCI-Modell konventioneller Verkehrsmittel erfolgt ist, können diese nun auf neuartige Verkehrsmittel übertragen werden, um konkret auf die Veränderungen des Technologiewechsels einzugehen und die standardisierte Vorgehensweise der Ökobilanzierung auf TTS zu erweitern. Das Ziel ist mit einer Identifizierung neuer Parameter die übersichtliche Darstellung der Technologieveränderung zu erreichen. In der ersten Stufe der ex-ante Sachbilanz soll demnach die Modellstruktur ausgebildet werden, die auf den Bestandteilen des Transportmodells der ex-post Sachbilanz basiert und eine Ergänzung um den Transformationstyp sowie alle veränderten Prozesse und Parameter enthält. Zu diesem Zweck werden alle für die Veränderung relevanten Prozesse und Parameter als Ergänzung im Transportmodell definiert und im Modell angeordnet, um die Datenaufnahme von neuartigen Fahrzeugen zu strukturieren. Die Erweiterung resultiert in einem Transformationsmodell, in dem Prozesse hinzukommen, sich strukturell ändern, gleichbleiben oder wegfallen.

In der Typologie der TTS sind die Wechsel von Energieträger, Antriebssystem, Tragstruktur und Strominfrastruktur einfühend vorgestellt worden und in der Vorstufe wird weiterhin zur Klassifizierung der spezifischen Technologieveränderungen der Transformationstyp als konkrete Kombination diesen vier Transformationsintensitäten zugeordnet. Die vier Wechsel sind nun im Produktsystem der Transport-Transformationslösung einzeln oder kombiniert in die Fahrzeugstruktur zu integrieren. Folglich resultiert das erste Veränderungslevel der Technologieänderung als Transformationstyp in der vollständigen, detaillierten Nachbildung von Prozessen im Rahmen eines veränderten graphischen Systemfließbilds anhand von einer Farbcodierung aller transformierten Bestandteile. Abbildung 22 zeigt exemplarisch das Systemfließbild des vorherigen Produktsystems des CT ergänzt um die Nachbildung von den vier Wechseln, die in Kapitel 3.3.2 beschrieben wurden und die fast ausschließlich additiv zu dem vorherigen Wechsel das Produktsystem um eine geringe, mittlere, große oder zusätzliche Transformationsintensität erweitern, aus denen sich die konkrete TTS-Variante zusammensetzt.

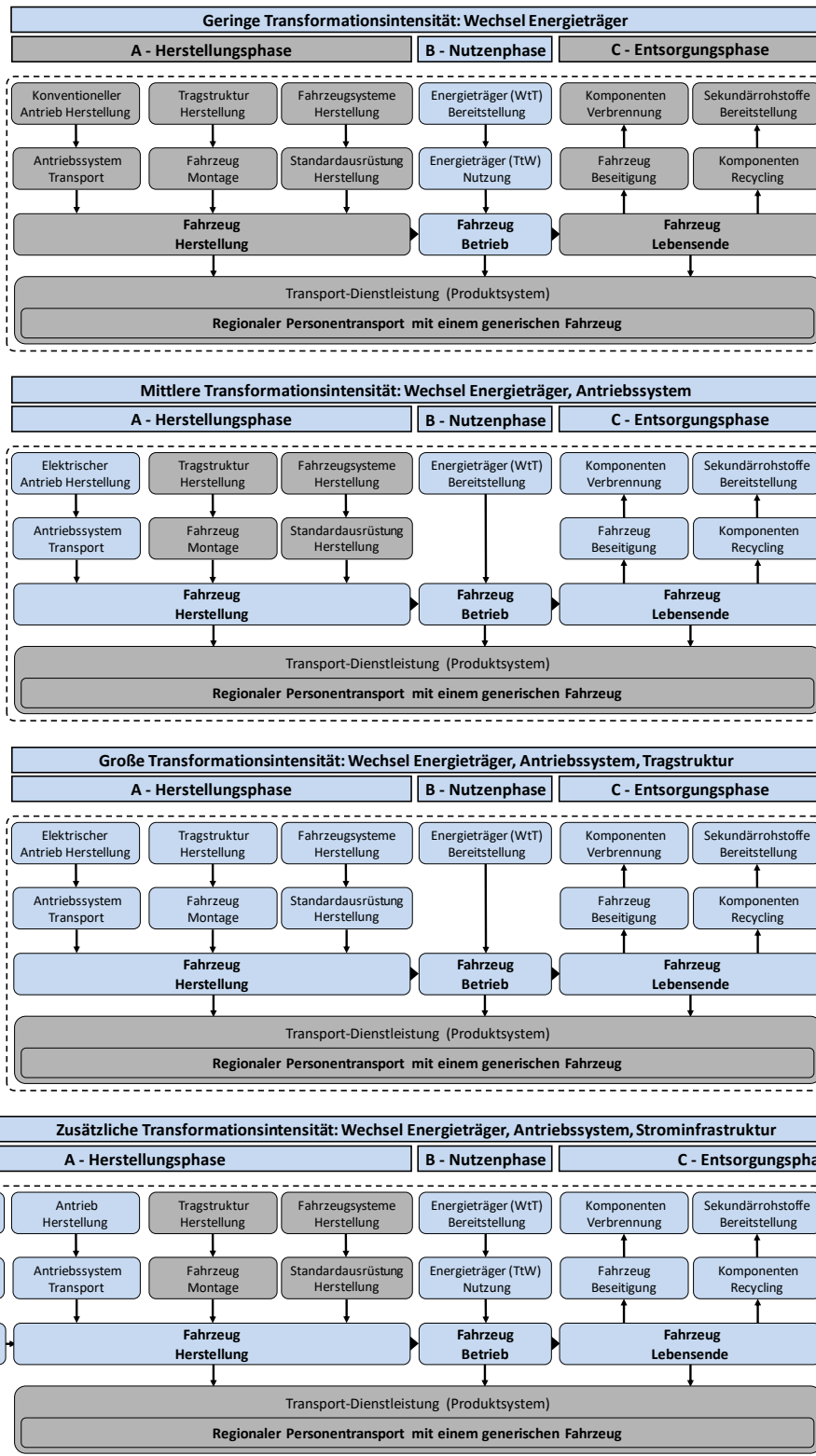


Abbildung 22 Verändertes Systemfließbild von vier Transport-Transformationslösungen als Produktsystem und den über den Lebensweg differenzierten Prozessen (blau: strukturelle Änderung, grau: strukturelle Übernahme).

In den vier TTS-Produktsystemen auf Basis des CT werden differenziert in blau alle zu berücksichtigenden veränderten bzw. neuen Prozesse dargestellt, die für das neuartige Fahrzeug strukturell anzupassen sind hinsichtlich eines vollständigen Prozessaustauschs oder ausgewählten darin enthaltenen Parametern bzw. Flüssen in den Prozessmodulen.



---

Dagegen sind in grau die Prozesse dargestellt, die von der konventionellen Technologie strukturell ohne weitere Anpassungen übernommen werden können und daher im Modell nicht erneut auszubilden sind. Infolge der strukturellen oder sogar wertbasierten Übernahme von kompletten Prozessen bzw. Lebensphasen kann der Zeitaufwand für die nachfolgende Stufe der Datenbeschaffung zur vollständigen Erarbeitung der Parameter reduziert werden, sodass sich zur Modellerweiterung der zusätzliche Nachbildungsaufwand für die weiteren Komponenten und Prozesse teilweise kompensieren lässt.

Zur Entwicklung eines detaillierten Modells folgt die Auflistung übernommener relevanter Parameter des CT für TTS durch das Ausfüllen des Datenblatts der Standard-Parameter von Tabelle 4 sowie neu definierter Parameter der Veränderung durch das Ausfüllen des Datenblatts der Transformations-Parameter von Tabelle 6, sofern diese vorhanden sind. Zusammengefasst werden sie zu den Emerging-Parametern der TTS, für welche quantitative Informationen benötigt werden. Zur Dokumentation für Ökobilanzierer dient das editierbare Parameterverzeichnis im zweiten Dokumentationsblatt für Standard-Parameter und Transformations-Parameter zur retrospektiven Ökobilanzierung, das öffentlich zugänglich ist über die DOI <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1349> (Hanesch, 2024a). Als Resultate werden die übertragenen Parameter der Vergleichstechnologie und die neuen Parameter des Transformationstyps erhalten, die zu quantifizieren sind. Die gelisteten Parameter, welche daraufhin teilweise einfach ausgefüllt werden können, da sie bereits bekannt sind oder übernommen werden können, sollen die nachgelagerte Datenbeschaffung erleichtern, indem für den Ökobilanzierer alle Parameter zusammengefasst im Parameterverzeichnis übersichtlich festgehalten werden, für die Daten zu generieren sind. Zudem lassen sie sich nach abgeschlossener Datensammlung als dokumentierter Datensteckbrief dem Ökobilanz-Bericht für die jeweilige TTS-Variante anhängen, um als transparente Dokumentation der nicht-modifizierten Daten anderen Ökobilanzierern als Dateninput für deren Ökobilanz sowie Entscheidungsträgern als Vergleichsmetrik gegenüber modifizierten Daten zu dienen.

Abschließend sollte zur Ausbildung aller veränderten bzw. neuen Prozessmodule anhand der zusätzlichen Parameter in der Fahrzeugstruktur, die für TTS ebenfalls sehr komplex ist, die Prozessmodulbeschreibung der spezifischen TTS mit den hinzugekommenen, veränderten, gleichen und wegfallenden Bestandteilen auf der bereits herausgearbeiteten Beschreibung des CT anhand dessen Lebensweg-Modell aufbauen. Diese ist wie in der LCI abgebildet als Erweiterung wieder strukturell umzusetzen, um alle Inputs und Outputs des Produktsystems zu berücksichtigen, aus denen die nachfolgende Datenbeschaffung mittels differenzierter Datenerhebungsblätter quantitativ durchgeführt werden kann.

Als durchzuführende Schritte für Ökobilanzierer in der ersten Stufe der *Neue Parameter Identifizierung* zur Vorbereitung der Datenerhebung sollte die Erzeugung von zusätzlichen und veränderten Bestandteilen für die TTS zur Modellerweiterung ebenfalls dokumentiert werden. Zur Umsetzung empfohlene Maßnahmen sind nach erfolgter Einordnung des Transformationstyps in der vorgelagerten Stufe auf dieser Basis die graphisch veränderte Darstellung des Systemfließbilds, welches das Produktsystem der TTS inklusive der farblich markierten Änderungen an den Prozessen aufzeigt, die Auflistung der Standard-Parameter und Transformations-Parameter in einem Parameterverzeichnis, die zur Ausbildung der Prozessmodule notwendig sind, sowie die qualitative Beschreibung der Prozessmodule mit einem Fokus auf die Technologieveränderung.

---

## **5.4 Zweite Stufe der Vollständige Parameter Erarbeitung zur Beschaffung aller quantitativen Informationen der Transport-Transformationslösung**

Die Datenerhebung und nachfolgende Quantifizierung in der ex-ante Sachbilanz basiert auf der qualitativen Nachbildung des neuartigen Fahrzeugs, in welcher die TTS auf Grundlage der konventionellen Technologie und dem bereits ausgebildeten Transportmodell strukturell herausgearbeitet wurde. Für das neue Transformationsmodell werden zur Datengenerierung die quantitativen Werte in allen veränderten Parametern und Flüssen beschafft mit dem Ziel der transparenten Generierung aller Daten der neuen bzw. veränderten Parameter mittels anwendbaren Techniken zur Datensammlung, um alle technologischen Veränderungen des Verkehrsmittels im ersten Veränderungslevel gegenüber dem CT zu berücksichtigen.

Zur Erfassung aller Input- und Outputflüsse über den Lebensweg der konkreten TTS-Variante sind alle spezifischen Hintergrunddaten zur Datenaufnahme des neuartigen Produktsystems erneut zuzuordnen mit der erweiterten Datensatz-Fluss-Liste. Diese listet als Ergänzung zu den vorhandenen Flüssen alle neuen Flüsse auf, die mit generischen oder spezifischen Datensätzen im Hintergrundsystem der TTS kombiniert werden. Die Übersicht über alle Flüsse des Transformationsmodells zeigt auf, für welche wiederum quantitative Daten zu beschaffen sind. Weiterhin sind für die konkrete TTS-Variante alle Datenerhebungsblätter aus der Prozessmodulnachbildung und in Beziehung gesetzten Standard-Parametern bzw. Transformations-Parametern für das komplette neuartige Fahrzeug in allen Prozessen über den Lebensweg aufzusetzen. Sie sind auf Grundlage des CT für jede TTS anzupassen und mit Experten hinsichtlich aller Daten zu befüllen, um diese mit Abschluss der Quantifizierung dem Ökobilanz-Bericht zur Dokumentation anzuhängen.

Für die Datenbeschaffung von neuartigen Technologien gilt, dass Informationen erheblich schwerer in der frühen Technologieentwicklungsphase aufgenommen bzw. erzeugt werden können. Denn je niedriger die Technologiereife ist und je mehr ungesicherte Sekundärdaten genutzt werden, desto höher äußern sich Unsicherheiten zur Quantifizierung der ex-ante Sachbilanz gegenüber der ex-post Sachbilanz. Für alle zu sammelnden Daten, die aufgrund von verknüpften Parametern in der Menge geringgehalten werden können, sind zunächst alle vorhandene Datenwerte in die Datenerhebungsblätter zu integrieren. Für diesen Zweck ist wieder ein iterativer Austausch mit entsprechenden Fahrzeugentwicklern bzw. mit weiteren Praktikern und Experten notwendig. Datenlücken ergeben zur Modellgenerierung die größte Herausforderung, daher erfolgt nach Auflistung aller vorhandenen Daten die Auswahl von Stellvertreterdaten des CT, um zur vollständigen Vergleichbarkeit alle Lebenswegprozesse in gleicher Weise und falls möglich unter Rückgriff auf dieselben Werte zu modellieren. Nach der erweiterten Datensammlung und Wertübernahmen gleicher Standard-Parameter ist die Wertgenerierung für fehlende veränderte Standard-Parameter und neue Transformations-Parameter umzusetzen. Diese reduzierte Parameteranzahl kann nun mittels Datengenerierungstechniken für alle fehlenden Bestandteile unter mehr Detail berücksichtigt werden. Tabelle 14 zeigt die in Kapitel 4 zusammengestellten und für die Datenaufnahme der TTS erweiterten 14 Techniken, die ab unterschiedlichen Reifegraden anwendbar sind.

Im Labormaßstab ab TRL 3 sind für TTS bereits neun Datengenerierungstechniken nutzbar. Als zusätzliche Technik ist die Datenübernahme von der Datenquelle des konventionellen Fahrzeugs integriert, um die vollständige Datenbeschaffung der TTS transparent abzubilden. Nicht geeignet für die in Entwicklung befindlichen Produktsysteme sind Produkthandbücher

zur Fahrzeugnutzung, da diese erst verfügbar sind, wenn Fahrzeuge kommerziell vertrieben werden. Folglich steht bei fehlenden Daten ab der frühen Technologieentwicklungsphase bereits ein Spektrum an Datenaufnahme-Möglichkeiten für TTS bereit, obwohl das Fahrzeug in der Entwicklungsstufe von TRL 3 noch nicht produziert werden kann und kein Pilotbetrieb unter realen Bedingungen möglich ist.

Tabelle 14 Datengenerierungstechniken zur Vervollständigung von fehlenden Daten für die TTS.

<b>Datengenerierungstechniken</b>	<b>Transportbeispiel zur Datenherkunft</b>	<b>Technologiereife Technikeignung</b>
Eigene Messung	Reale Verbrauchsmessung anhand Hodometer	Ab Pilotmaßstab
Simulation	Energieträgermenge und Fahrzeuggewicht eines Fahrzeugentwurfmodells	Ab Labormaßstab
Veröffentlichte Messung	Komponentengewicht aus Fachvortrag	Ab Pilotmaßstab
Datenbank	Durchschnittlicher Flusswert eines Prozesses	Ab Labormaßstab
Produktlexikon	Komponentenanzahl in Fahrzeugbetriebslexikon	Ab Marktmaßstab
Interne auswertbare Information	Maschineneinsatzdauer in Bautagebuch	Ab Pilotmaßstab
Expertenabschätzung	Durchschnittslebensdauer eingesetzter Komponente	Ab Labormaßstab
Literaturwert	Materialzusammensetzung anderer Forschungsstudie	Ab Labormaßstab
Formeln und Naturgesetze	Kraftstoffverbrennung durch Stöchiometrie	Ab Labormaßstab
Geometrische Berechnung	Ermittelte Rohstoffmenge zu realer Bauteilzeichnung	Ab Pilotmaßstab
Hochskalierte Teilberechnung	Berechnete Prozessenergie für gesamte Fertigung	Ab Labormaßstab
Eigene Schätzung	Distanz eines Transportprozesses	Ab Labormaßstab
Vernachlässigung	Geringe Rohstoffmenge in Prozessmodulherstellung	Ab Labormaßstab
Datenübernahme Vergleichstechnologie	Rohstoffzusammensetzung, Transport, Energie, etc.	Ab Labormaßstab

Zur Dokumentation dieser Datenbeschaffung von quantitativen Werten zu veränderten, übernommenen oder hinzugefügten Bestandteilen des Fahrzeugtransports einer Transport-Transformationslösung ist gleichermaßen wie für konventionelle Fahrzeuge vorzugehen, wobei die FU mit identischen Daten von zuvor bestehen bleibt. Für alle veränderten oder zusätzlichen Werte der verschiedenen Prozesse in der Herstellung, im Betrieb und am Lebensende sind, je nach Transformationsintensität des Fahrzeugs, unterschiedlich viele Datenmengen notwendig. Da statistische Durchschnittswerte selten verfügbar sind, werden für Produktsysteme von TTS meist Sachbilanzen ausgebildet, die mit generischen Daten oder spezifischen Daten aus teilweise nur einer singulären Testung erzeugt werden, woraus sich die wertbasierte Unsicherheit gegenüber dem CT sukzessive erhöht. Die Datengenerierung

für die Transformations-Parameter gestaltet sich aufgrund geringer Entwicklungsstufen der neuen Energieträger wie Wasserstoff als Energieträgerwechsel oder Antriebskomponenten wie Brennstoffzelle und Wasserstofftank als Antriebssystemwechsel im Vergleich zum CT und dessen etablierten Komponenten als teilweise sehr schwer. Obwohl ein ausschließlicher Energieträgerwechsel nur veränderte Daten für die Energieträgerherstellung und für Betriebsemissionen in der zweiten Lebensphase benötigt, wird die Datengenerierung zeitaufwendig und komplex, wenn ein kompletter Herstellungsprozess neu nachgebildet werden muss, für den kein Datensatz aus einer Datenbank existiert. Dagegen können Werte zu Standard-Parametern wie Komponentenlebensdauern oder Materialverteilungen für die TTS übernommen werden, woraus die Unsicherheit aus der Übernahme quantitativer Daten aufgrund fehlender Primärdaten sich zwar weiter vergrößert, die TTS jedoch vollständig nachgebildet werden kann. Abschließend besteht eine weitere Unsicherheit bezüglich der technologischen Repräsentativität der Daten darin, dass der Zeitpunkt der technologischen Reife des neuartigen Fahrzeugs sich in der Zukunft befindet und folglich zur Nachbildung im Referenzzustand keine Gewissheit z.B. für den Wasserstoffproduktionspfad existiert, der sich noch in Entwicklung befindet und im aktuell bekannten Zustand in der eLCI modelliert werden sollte, bevor dieser in der pLCI bezüglich der Zukunftsentwicklung modifiziert wird.

Nach abgeschlossener Beschaffung aller quantitativen Daten zur vollständigen Modellierung der TTS sollte eine Datengenerierungsliste zu umgesetzter Technik und Datenquelle pro Prozess aufgesetzt werden, um verschiedene Datenaufnahme-Möglichkeiten zu veränderten, übernommenen oder neuen Datenwerten für die Quantifizierung aller Emerging-Parameter transparent voneinander abzugrenzen. Diese kann in die Datenerhebungsblätter integriert oder separat aufgesetzt werden. Ein exemplarischer Ausschnitt einer Datengenerierungsliste zur Einordnung von den beschafften Daten ist in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15 Ausschnitt einer Datengenerierungsliste des neuartigen Fahrzeugs zur Einordnung beschaffter Daten.

<b>Datengenerierungsliste für das Transformationsmodell</b>				
<b>Prozess Name</b>	<b>Emerging-Parameter</b>	<b>Datengenerierungstechnik</b>	<b>Wertimplementierung</b>	<b>Datenquelle</b>
Elektrischer Antrieb Herstellung	Komponentengewicht, -anzahl, Lebensdauer	Simulation	Neue Daten	-
	Elektromotorart, Komponentenmaterialverteilung	Datenbank	Neue Daten	[ecoinvent v3.8]
Fahrzeug Beseitigung	Komponentengewicht	Simulation	Veränderte Daten	-
	Komponentenprozessenergie	Literaturwert	Veränderte Daten	(Asmatulu et al., 2013a)
	Komponententransportdistanz	Datenübernahme Vergleichstechnologie	Übernommene Daten	-

Es zeigt sich, dass die quantitative Ausbildung der ex-ante Sachbilanz durch zusätzliche Komponenten zu einem großen Mehraufwand für die Datengenerierung von TTS führen kann. Die Datenbeschaffung lässt sich jedoch zeitlich und im Umfang reduzieren, da auf vielfältige bereits beschaffte Informationen aus der vorherigen ex-post Sachbilanz des CT im

---

Rahmen von veränderten oder übernommenen Werten zurückgegriffen werden kann, woraus eine effizientere Durchführung der Datenerhebung insgesamt erreicht wird.

Als durchzuführende Schritte für Ökobilanzierer in der zweiten Stufe der *Vollständige Parameter Erarbeitung* zur Datenerhebung sind die technologieveränderten Daten aller Prozessmodule zu sammeln, welche in die ex-ante Sachbilanz einbezogen werden. Zur Umsetzung empfohlene Maßnahmen sind die Anpassung der Datensatz-Fluss-Liste, die Dokumentation relevanter Werte jedes Prozessmoduls in den Datenerhebungsblättern der TTS sowie die Bereitstellung der umgesetzten Datengenerierungstechniken und deren Datenquellen für die veränderten, übernommenen und neuen Daten in einer integrierten oder separaten Datengenerierungsliste.

### **5.5 Dritte Stufe der Produktsystem Bestimmung zur Modellquantifizierung des Transformationsmodells**

Nachdem alle quantitativen Werte für das vollständige Modell einer Transport-Transformationslösung vorliegen, indem sie gesammelt, übernommen oder erzeugt wurden, folgt als letzter Teil der ex-ante Sachbilanz die Entwicklung des Transformationsmodells, mit dem das neuartige Produktsystem zum Erhalt des finalisierten Sachbilanz-Ergebnisses verrechnet werden kann. Zur Modellnachbildung dient das in Kapitel 4 aufgesetzte Excel-basierte Transportmodell, welches mit den neuen, veränderten und weggelassenen Prozessen im Produktsystem angepasst und erweitert wird. In diesem Modell werden die zusätzlichen Prozesse in allen Prozessmodulen mit den inhärenten Standard-Parametern bzw. Transformations-Parametern neu aufgesetzt und die hinzugekommenen oder veränderten Flüsse um die quantifizierten Werte der erneuten Datensammlung ergänzt. Die Prozessverrechnung erfolgt daraufhin in gleicher Weise, wie übergeordnet in Abbildung 18 für konventionelle Verkehrsmittel bereits dargelegt wurde.

Abbildung 23 stellt die detaillierte Prozessverrechnung für die quantifizierten Flüsse zur Modellierung einer TTS dar, die auf der Struktur und teilweise auch auf den quantitativen Werten des konventionellen Fahrzeugs basiert, alle Veränderungen gegenüber dem vorherigen Modell sind farblich markiert. Für alle als Transformationstyp hinzukommenden Komponenten wie Elektromotoren auf Basis von Neodym als zusätzlicher Rohstofffluss werden neue Prozessmodule im Excel-basierten Modell ausgebildet, die eine Erweiterung der bestehenden Modellstruktur ergeben. Zudem können in bestehenden Prozessen zusätzliche Input- und Outputflüsse in Form von neuen Materialien wie CFK oder Energieträgern wie Strom in das Modell neu aufgenommen werden oder vorhandene Flüsse wie die Kraftstoff Bereitstellung mit der Strom Bereitstellung und Wasserstoff Bereitstellung substituiert werden. Für die erweiterte Modellstruktur der eLCI müssen zur abschließenden Quantifizierung des Produktsystems der TTS alle nicht gleichgebliebenen Werte ausgetauscht werden, um die vorhandenen und hinzugekommenen Flusswerte insgesamt miteinander zu verrechnen. Das abschließend ausgebildete und komplett berechnete Transformationsmodell besteht pro TTS-Variante ebenfalls wie die etablierte Technologie aus einem Gesamtflussinventar für die retrospektive Ökobilanz, bei der jeder Fluss in jedem Prozess zunächst einen spezifischen Wert erhält, um daraufhin zusammengefasst und normiert in einer Spalte das ex-ante Sachbilanz-Ergebnis über den Lebensweg abzubilden.







Tabelle 16 Gesamtflussinventar zur Bereitstellung der Transportfunktion im Referenzzustand.

Gesamtflussinventar		CT	TTS 1	TTS 2	TTS 3	TTS 4
Produktsystem und Modellierungszeitpunkt		LCI	eLCI	eLCI	eLCI	eLCI
Produkt- und Elementarflüsse	Normierter Einheitsanteil	Aggregiertes Sachbilanz-Ergebnis				
A – Herstellungsphase	Aluminium Bereitstellung	+ kg/FU				
	Stahl Bereitstellung	+ kg/FU				
	Chrom-Stahl Bereitstellung	+ kg/FU				
	Kupfer Bereitstellung	+ kg/FU				
	Nickel Bereitstellung	+ kg/FU				
	Nickel-Legierung Bereitstellung	+ kg/FU				
	Titan Bereitstellung	+ kg/FU				
	Kobalt Bereitstellung	+ kg/FU				
	Neodym Bereitstellung	+ kg/FU				
	Lithium Bereitstellung	+ kg/FU				
	Graphit Bereitstellung	+ kg/FU				
	CFK Bereitstellung	+ kg/FU				
	GFK Bereitstellung	+ kg/FU				
	PET Bereitstellung	+ kg/FU				
	PP Bereitstellung	+ kg/FU				
	PVC Bereitstellung	+ kg/FU				
	PUR Bereitstellung	+ kg/FU				
	Gummi Bereitstellung	+ kg/FU				
	Transport Straße	+ tkm/FU				
	Transport Luft	+ tkm/FU				
Strom Bereitstellung	+ kWh/FU					
Wärme Bereitstellung	+ MJ/FU					
Lackierung Bereitstellung	+ kg/FU					
B – Nutzenphase	Kraftstoff Bereitstellung	+ kg/FU				
	Strom Bereitstellung	+ kWh/FU				
	Wasserstoff Bereitstellung	+ kg/FU				
	Kohlendioxid Emission	- kg/FU				
	Stickoxide Emission	- kg/FU				
	Schwefeloxide Emission	- kg/FU				
	Wasser Emission	- m3/FU				
	Kohlenmonoxid Emission	- kg/FU				
Kohlenwasserstoffe Emission	- kg/FU					
C – Entsorgungsphase	Transport Straße	+ tkm/FU				
	Strom Bereitstellung	+ kWh/FU				
	Abfall Deponierung	- kg/FU				
	Verbundwerkstoffe Verbrennung	+ kg/FU				
	PET Verbrennung	+ kg/FU				
	PP Verbrennung	+ kg/FU				
	PVC Verbrennung	+ kg/FU				
	PUR Verbrennung	+ kg/FU				
	Gummi Verbrennung	+ kg/FU				
	Aluminium Recycling	- kg/FU				
	Stahl Recycling	- kg/FU				
	Edelmetalle Recycling	- kg/FU				
	Polymere Recycling	- kg/FU				
	Aluminium Sekundärrohstoffe	+ kg/FU				
Stahl Sekundärrohstoffe	+ kg/FU					
Edelmetalle Sekundärrohstoffe	+ kg/FU					
Polymere Sekundärrohstoffe	+ kg/FU					

---

Die im Gesamtflussinventar in grau abgebildeten Flüsse stellen die vorhandenen Inputs bzw. Outputs des CT dar, die für die TTS-Varianten zumindest strukturell übernommen werden können. Beispielsweise treten für die zweite und vierte TTS bei Flüssen wie die Gummi Bereitstellung bzw. die Lackierung Bereitstellung, welche den Prozessen der Tragstruktur Herstellung bzw. der Fahrzeug Montage zugeordnet werden können, keine Veränderungen zum CT auf, da kein Tragstrukturwechsel betrachtet wird. Die in blau dargestellten Flüsse enthalten neu generierte Daten und bilden meist auch eine strukturelle Veränderung im Transformationsmodell ab. Die weißen Flüsse markieren aufgrund eines zusätzlichen Inputs oder Outputs für einzelne TTS, die in anderen Fahrzeugen nicht enthalten sind, einen nicht zu quantifizierenden Fluss für diese Fahrzeuge wie der fehlende Einsatz von Neodym ohne Elektromotoren, von Lithium ohne Batterien und von Graphit ohne Brennstoffzellen bzw. Batterien. Aus den quantifizierten und normierten Flüssen im Gesamtflussinventar als Blackbox-Modellierung bzw. in Prozessmodulen des Transformationsmodells als Whitebox-Modellierung resultieren die Umweltwirkungen pro TTS im Referenzzustand, die nach der Umweltbewertung im Zukunftszustand jeweils mit demselben Fahrzeug zu vergleichen sind.

Für den korrekten Vergleich müssen die Sachbilanz-Ergebnisse gekennzeichnet werden zur Erzeugung größtmöglicher Verständlichkeit zu diesen technologieveränderten, jedoch nicht-modifizierten eLCI-Daten. Zur Bestimmung des Produktsystems besteht das abschließende Ziel in der Kennzeichnung der TTS in drei Veränderungslevel, um die Änderung gegenüber dem CT der LCI bzw. der pLCI sichtbar zu machen. Diese Datenfestlegung basiert auf den übergeordneten Vergleichs-Parametern des Transformationstyps von Tabelle 5 und sollte im Einklang mit der Stufe der Datenerhebung stehen. Zur Nachvollziehbarkeit der inhärenten Unsicherheiten umfasst die Ergebniskennzeichnung im ersten Level die Darstellung der wichtigsten Änderungen im Transformationstyp, z.B. als mittlere Transformationsintensität anhand der Integration zusätzlicher Energieträger wie Wasserstoff und Komponenten wie Batterien und Brennstoffzellen zur Energieerzeugung sowie Leistungselektronik und Elektromotoren zur Übertragung und elektrischen Fahrweise. Zudem erfolgt die Einordnung in vier Entwicklungszustände zur Kommunikation der Technologiereife als zweites Level, das im eLCI-Modell jeweils ohne technologischen Fortschritt zu markieren ist, sowie in vier zeitliche Zustände von Referenzzustand und drei Zukunftszuständen als drittes Level, das im eLCI-Modell ebenfalls ohne zeitlichen Fortschritt zu markieren ist.

Diese Datengrundlage im entwickelten Modell einer TTS wird in den drei Veränderungslevel zur Abgrenzung von allen anderen Modellen anhand von kombinierbaren und einzeln auswählbaren Transformationstyp-Spezifikationsmöglichkeiten markiert zur transparenten Kennzeichnung der Modellierung des neuartigen Fahrzeugs und zur Nachvollziehbarkeit der erhaltenen Umweltwirkungsergebnisse. Die Hauptbestandteile der Veränderung im ersten Level sind die Auswahl der konkreten Maßnahmenkombination des Transformationstyps einer bestimmten Energienutzungsveränderung aus einem Wechsel der vier Bausteine Energieträger, Antriebssystem, Tragstruktur und Strominfrastruktur, im zweiten Level die Einordnung in einen Technologiereifegrad und im dritten Level die Einordnung in einen zeitlichen Zustand. Die einzelnen Kombinationsbausteine der sechs Hauptbestandteile als Transformationstyp-Spezifikationsmöglichkeiten sind in Tabelle 17 zusammengefasst und sind in den ersten vier Spalten additiv hinzuzufügen sowie in den letzten beiden Spalten differenziert zu wählen.

Tabelle 17 Transformationstyp-Spezifikationsmöglichkeiten zur Kennzeichnung von TTS gegenüber CT in drei Veränderungslevel.

1. Level: Energienutzungsveränderung				2. Level: Technologiereifegrad	3. Level: Zeitlicher Zustand
Energie-träger	Antriebs-system	Trag-struktur	Strom-infrastruktur		
Synthetischer Kraftstoff	Elektro-motor	Innovative Materialien	Fahrwegseitig Stromschiene, Oberleitung	Labor-maßstab (TRL 3)	Referenz-zustand (Status Quo)
Biobasierter Kraftstoff	Batterie	Bauteil Anordnung, Dimension	Strom-abnehmer	Pilot-maßstab (TRL 4-7)	Zukunfts-zustand (Prädiktiv)
Strom	Brenn-stoffzelle	Fertigungs-verfahren	Zusätzliche Strom-infrastruktur	Markt-maßstab (TRL 8-9)	Zukunfts-zustand (Explorativ)
Wasserstoff	Leistungs-elektronik	Masse-verzicht	Zusätzliche Infrastruktur	Kommerzieller Maßstab (nach TRL 9)	Zukunfts-zustand (Normativ)

Für den ersten Wechsel des Transformationstyps im ersten Level kann neben Strom und Wasserstoff ein synthetischer bzw. biobasierter Kraftstoff zur Vervollständigung aller Möglichkeiten von neuen Energieträgern für die TTS-Varianten ausgewählt werden. Diese entsprechen zwar in den energetischen Eigenschaften dem konventionellen Kraftstoff, beinhalten jedoch andere Herstellungspfade. Für den zweiten Wechsel können verschiedene Energiewandler, Energiespeicher und zu berücksichtigende Leistungselektronik kombiniert werden. Für den dritten Wechsel lassen sich Maßnahmen zur strukturellen Veränderung am Fahrzeug mittels veränderter Materialien, Anordnungen im Fahrzeug, Fertigungsverfahren und genereller Massereduktion für die tragenden und umhüllenden Bestandteile des Fahrzeugs markieren. Für den vierten Wechsel sind verschiedene Komponenten der Fahrbahnelektrifizierung wie Oberleitungen, strukturverändernden Stromabnehmern am Fahrzeug wie Pantographen, weitere benötigte Komponenten der Strominfrastruktur wie Unterwerke und zusätzliche Verkehrsinfrastruktur wie eine verbesserte passive Schutzeinrichtung zu kennzeichnen. Mit der Spezifizierung im ersten Level soll ein größtmögliches Verständnis über die untersuchte TTS in allen physischen Änderungen für das eLCI-Modell und den daraus erzeugten Ergebnissen gewährleistet werden.

Der Technologiereifegrad im zweiten Level differenziert sich in nur einen auswählbaren Entwicklungszustand der Modellierung von Labormaßstab (TRL 3), Pilotmaßstab (TRL 4-7), Marktmaßstab (TRL 8-9) und kommerziellem Maßstab (nach TRL 9). Je nach Reife der Technologie müssen vom Status Quo der Parameter-Generierung zum technologischen Fortschritt der Parameter-Modifizierung für die verbesserte technologische Repräsentativität der Daten vielfältige TRL-Stufen in mehrere Phasen der Veränderung durchlaufen werden, bis der Markthochlauf mit der Marktetablierung abgeschlossen ist. Dieser Fortschritt ist erst nach Abschluss der eLCI in der pLCI zu modellieren und äußert sich in einer Hochskalierung von Bestandteilen des in Entwicklung befindlichen Fahrzeugs, die für gewöhnlich aufgrund von Skaleneffekten in der Fertigung zur Verbesserung des Produktsystems hinsichtlich der Werte von Input- bzw. Outputflüssen führt. Berücksichtigt wird im Markthochlauf die Weiterentwicklung ausgewählter Komponenten im Produktsystem zunächst bis zum

---

Markteintritt des Marktmaßstabs und daraufhin mittels einer Produktionssteigerung bis zur Massenproduktion als abgeschlossene Etablierung im Markt des kommerziellen Maßstabs.

Die Kennzeichnung des zeitlichen Zustands im dritten Level erfolgt entweder ohne oder mit Zukunftsveränderungen der Daten, welche auf Basis von einem der drei Szenariotypen umgesetzt werden, und muss daher mit den generierten eLCI-Daten bzw. den modifizierten pLCI-Daten im Einklang stehen. Die Differenzierung in den Status Quo bzw. in ein prädiktives, exploratives oder normatives Zukunftsszenario ist relevant, um die in der nachgelagerten Stufe erzeugten Umweltwirkungsergebnisse hinsichtlich fehlender zeitlicher Repräsentativität der Daten aufgrund der ausschließlichen Parameter-Generierung oder hinreichender Passgenauigkeit der Daten, jedoch inhärenter zusätzlicher Unsicherheit bezüglich der Zukunftsentwicklung aufgrund der Parameter-Modifizierung richtig zuordnen zu können.

Diese Inklusion und Auswahl konkreter Kombinationsbausteine zeigt übersichtlich die spezifische Ausprägung der TTS, die im jeweiligen Transformationsmodell berücksichtigt wurde, um für die abschließende Umweltbewertung das Umweltwirkungsprofil kategorisch einzuordnen für eine klare Abgrenzung zum CT bzw. zu weiteren TTS-Varianten. Zudem erleichtert dies die nachfolgende Zukunftsbetrachtung, um die Ökobilanz-Ergebnisse besser im internen Vergleich innerhalb einer TTS-Variante zwischen Referenzzustand und Zukunftszustand gegenüberzustellen bzw. für die Parameter-Modifizierung weiternutzen zu können und dem CT und anderen TTS daraufhin im externen Vergleich des Zukunftszustands transparent gegenüberzustellen. Die wichtigsten Spezifikationen der neuartigen Technologie in der eLCI können zur Dokumentation im Ökobilanz-Bericht in einer farblichen Auswahl der Bausteine oder in einer ausführlicheren Auflistung ersichtlich gemacht werden. Zudem kann die geplante prospektive Modellierung der pLCI mit einer farblichen Differenzierung bereits angegeben werden.

Die Resultate der ex-ante Sachbilanz in der dritten Stufe sind folglich verrechnete und gekennzeichnete Daten der Transformationsmodelle im Technologieentwicklungsprozess, welche dokumentiert zum Abschluss der Ökobilanzierung an Ökobilanzierer, Praktiker und Entscheidungsträger übermittelt werden können. Mit der Kenntlichmachung der Resultate aus dem Erarbeitungsprozess lassen sich nicht nur die Datenspezifikationen der finalisierten Ökobilanz-Ergebnisse für diese LCA-Studie präzise aufzeigen, sondern es kann auch die Vergleichbarkeit zu anderen transparenten Studienergebnissen verbessert werden. Eine transparente Kennzeichnung, die durch die TTS-Typologie sowie die weitere Einordnung in drei Veränderungslevel erzeugt werden kann, erhöht folglich die Präzision der Zuordnung von Daten zur Modellierung und die Nachvollziehbarkeit von den Unsicherheiten in den Ergebnissen der jeweiligen Umweltbewertung.

Als durchzuführende Schritte für Ökobilanzierer in der dritten Stufe der *Produktsystem Bestimmung* zur Datenberechnung werden die vollständig generierten Daten verwendet, um die Inputs und Outputs aller Prozessmodule der TTS quantitativ zu verrechnen und zu kennzeichnen. Zur Umsetzung empfohlene Maßnahmen sind die Quantifizierung der veränderten und gleichgebliebenen Flüsse in jedem einzelnen Prozessmodul inklusive der Dokumentation von Berechnungsverfahren, welche im Transformationsmodell durchgeführt werden, der Bezug aller Input- und Outputdaten des Produktsystems auf die funktionelle Einheit, welche im Gesamtflussinventar zusammengefasst sind, sowie die Kennzeichnung der drei Veränderungslevel anhand der Transformationstyp-Spezifizierungsmöglichkeiten.

---

## 5.6 Nachgelagerte Stufe der ex-ante Sachbilanz zur Bewertung von neuartigen Verkehrsmitteln

Zum Abschluss der ex-ante Sachbilanz als erste Erweiterung der zweiten Phase der Ökobilanzierung können alle eLCI-Daten der neuartigen Technologien vollständig und aufbereitet mit dem eLCI-Ergebnis des Transformationsmodells zur Wirkungsabschätzung bereitgestellt werden, um in iterativen Schritten pro Transport-Transformationslösung das Umweltwirkungsergebnis der Ökobilanz im Referenzzustand zu erhalten. Aus den Sachbilanz-Modellen lassen sich wiederum differenzierte Ökobilanz-Datensätze zur Modellierung in Ökobilanz-Software erstellen. Diese abschließende Umweltbewertung für den Referenzzustand resultiert unter geringerer Datenzuverlässigkeit aufgrund der unabgeschlossenen Marktreife, jedoch höherer Datenvollständigkeit aufgrund der umgesetzten Vorgehensweise. Die Umweltbewertung von dem eLCI-Ergebnis unter geringerer technologischer und zeitlicher Repräsentativität der Daten erzeugt ein Wirkungsabschätzungsprofil, welches die Umweltwirkungen des neuen Verkehrsmittels vor der Markteinführung abbildet, weshalb das LCA-Ergebnis mögliche Optimierungspotenziale für den technologischen Reifeprozess über die Zeit aufdeckt. Diese Technologien auf niedrigem TRL sind noch nicht mit Technologien von industrieller Reife vergleichbar, da die Umweltwirkungen durch die früh identifizierten Hotspots überschätzt werden können. Daher erfolgt kein bewertender Vergleich zwischen TTS im Referenzzustand und CT im Referenzzustand. Die eLCI-Daten in der nicht-modifizierten Form aus der Datenbeschaffung eignen sich jedoch für vielfältige weitere Modellierungen, in welche die Zukunftsbetrachtung integriert wird. Mit Abschluss des Vorgehens in der eLCI besteht für die LCA im Referenzzustand gegenüber der LCA im Zukunftszustand der Anspruch, alle nicht-modifizierten Daten transparent zur Verfügung zu stellen, aus denen vielfältige weitere Zukunftsszenarien erzeugt werden können. Erst mit den Umweltwirkungsergebnissen der prospektiven Sachbilanz auf Basis von technologischem und zeitlichem Fortschritt sind diese geeignet, um Schlussfolgerungen in Form von Empfehlungen an Entscheidungsträger auszusprechen.

Für die Entwicklung geeigneter Szenarien sollten als selektive Auswahl die relevantesten und unsichersten Parameter modifiziert werden. Diese können nach dem Erhalt des Wirkungsabschätzungsprofils für die LCA im Referenzzustand und in der weiteren Phase der Auswertung anhand von signifikanten Parametern als größte Beiträge in durchgeführten Beitragsanalysen oder Parametern mit größter Sensitivität gegenüber dem Ausgangswert in durchgeführten Sensitivitätsanalysen bestimmt werden. Diese Ergebnisanalyse kann entsprechend der iterativen Eigenschaft der Ökobilanz zu einer Überarbeitung der Sachbilanz führen (DIN EN ISO 14044), worauf als Iteration in der zweiten Erweiterung der Sachbilanzphase diese Parameter zusätzlich in der prospektiven Sachbilanz betrachtet werden sollten. Folglich stellt der Output der signifikanten Parameter der eLCI den Input zur Modifizierung in der pLCI dar, sodass die eLCI-Ergebnisse zunächst nur für Analysen von Sensitivitäten und Unsicherheiten genutzt werden, um wenige einflussreiche Treiber zu identifizieren, die in der pLCI weiter zu untersuchen sind. Sobald die Ergebnisse der pLCI mit einem bzw. mehreren prospektiven Wirkungsabschätzungsprofilen pro TTS vorhanden sind, können die Umweltwirkungsergebnisse der eLCI mit den nicht-modifizierten Daten und dem vollständig erhaltenen Bewertungsergebnis der retrospektiven LCA von TTS genutzt werden, um eine transparente Gegenüberstellung zu den in der pLCI modifizierten Ergebnissen im Zukunftszustand durchzuführen. Aus diesem internen Vergleich innerhalb

einer TTS lässt sich das technologische und zeitliche Veränderungspotenzial des Fahrzeugs in einem bzw. mehreren Zukunftszuständen gegenüber dem aktuellen Zustand aufzeigen zur Unterstützung für einen erfolgreichen Technologieentwicklungsprozess.

## 5.7 Zusammenfassung von Kernelementen der ex-ante Sachbilanz für Transport-Transformationslösungen

Das Vorgehen in diesem Kapitel zur Nachbildung von neuartigen Verkehrsmitteln kann in den drei Stufen von Abbildung 24 zusammengefasst werden, welches auf der in Kapitel 4 vorgestellten dreistufigen Durchführung der ex-post Sachbilanz aufbaut.

- I. Ausbildung der veränderten Modellstruktur des neuartigen Verkehrsmittels auf Basis der Vergleichstechnologie für die *Neue Parameter Identifizierung*
- II. Generierung von Daten für alle neuen und veränderten Lebenswegprozesse anhand Standard-Parametern und Transformations-Parametern für die *Vollständige Parameter Erarbeitung* im Referenzzustand
- III. Nachbildung des Produktsystems in einem erweiterten Transformationsmodell der ex-ante Sachbilanz und Kennzeichnung des Transformationstyps für die *Produktsystem Bestimmung*

Abbildung 24 Vorgehensweise für die dreistufige Durchführung der ex-ante Sachbilanz von neuartigen Verkehrsmitteln zur Entwicklung des Transformationsmodells.

Für die Anwendung der Methode von Kapitel 5 ist für Ökobilanzierer zusammenzufassen, dass in der ersten Stufe die Technologieveränderung der Transport-Transformationslösung gegenüber dem konventionellen Transport zur Ausbildung der veränderten Modellstruktur anhand der Identifizierung von veränderten bzw. komplett neuen Parametern qualitativ dargelegt werden muss. In der zweiten Stufe folgt die quantitative Datenbeschaffung, die in veränderte, übernommene und neue Daten differenziert ist, um anhand der vollständigen Erarbeitung von allen Standard-Parametern und Transformations-Parametern mittels Datengenerierungstechniken für das erweiterte Modell über den Lebensweg alle Werte zu generieren. Abschließend müssen in der dritten Stufe alle veränderten Daten in das neu ausgebildete Transformationsmodell integriert und verrechnet werden, um anhand der Kennzeichnung in drei Veränderungslevel den spezifischen Transformationstyp des konkret nachgebildeten Produktsystems einer TTS zu bestimmen. Mit diesem Vorgehen erhalten Ökobilanzierer ein vollständiges Sachbilanz-Modell pro TTS zur Darstellung der Technologieveränderung im Technologieentwicklungsprozess. Dieses eLCI-Modell kann für die Berücksichtigung von Zukunftsveränderungen anhand von technologischem und zeitlichem Fortschritt modifiziert werden, um die Zukunftsentwicklung den mit diesem Modell erzeugten Umweltwirkungen im Referenzzustand gegenüberzustellen und aufzuzeigen, welche Problemfelder für die TTS im Status Quo existieren und in Zukunft angegangen werden müssen.



### 6.1 Allgemeines zur prospektiven Sachbilanz Methodik

Für die in Kapitel 3 herausgearbeitete übergeordnete Methodik der Arbeit wurden drei Bestandteile identifiziert, von denen nach der Vorstellung der ex-post Sachbilanz in Kapitel 4 und der ex-ante Sachbilanz in Kapitel 5 nun in diesem Kapitel der dritte Methodenteil der prospektiven Sachbilanz zur Nachbildung aller Technologien in einem bestimmten Zukunftszustand behandelt wird. Auf Grundlage der Charakterisierung von Zukunftsveränderungen aus Kapitel 3.3.3 und den getätigten Festlegungen wird nachfolgend die Modifizierung für zukunftsgerichtete Verkehrsmittel aus den selektiven Anpassungen von Transportmodell bzw. Transformationsmodell vorgestellt. Ein zusätzliches Verständnis soll über die zukunftsgerichteten Produktsysteme von *konventionellem Transport* und *Transport-Transformationslösung* mit Abschluss der Methode erreicht werden, indem anhand der strukturellen Einordnung der Zukunftsveränderungen der Fahrzeuge und ihrer Systemumgebung gegenüber der Ausgangslage mit selektiv geänderten Modellbausteinen von Parametern und Flüssen als Ergebnis verschiedene quantifizierte prospektive Gesamtflussinventare pro Zukunftsszenario und Technologie erhalten werden. Die Modifizierung der generischen Bausteine von CT bzw. TTS und deren Integration in die parametrisierten Modelle von ex-post bzw. ex-ante Sachbilanz soll die Durchführung einer prospektiven Ökobilanz handhabbar machen. Die Vorgehensweise der pLCI zeigt auf Basis klassifizierter Zukunftsveränderungen aus der Charakterisierung als Erweiterung der nicht-modifizierten Modelle die methodischen Änderungen zur Nachbildung zukunftsgerichteter Fahrzeuge anhand von technologischem und zeitlichem Fortschritt in drei Stufen zur Umweltbewertung im Zukunftszustand. Die für die verschiedenen Fahrzeuge nachgebildeten Zukunftsveränderungsmodelle erreichen mit der Integration von Zukunftsszenarien eine prospektive Umweltbewertung, die einen Verkehrsmittelvergleich unter technologisch und zeitlich passgenauen Daten aufgrund konsistenter Systemgrenzen durchführbar macht. Mit dem Vorgehen der zweiten Erweiterung der Ökobilanzierung sollen Ökobilanzierer und Praktiker angeleitet werden, die geeignetsten Modifizierungen in ihrem Potenzial für den technologischen und zeitlichen Fortschritt von Vordergrund- und Hintergrundsystem zu identifizieren und umzusetzen sowie die modifizierten Ergebnisse entsprechend zu kennzeichnen. Je nach Untersuchungsziel und Zweck der Entscheidungsunterstützung können Ökobilanzierer eine oder mehrere zeitliche Perspektiven bearbeiten, um zu einer abschließenden Aussage über die ökologische Vorteilhaftigkeit der zukunftsveränderten neuartigen Technologie gegenüber der zukunftsveränderten konventionellen Technologie zu gelangen. Zudem können durch die vorherige Bewertung im Referenzzustand stets Rückschlüsse auf die Veränderung getroffen werden. Abschließend soll die Kennzeichnung von Zukunftsveränderungen in den Endresultaten der prospektiven LCA dazu dienen, um Entscheidungsträgern die Modifikationsgrundlage der Ergebnisse in Abgrenzung zum Status Quo aufzubereiten und einen transparenten Vergleich mit anderen prospektiven LCA-Studien zu ermöglichen.

Das Fundament der Methodenerweiterung stellen wiederum die standardisierten drei Stufen der LCI von Vorbereitung der Datenerhebung, Datenerhebung und Datenberechnung aus der

ISO Norm dar. Weiterhin beruht die entwickelte Methodik auf den Grundlagen der literaturbasierten Methodenstufen aus dem Stand der Wissenschaft von Kapitel 2.1.5 und 2.1.6, bei denen für die Forschungsgemeinschaft der Vorausschamethodik in der Szenarioanalyse die drei generischen Kern-Stufen Identifizierung von Schlüsselfaktoren, Erarbeitung von Zukunftsannahmen und Festlegung von Zukunftsszenarien unterteilt werden können. Laut Kosow und Gaßner, der wichtigsten Bezugsreferenz dieser Arbeit, lauten diese Stufen Schlüsselfaktor-Identifikation, Schlüsselfaktor-Analyse und Szenario-Generierung (2008). Der Neuwert der pLCI-Methode in dieser Arbeit wird stets in Abgrenzung zu vorhandener Literatur aufgezeigt, um relevante und konsensbildende Sachverhalte zu übernehmen und das eigene Vorgehen daraus hervorzuheben. Zunächst soll das übergeordnete Vorgehen in der pLCI-Methode genauer vorgestellt werden.

Der Szenarioprozess der pLCI integriert insgesamt sowohl intuitive als auch systematische Elemente, um Szenarien aus verschiedenen Entwicklungspfaden für Technologiealternativen zu entwickeln, die als finalisierte Zukunftsszenarien für den Abschluss der Sachbilanz bereitstehen. Die Modellerweiterung anhand von Zukunftsszenarien basiert wiederum auf einem Vorgehen in drei Stufen, die jeweils in drei iterative Schritte untergliedert sind. Übergeordnet sind in der pLCI die zu modifizierenden Parameter in der ersten Stufe zunächst zur Beschreibung des zukünftigen Produktsystems klar zu definieren. Daraufhin sind in der zweiten Stufe diese Parameter für die prospektive Datenbeschaffung gegenüber dem Status Quo zu variieren. In der dritten Stufe sind die Parameter für die Berechnung des Produktsystems anhand der spezifischen Ausprägung einer betrachteten Zukunft zu einem abgrenzbaren Resultat zu verbinden. Dieses erweiterte Verfahren zur Durchführung der prospektiven Sachbilanz für Zukunftsveränderungen ist in Abbildung 25 dargestellt mit dem Ziel der Parameter-Modifizierung für zukünftige Fahrzeuge zur Entwicklung des Sachbilanz-Modells als Zukunftsveränderungsmodell.

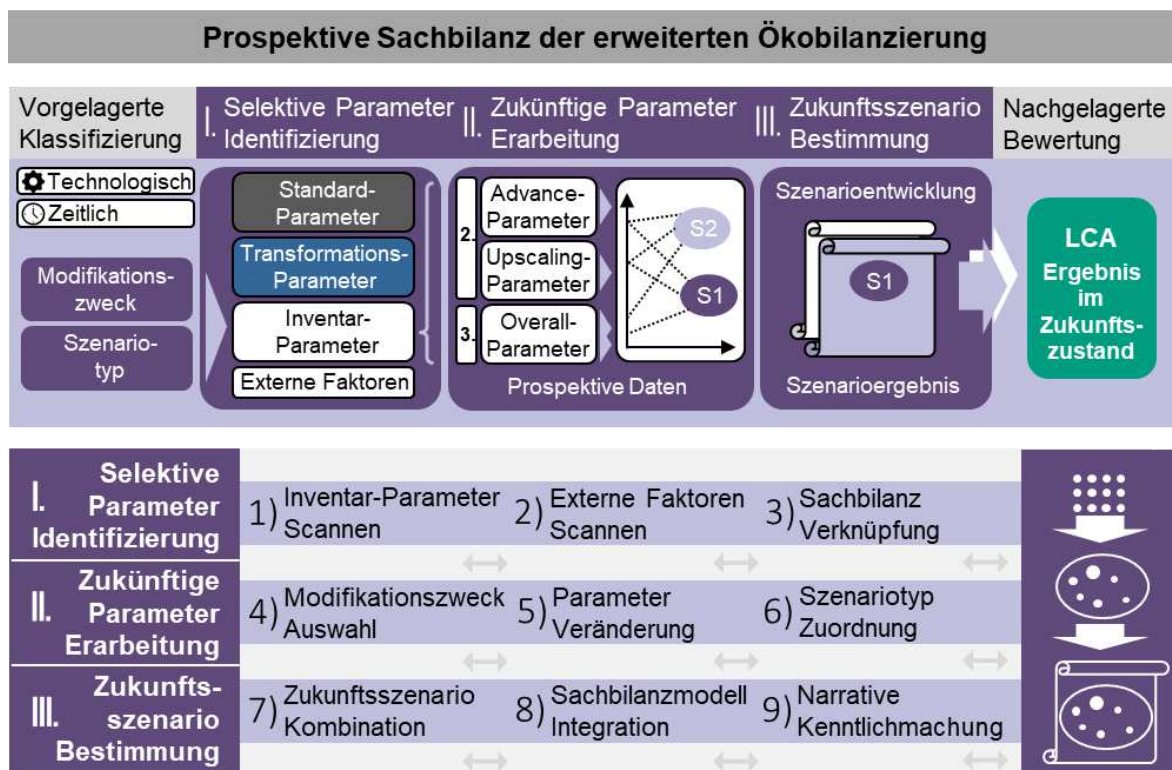


Abbildung 25 Dreistufiger Ansatz zur Durchführung der prospektiven Sachbilanz in neun iterativen Schritten.

---

Die vorgelagerte Stufe der Klassifizierung des Zukunftsszenarios basiert auf der Einordnung in den übergeordneten Modifikationszweck als Ziel der Szenarioanalyse sowie in den Szenariotyp zur Gewährleistung vergleichbarer Systemgrenzen für alle zukunftsveränderten Produktsysteme. In der ersten Stufe der *Selektive Parameter Identifizierung* wird auf Basis der relevanten Standard-Parameter bzw. Transformations-Parameter aus dem LCI- bzw. eLCI-Modell, zusammengefasst als Inventar-Parameter, sowie den externen Faktoren die zukunftsgerichtete Untersuchung der Parameter hinsichtlich des Modifikationspotenzials durchgeführt anhand von einem Scannen und Strukturieren dieser Schlüsselfaktoren der Zukunftsentwicklung. Im Rahmen der Identifizierung geeigneter Parameter ist für die ausgewählten Inventar-Parameter des Produktsystems sowie die externen Faktoren der übergeordneten gesamtgesellschaftlichen Entwicklung die qualitative Veränderungstendenz vorzuformulieren, die in der nachfolgenden Stufe quantitativ umgesetzt werden soll. In der zweiten Stufe der *Zukünftige Parameter Erarbeitung* werden für die Advance-Parameter, Upscaling-Parameter und Overall-Parameter alle quantitativen Zukunftsannahmen ausgearbeitet zur Erstellung spezifischer Parameter-Bündel der modifizierten Inventar-Parameter unter Anwendung einer systematischen Technik. Mit dem Abschluss der zweiten Stufe sind anhand der prospektiven Daten die Entwicklungspfade der einzelnen Parameter erzeugt und zu gleichförmigen Entwicklungen zusammengefügt, woraus sich in der dritten Stufe die spezifischen Zukunftsszenarien ausbilden und integriert verrechnen lassen. In dieser dritten Stufe der *Zukunftsszenario Bestimmung* wird die Szenarioentwicklung mit einem bzw. mehreren Szenarioausprägungsergebnissen abgeschlossen und auf Basis der Modellquantifizierung eine Nutzbarmachung und Visualisierung des spezifischen Szenarios in qualitativer und quantitativer Form umgesetzt. Aus den kombinierten Parameter-Bündeln werden abgrenzbare und konsistente Szenarien mit einer inhärenten aussagekräftigen Storyline festgelegt und jeweils als ein zukünftiges Sachbilanz-Modell nachgebildet. Mit dem Abschluss der dritten Stufe sind die Zukunftsszenarien in den pLCI-Modellen integriert und kenntlich gemacht, aus denen die Umweltwirkungen für die prospektive Ökobilanz pro quantifiziertes Zukunftsveränderungsmodell ermittelt werden können. Die nachgelagerte Stufe der Umweltbewertung resultiert auf Basis je eines prospektiven Gesamtflussinventars in einem zusätzlichen Wirkungsabschätzungsprofil pro Szenario und Fahrzeug für den Zukunftszustand und kann nach umgesetztem Vergleich zur Entscheidungsunterstützung kommuniziert werden. Das übergeordnete dreistufige Vorgehen von Abbildung 25 wird im Folgenden für die darin integrierten neun iterativen Schritte als Anleitung zur schrittweisen Erstellung der prospektiven Sachbilanz detaillierter dargelegt.

Im ersten Schritt des *Inventar-Parameter Scannen* werden die relevanten zu verändernden Parameter identifiziert, indem das jeweilige Produktsystem im Referenzzustand gescannt wird und die relevanten sowie kritisch-unsicheren Inventar-Parameter im Vordergrund- und Hintergrundsystem bestimmt werden. Im zweiten Schritt des *Externe Faktoren Scannen* wird das übergeordnete Umfeld auf Basis der sechs PESTEL-Kategorien gescannt und externe Bereiche mit Einfluss auf das Produktsystem gesammelt, die sich im Zukunftszustand mit Auswirkung zu diesem verändert haben können. Im dritten Schritt der *Sachbilanz Verknüpfung* wird das jeweilige Produktsystem mit den Inventar-Parametern und externen Faktoren verbunden, indem diese visuell in einem Kausalschleifendiagramm hinsichtlich ihrer Kombinationen und Wechselwirkungen abgebildet werden. Im vierten Schritt der *Modifikationszweck Auswahl* werden die Inventar-Parameter hinsichtlich ihres Modifikationszwecks dem technologischen Fortschritt bzw. zeitlichen Fortschritt zugeordnet

---

in Abhängigkeit von Veränderungen im Vordergrundsystem bzw. Hintergrundsystem des jeweiligen Produktsystems. Im fünften Schritt der *Parameter Veränderung* wird die konkrete Modifizierung der ausgewählten Parameter durchgeführt, indem die Inventar-Parameter gemäß ihrem Modifikationszweck anhand einer spezifischen Datenmodifikationstechnik zu einer Flussmodifikation in einer oder mehreren Ausprägungen variiert werden. Im sechsten Schritt der *Szenariotyp Zuordnung* werden die Entwicklungspfade der Parameter dem jeweils anvisierten Szenariotyp zugeordnet und systematisch anhand einer Kombinationslogik in Parameter-Bündel aufgelistet. Im siebten Schritt der *Zukunftsszenario Kombination* wird das jeweilige Zukunftsszenario aus den kombinierten Parametern gebildet, indem die Parameter-Bündel auf Basis einer Konsistenzmatrix überprüft und auf das finalisierte Zukunftsszenario festgelegt sowie im Parametermodifikationsverzeichnis festgehalten werden. Im achten Schritt der *Sachbilanzmodell Integration* werden alle qualitativen und quantitativen Bestandteile des Zukunftsszenarios in das jeweilige Modell der Sachbilanz integriert, indem die Modellstruktur aus dem Referenzzustand mit den jeweiligen Parameteränderungen in den Zukunftszustand überführt wird, um jeweils ein Zukunftsveränderungsmodell zu quantifizieren. Im neunten Schritt der *Narrative Kenntlichmachung* wird die spezifische Szenario-Narrative ausgebildet und visualisiert, indem das Szenarioausprägungsergebnis mit qualitativen Handlungssträngen und quantitativen Szenariobausteinen auf Basis eines transparenten Szenarioentwicklungsprozesses gekennzeichnet wird.

Das entwickelte dreistufige Vorgehen zur Integration der Szenarioanalyse in die Sachbilanz erweitert die bestehende Forschung. Als wichtige Grundlage hervorzuheben ist die Methode der Szenarioentwicklung in fünf Stufen von Kosow und Gaßner (2008) sowie der vierstufige SIMPL Ansatz (Langkau et al., 2023), der auf dem Vorgehen von Cucurachi et al. (2022) sowie der Szenarioanalyse von Kosow und Gaßner aufbaut und in acht iterativen Schritten diese Grundlagen mit der zweiten Phase der Ökobilanzierung vereint. Der SIMPL Ansatz dient daher als sehr gute Vorarbeit zur Vorgehensweise in der pLCI und wird in einigen Methodenschritten aufgegriffen bzw. ganz übernommen. Zudem formulieren Kosow und Gaßner neun Gütekriterien für die Qualität von Zukunftsszenarien zur Darstellung der Eigenschaften eines guten Szenarios und ein Prozesskriterium des Aufwands von Szenarioentwicklungsprozessen (2008). Auf diese soll in den neun iterativen Schritten mit neun Qualitätsbedingungen und einer zusätzlichen Aufwandsbeschränkung als Anwendung der wissenschaftlichen Prinzipien der Forschungsgemeinschaft zur Vorausschaumethodik eingegangen werden, um die Notwendigkeit jedes Schrittes zu verdeutlichen. Nachfolgend werden auf Basis einer schrittweisen Anleitung für Ökobilanzierer die drei Hauptstufen mit den integrierten neun Schritten sowie die vor- und nachgelagerte Stufe der prospektiven Sachbilanz für konventionellen Transport und Transport-Transformationslösungen in allen zukunftsveränderten Bestandteilen im Detail dargelegt. Das Vorgehen dient als erweiterte Betrachtung zukunftsgerichteter Fahrzeuge für eine Nachbildung mit integrierter Zukunftsentwicklung anhand von entwickelten unsicherheitsbehafteten Zukunftsszenarien.

## **6.2 Vorgelagerte Stufe der prospektiven Sachbilanz zur Klassifizierung von Zukunftsveränderungen für Zukunftsszenarien**

Das Vorgehen in der pLCI soll als zweite Erweiterung der LCI mit einer technologisch und zeitlich korrekten Repräsentation der datenbasierten Modelle aller Produktsysteme im



---

Zukunftszustand enden, die zur vergleichenden Gegenüberstellung geeignet sind. Ein passgenauer Vergleich kann nur erfolgen, wenn für den zu modellierenden Fortschritt der Parameter-Modifizierung in der vorgelagerten Stufe das Ziel des Zukunftsszenarios und die beabsichtigte Zukunftsentwicklung für alle zukunftsgerichteten Fahrzeuge festgelegt wird. Um die Verkehrsmittel bezüglich technologischem und zeitlichem Fortschritt nachzubilden, muss für vergleichbare Systemgrenzen auf Basis von Anpassungen am technologischen und zeitlichen Untersuchungsrahmen der übergeordnete Modifikationszweck bestimmt werden. Für diesen wählt der Ökobilanzierer zwischen der Nachbildung von TTS und CT, z.B. mit dem Ziel eines gleichen Modellierungszeitpunkts nach Erreichen eines erfolgreichen Markthochlaufs zur industriellen Reife, bei einer vergleichenden LCA-Studie oder nur von CT, z.B. mit dem Ziel der Modellierung eines Eintrittszeitpunkts für eine Umweltzielsetzung, wenn der Zukunftszustand nur für bereits etablierte Fahrzeuge nachgebildet werden soll. Zur Beschränkung der weiteren Modellierungsfreiheiten bezüglich der Zukunftsentwicklung wird für ein bestimmtes Betrachtungsjahr der Szenariotyp zwischen einem prädiktiven (PRE, predictive scenario type), explorativen (EXP, explorative scenario type) oder normativen (NOR, normative scenario type) Szenario ausgewählt mittels Einordnung in einen nahen oder entfernten Zeithorizont sowie einer geringen oder extremeren Veränderungsintensität mit einer BAU bis hin zu einer Best Case Entwicklung. Die Vorstufe gewährleistet nach abgeschlossener Umweltbewertung der prospektiven Ökobilanz eine Vergleichbarkeit aufgrund technologisch sowie zeitlich vergleichbaren Systemgrenzen durch die Berücksichtigung des Fortschritts und den gleichen zugrundeliegenden Zukunftsannahmen für alle Fahrzeuge.

### **6.3 Erste Stufe der Selektive Parameter Identifizierung zur Ausbildung der Modellstruktur auf Basis von Zukunftsveränderungen**

Nachdem in Kapitel 4 und 5 das Vorgehen zur Ausbildung der LCI- bzw. eLCI-Modelle aufgezeigt wurde, erfolgt auf dieser Grundlage in der ersten Stufe der pLCI die Nachbildung der zukunftsveränderten Bestandteile, um die prospektive Datenerhebung vorzubereiten. Das übergeordnete Ziel ist mit der *Selektive Parameter Identifizierung* den Parameter-Einfluss auf die Zukunftsbewertung und das gemeinsame Zusammenwirken herauszuarbeiten. Die Vorgehensweise basiert auf einem Scannen und Strukturieren der Schlüsselfaktoren für die Zukunftsentwicklung, aus denen zum Abschluss der Untersuchung die selektiv ausgewählten Parameter qualitativ hervorgehen sollen. Die Parameter-Auswahl enthält nur bedingte Wahlmöglichkeiten, da in der Szenarioanalyse Schlüsselfaktoren als kritisch-unsichere Parameter mit der größten Auswirkung bzw. Sensitivität hinsichtlich Unsicherheiten in der Zukunft gelten. Kosow und Gaßner empfehlen, dass 10-20 Schlüsselfaktoren als zu modifizierende Gesamtmenge für Zukunftsszenarien nicht überschritten werden sollten (2008). Der benötigte Input umfasst das jeweilige Sachbilanz-Modell der LCI bzw. eLCI mit dem Parameterverzeichnis der Standard-Parameter bzw. Transformations-Parameter jedes Verkehrsmittels sowie die im Rahmen von Analysen in der LCA im Referenzzustand herausgearbeiteten wichtigsten Treiber für das zukünftige Optimierungspotenzial. Die Resultate der ersten Stufe sind die Identifizierung der selektiven qualitativen Zukunftsparameter mit größter Relevanz zur zeitlichen Entwicklung, die in der zweiten Stufe der pLCI weiterführend analysiert und modifiziert werden sollen.

### 6.3.1 Erster Schritt der prospektiven Sachbilanz: Inventar-Parameter Scannen

Das Gütekriterium ist die Verständlichkeit, indem durch nur wenige gewählte Parameter die Komplexität reduziert wird. Das Ziel des ersten Schrittes des *Inventar-Parameter Scannen* ist die Identifizierung relevanter Parameter mit einem Scannen von Standard-Parametern und Transformations-Parametern. Zu diesem Zweck erfolgt eine Parameterübertragung für die zukunftsgerichteten Sachbilanz-Modelle aus der bereits absolvierten Parameter-Generierung der LCI und eLCI. Aus dem Parameterverzeichnis müssen die relevanten Inventar-Parameter zusammengestellt und diejenigen gewählt werden, die aufgrund größter Beiträge bzw. Unsicherheiten zur Modifizierung bezüglich eines zukünftigen Zustands geeignet sind. Die größte Relevanz von den signifikanten Parametern auf das Umweltwirkungsergebnis im Referenzzustand ist mittels Beitrags- und Sensitivitätsanalysen der jeweiligen retrospektiven Umweltbewertung der Fahrzeuge zu entnehmen. Aus dieser Untersuchung erfolgt die Auflistung und Reduktion auf die wichtigsten Inventar-Parameter in Bezug auf die größten Auswirkungen und Unsicherheiten. Diese Schlüsselfaktoren sind vom übergeordneten Modifikationszweck, beispielsweise ein Vergleich in einem entfernten Marktetablierungsjahr auf Basis eines explorativen Szenarios, abhängig und müssen in Übereinstimmung mit den vorgelagerten Festlegungen verändert werden. Auf dieser Basis folgt die Benennung der ersten Veränderungstendenz der gewählten Inventar-Parameter mit einer qualitativen Veränderungsbeschreibung. Zur Dokumentation der identifizierten Veränderungsbedarfe kann eine Liste erstellt werden, wie sie in Tabelle 18 exemplarisch dargestellt ist, die auf dem übertragenen Parameterverzeichnis sowie Tabelle 7 der Charakterisierung basiert.

Tabelle 18 Parameterübertrag des LCI- bzw. eLCI-Modells zur Auswahl und Änderung von Inventar-Parametern.

Parameter Übertrag	Inventar-Parameter	Qualitative Veränderungstendenz
Komponentenanzahl	Komponentenanzahlreduktion	Technologisches Lernen zu weniger notwendigen tragenden Bauteilen
Komponentenmasse	Materialeffizienz-erhöhung*	Leichte Senkung Materialbedarf durch Fortschritt
Durchschnittlicher Energieverbrauch	Energieverbrauchsreduktion*	Einige Kraftstoffeinsparung in neuem Design
Fahrzeugwertungsverteilung	Recyclinginputrate-erhöhung*	Vielfältige rezyklierte Materialien möglich
Neuer Herstellungspfad	Herstellungspfadverbesserung	Effizientere Energieträgerbereitstellung für Wasserstoff
Regenerative Energien Anteil	Regenerative Energien Anteilserhöhung*	Große Verbesserungen des Strommix in Deutschland möglich
Batterieart	Produktartwechsel	Einsatz neuer Lithium-Schwefel-Batterie durch technologische Innovationen
Batterieenergie-dichte	Herstellungsinpudreduktion*	Leichte Senkung des Energiebedarfs der Batterieproduktion bei Technologiereife
Lebensdauer	Lebensdauererhöhung	Deutlich höhere Ladezyklen der Batterie
Materialsubstitutionsmenge	Materialartveränderung*	Beträchtliches neues Material CFK in neuem Design
Herstellungsort	Herstellungsortveränderung	Neues Wasserstoffproduktionswerk innerhalb Deutschlands
Durchschnittliche Infrastrukturnutzung	Infrastrukturnutzungs-erhöhung	Infrastrukturnutzende Fahrzeuge auf Anzahl im Realbetrieb hochskaliert

\* Auswahl für die Parameter-Modifizierung



Die konkrete Änderung der Parameter erfolgt erst nach Abschluss der ersten Stufe, wenn die Inventar-Parameter strukturell mit dem Sachbilanz-Modell und den externen Faktoren kombiniert wurden sowie die Relevanz aller Parameter auch aufgrund eines hohen Integrationsgrades an gegenseitiger Beeinflussung für das zukünftige Produktsystem nachgewiesen wurde.

### 6.3.2 Zweiter Schritt der prospektiven Sachbilanz: Externe Faktoren Scannen

Das Gütekriterium ist die Transparenz zur Offenlegung aller übergeordneten Annahmen und Entscheidungen. Das Ziel des zweiten Schrittes des *Externe Parameter Scannen* ist die Identifizierung von übergeordneten externen Entwicklungen mit einem Scannen von allen gesamtgesellschaftlichen Umgebungsbereichen. Für das mit den zukünftigen Fahrzeugen nur indirekt in Verbindung stehende Umfeld müssen großskalierte Systemeffekte erfasst werden, indem mit sechs PESTEL-Kategorien für politische, wirtschaftliche, soziokulturelle, technologische, ökologische und gesetzliche Faktoren (Cucurachi et al., 2022; Kosow & Gaßner, 2008; Langkau et al., 2023) relevante übergeordnete Entwicklungen in Bezug auf das Produktsystem herausgearbeitet werden, um mit diesen den umgebenden Rahmen zur Modifizierung für denselben Betrachtungszeitpunkt in der Zukunft zu berücksichtigen. Für die in Tabelle 8 der Charakterisierung gezeigten exemplarischen externen Faktoren können diese zum Scannen genutzt und reduziert übernommen werden oder um andere Faktoren ergänzt werden, die einen Einfluss auf das Produktsystem ausüben. Eine beispielhafte Auflistung zur weiteren Verwendung in der pLCI ist in Tabelle 19 dargestellt.

Tabelle 19 Übergeordnete PESTEL-Faktorensammlung mit Einfluss auf die Änderung von Inventar-Parametern.

PESTEL-Kategorie	Externe Faktoren	Qualitative Veränderungstendenz
P – Politisch	Forschung und Entwicklung Förderung	Mittel bis hoch
E – Wirtschaftlich	Strompreis	Niedrig bis mittel
S – Soziokulturell	Nachfragereduktion	Niedrig bis hoch
T – Technologisch	Fortschritt grüner Schlüsseltechnologien	Hoch bis sehr hoch
E – Ökologisch	Kohlenstofffußabdruck Energieträger	Mittel bis hoch
L – Gesetzlich	Kreislaufpflicht	Schwach bis stark

Nach der abgeschlossenen Sammlung und Reduktion der vielfältigen externen Faktoren hinsichtlich der größten Relevanz wie z.B. ein Faktor pro PESTEL-Kategorie kann eine Einordnung der Veränderungstendenz mit qualitativer Veränderungsstärke erfolgen. Die quantitativen Ausprägungen der Inventar-Parameter in der zweiten Stufe der pLCI hängen von der übergeordneten Entwicklung der externen Faktoren ab und sollten sich in der qualitativen Veränderungstendenz nicht gegenseitig ausschließen. Die inkludierten Schlüsselfaktoren müssen weiterhin auf ihre Signifikanz für die zeitliche Entwicklung des spezifisch betrachteten Produktsystems überprüft werden und alle identifizierten Inventar-Parameter sowie externen Faktoren im nächsten Schritt im Rahmen eines kausalen Zusammenhangs miteinander verknüpft werden.

### 6.3.3 Dritter Schritt der prospektiven Sachbilanz: Sachbilanz Verknüpfung

Das Gütekriterium ist der Grad der Integration für Wechselwirkungen zu Entwicklungen auf verschiedensten Ebenen. Das Ziel des dritten Schrittes der *Sachbilanz Verknüpfung* ist die Verbindung von Schlüsselfaktoren mit einem vereinfachten Systemfließbild. Auf der ersten Ebene erfolgt die Verknüpfung der Inventar-Parameter mit dem graphisch vereinfachten Systemfließbild des CT aus der LCI bzw. der TTS aus der eLCI auf Basis des Transportmodells bzw. des Transformationsmodells, um die Modellstruktur anhand veränderter Parameter für die pLCI auszubilden. Auf der zweiten Ebene erfolgt die Verknüpfung der externen Faktoren mit den Inventar-Parametern zur Einbettung in den übergeordneten Modifikationsrahmen.

Die Visualisierung kann mit dem Kausalschleifendiagramm umgesetzt werden, welches von Cucurachi et al. entwickelt (2022) und von Langkau et al. übernommen wurde (2023). In diesem wird die Sachbilanz-Modellstruktur neben Inventar-Parametern und diese wiederum neben externen Faktoren dargestellt, die als strukturierte Boxen die Verbindung in Form von Pfeilen zur Herausarbeitung des Vernetzungsgrades aufzeigen. Diese werden entweder mit singulärer Einflussverstärkung als positiv oder singulärer Einflussreduktion als negativ bzw. mit Kreispfeilen für gegenseitigen Einfluss hinsichtlich steigender Feedbackschleifen als positiv bzw. abschwächender Feedbackschleifen als negativ gekennzeichnet. Es müssen anhand der ausgehenden Pfeilverbindungen zwischen externen Faktoren und Inventar-Parametern die kritischsten externen Haupt-Faktoren mit einer hohen Wechselwirkung bestimmt werden, die zu einer genaueren Betrachtung heranzuziehen sind. Neben der Ermittlung der externen Haupt-Faktoren mit den meisten ausgehenden Pfeilen, die einen großen indirekten Einfluss auf das Produktsystem ausüben, müssen auch die Inventar-Parameter in Veränderungen des Vordergrundsystems am Produktsystem und des Hintergrundsystems im Markt differenziert werden. Letztere stellen die Overall-Parameter als unsichere Haupt-Parameter aller Produktsysteme im umgebenden Hintergrundsystem der LCA dar und sind zusammen mit den externen Haupt-Faktoren mit einem zusätzlichen Rahmen zu markieren. Das exemplarische Kausalschleifendiagramm eines generischen Fahrzeugtransports mit jeweils sechs ausgewählten Inventar-Parametern und externen Faktoren inklusive zwei Haupt-Parametern als OP und einem externen Haupt-Faktor aufgrund fünf ausgehender Pfeilverbindungen ist in Abbildung 26 dargestellt.

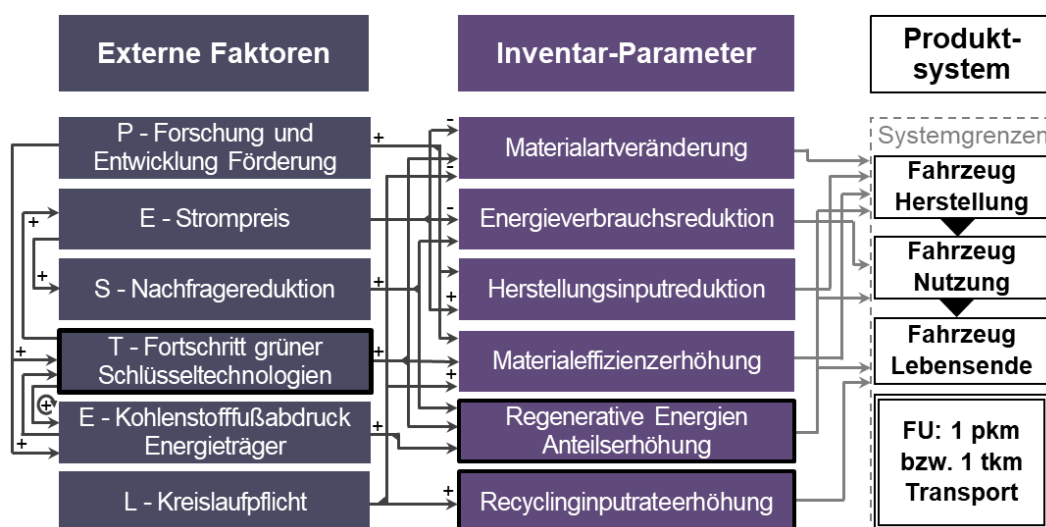


Abbildung 26 Kausalschleifendiagramm mit vereinfachtem Systemfließbild zur Kombination von Inventar-Parametern und externen Faktoren mit dem Sachbilanz-Modell (in Anlehnung an Cucurachi et al., 2022).

---

Aus der Anwendung eines Kausalschleifendiagramms kann eine übersichtliche und zugleich fundierte Untersuchung von Wechselwirkungen im großen Kontext ermöglicht werden, um den Einfluss auf das pLCI-Modell aus allen Ebenen herauszuarbeiten. Diese integrierte Betrachtung von pLCI-Einflussfaktoren mehrerer Felder unterstützt zudem die richtige Parameter-Auswahl und iterative Anpassung der Listen bei identifiziertem Änderungsbedarf von Schritt eins und zwei, die anhand einem prospektiven Parameterverzeichnis umgesetzt werden können. Zur Dokumentation für Ökobilanzierer dient das editierbare Parameterverzeichnis im dritten Dokumentationsblatt für Inventar-Parameter und externe Faktoren zur prospektiven Ökobilanzierung, welches öffentlich zugänglich ist über die DOI <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1349> (Hanesch, 2024a).

Mit dieser systematischen Analyse sollen Problemkomplexe aus mehreren Feldern für die Ausbildung von Zukunftsszenarien händelbar gemacht werden, auch wenn externe Faktoren keinen direkten Einfluss ausüben und für das abschließende Zukunftsveränderungsmodell nicht quantitativ modifiziert werden müssen. Folglich stellen nur die Inventar-Parameter das Gestaltungsfeld zur Modifizierung dar, die in der nachfolgenden Stufe genauer analysiert werden müssen.

#### **6.4 Zweite Stufe der Zukünftige Parameter Erarbeitung zur Beschaffung ausgewählter quantitativer Informationen für Zukunftsszenarien**

Aus der qualitativen Struktur des Zukunftsszenarios müssen in der zweiten Stufe der pLCI zu den gewählten Inventar-Parametern die Daten für den Zukunftszustand aller Fahrzeuge erhoben werden, um die zu verändernden Bestandteile zu quantifizieren. Das übergeordnete Ziel ist mit der *Zukünftige Parameter Erarbeitung* für die zu modifizierenden Parameter die Veränderungsursache, die Veränderungsumsetzung sowie die Entwicklungspfadausbildung durchzuführen. Die Vorgehensweise für die Erarbeitung zukünftiger Zustände der gewählten Schlüsselfaktoren ergibt sich aus der Anwendung einer neuen systematischen Technik, um den Zweck der zukünftigen Ausprägungen jedes Inventar-Parameters zu bestimmen, für jeden Parameter die Modifizierung in einen Zukunftstrichter anhand mindestens einem alternativen Entwicklungspfad durchzuführen und daraufhin die jeweiligen Parameter-Veränderungen strukturiert in Bezug auf einen bestimmten Szenariotyp zusammenzuführen zur Ausbildung spezifischer Zukunftszustände. Der benötigte Input aus der Untersuchung zuvor sind alle gescannten relevanten Inventar-Parameter zur systematischen Modifizierung der Parameter. Für diese sind unter zeitlicher Korrelation von Vordergrundsystem und Hintergrundsystem der berücksichtigte Fortschritt zu integrieren, woraus eine zusätzliche epistemologische Zukunftsunsicherheit resultiert. Jedoch kann mit der Modellierungsfreiheit der geeigneten Technikauswahl der Bedarf nach einem neuen Datenmodellierungsansatz für prospektive Daten adressiert werden. Die Resultate der zweiten Stufe sind anhand einer ausführlichen Modifikationsanleitung mit der Erarbeitung der prospektiven Inventar-Parameter der Erhalt aller quantitativen Zukunftsannahmen, welche in der dritten Stufe der pLCI zu finalisierten Zukunftsszenarien zusammengefügt und daraufhin im jeweiligen Zukunftsveränderungsmodell quantitativ verrechnet werden.

---

#### 6.4.1 Vierter Schritt der prospektiven Sachbilanz: Modifikationszweck Auswahl

Das Gütekriterium ist die Nachvollziehbarkeit auf Basis von detailliert begründeten Zukunftsbildern. Das Ziel des vierten Schrittes der *Modifikationszweck Auswahl* ist die Veränderungseinordnung als Ursache jeder Modifizierung. Die Zweckbestimmung der Veränderung sollte auf dem Ziel der Modifizierung als übergeordneter Modifikationszweck basieren und datentechnisch zwischen Hintergrund- und Vordergrundsystem differenzieren. Diese vorgelagerte Einordnung und Unterscheidung von Schlüsselfaktoren auf Basis der Veränderungslevel zur verbesserten Technikauswahl und die Bestimmung des quantitativen Bedarfs an alternativen Veränderungen stellt in der Vorgehensweise der Szenarioanalyse einen vollständigen Neuwert zur systematischen Modifizierung von Zukunftsannahmen dar.

Die drei Parameterarten der Modifizierung umfassen Advance-Parameter als Fortschritt für den CT in Übereinstimmung mit der TTS-Entwicklung oder Upscaling-Parameter als Verbesserungen zur Marktreife für die TTS in Übereinstimmung mit der etablierten Technologie. Diese Parameterarten bilden den technologischen Fortschritt im Vordergrundsystem ab. Der zeitliche Fortschritt umfasst Overall-Parameter als kritisch-unsichere Entwicklungspfade der Systemumgebung für CT und TTS im Hintergrundsystem. Mit Emerging-Parametern als erstes Veränderungslevel von TTS und Incumbent-Parametern für nicht-modifizierte CT können alle Veränderungslevel der Inventar-Parameter abgebildet werden, die sich je Produktsystem sowie zeitlichem Zustand zuordnen lassen. Folglich müssen die in Stufe eins identifizierten Schlüsselfaktoren hinsichtlich ihrer Veränderung in Fortschritt für den CT oder die TTS und entweder im Vordergrund- oder Hintergrundsystem kategorisiert werden. Letztere OP werden als Parameter mit größerer Unsicherheit auf einer übergeordneten Ebene des Produktsystems festgelegt, sodass sie bei langfristig entfernten Zeithorizonten in mehreren Ausprägungen zu verändern sind, um deren Entwicklung unter einer großen Wirkungsstärke und einem hohen Grad an Unsicherheit gerecht zu werden. Die im Hintergrund stattfindende Entwicklung kann sich zudem in ihrer Datenlage bereits für die Modelle im Referenzzustand von einer meist größeren Expertise und mehr Primärdaten auf direkter Fahrzeugebene zur Systemumgebung hin weiter verringern.

Weiterhin sind die methodischen Entscheidungen für die frühzeitige Bestimmung der Gesamtmenge an Zukunftsszenarien festzulegen. Kosow und Gaßner stellen fest, dass die Entwicklung eines einzelnen explorativen Szenarios fast nie zweckmäßig ist, es aber durchaus angebracht sein kann, genau ein normatives Szenario zu konstruieren, sodass die Menge der Ausprägungen auf der zweckmäßigen Zielbildungsfunktion basieren sollte (2008). Die minimale Ausprägungsmenge pro Parameter kann für die OP daher durch die hohe Unsicherheit mehrere Veränderungen beinhalten, mindestens eine für prädiktive und normative Szenarien sowie mindestens zwei für explorative Szenarien durch eine größere Möglichkeitsspannweite. Die AP und UP des technologischen Fortschritts können dagegen nur eine alternative Ausprägung haben, jedoch bei Bedarf auch weitere. Die maximale Menge an verschiedenen Ausprägungen der Inventar-Parameter bestimmt die Anzahl an Szenarien, für die mehrere Gesamtflussinventare aus einem vorherigen Sachbilanz-Modell entstehen können. Die AP und UP als Parameter des technologischen Fortschritts im Vordergrundsystem sowie die OP als Haupt-Parameter des zeitlichen Fortschritts im Hintergrundsystem sind hinsichtlich der Ursacheneinordnung als Begründung der Modifizierung und der zu integrierenden Ausprägungsmenge in Tabelle 20 zusammengefasst.

Tabelle 20 Einordnung des Modifikationszwecks von allen Inventar-Parametern in drei Parameterarten sowie deren Ursache und Folge.

Parameterart	Ursacheneinordnung der Modifizierung	Ausprägungsmenge	
		CT	TTS
Advance-Parameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zeitliche Trendverbesserung des konventionellen Produktsystems</li> <li>- Technologische Machbarkeitsverbesserung des konventionellen Produktsystems</li> <li>- Marktetablierungsjahrbezogener Fortschritt des konventionellen Produktsystems</li> </ul>	Jeweils 1 Wert genügt	-
Upscaling-Parameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Technologisches Lernen als Verbesserung von einzelnen Prozessmodulen des neuartigen Produktsystems</li> <li>- Technologisches Lernen als Verbesserung des neuartigen Produktsystems</li> <li>- Industrielles Lernen als mengenbasierte Skaleneffekte des neuartigen Produktsystems</li> </ul>	-	Jeweils 1 Wert genügt
Overall-Parameter	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Zu erwartende Zukunftsveränderung in der Systemumgebung des konventionellen und neuartigen Produktsystems</li> <li>- Extremere Zukunftsveränderung in der Systemumgebung des konventionellen und neuartigen Produktsystems</li> </ul>	Prädiktiv: 1 Wert Explorativ: ≥2 Werte Normativ: ≥1 Wert	Prädiktiv: 1 Wert Explorativ: ≥2 Werte Normativ: ≥1 Wert

Anhand der drei Parameterarten können Ursachen und Folgen der Parametermodifizierung für konventionelle und neuartige Fahrzeuge transparent aufgezeigt und nachvollziehbar zugeordnet werden. Je nach Wahl des übergeordneten Modifikationszwecks für die prospektive Sachbilanz können bei der Untersuchung von nur einem Verkehrsmittel ohne anschließende Vergleichsbetrachtung die erste oder zweite Parameterart wegfallen. In die Zukunftsszenarien sind jeweils alle modifizierten Parameter der Fahrzeuge zu integrieren, unabhängig davon, ob der Parameter im jeweiligen Zukunftsveränderungsmodell vorhanden ist bzw. verändert wird. Auf Grundlage der minimalen Menge an Wertveränderungen pro Parameter kann die maximale Beschränkung auf drei Zukunftsszenarien zur Gewährleistung einer sinnvollen Ergebnisauswertung für Entscheidungsträger (Adrianto et al., 2021) hinreichend eingehalten werden.

Zur Festlegung des Modifikationszwecks für jeden zu verändernden Inventar-Parameter ist das Ziel, das mit jeder einzelnen Modifizierung zu erreichen ist, als Ursacheneinordnung genauer zu definieren. Für das Ziel von AP, welche Produktsystementwicklungen im aussagekräftigen Vergleich für konventionellen Transport bis zum Betrachtungsjahr zu berücksichtigen sind, basiert die Ursache der Änderung auf zeitlichen Trendverbesserungen, technologischen Machbarkeitsverbesserungen oder marktetablierungsjahrbezogenem Fortschritt für CT im Vordergrundsystem. Für das Ziel von UP, welche Lernkurven von Schlüsseltechnologien und dem gesamten Fahrzeug bis zur industriellen Reife zu berücksichtigen sind, basiert die Ursache auf technologischem Lernen von Prozessmodulen oder dem kompletten neuartigen Produktsystem bis TRL 9 oder industriellem Lernen des neuartigen Produktsystems bis zur Marktetablierung. Für das Ziel von OP, welche zukünftigen Entwicklungspfade in der Systemumgebung von CT und TTS zu berücksichtigen

---

sind, unter denen sich die Technologie entwickelt, basiert die Ursache auf zu erwartenden bzw. extremeren Zukunftsveränderungen im Hintergrundsystem aller Produktsysteme. Je nach ausgewähltem Szenariotyp können mehrere quantitative Werte pro Parameter umgesetzt werden, die für alle Produktsysteme gleichermaßen zu integrieren sind unter der Voraussetzung, dass der Parameter im vorherigen Modell enthalten ist. Mit der detaillierten Zuordnung jedes Parameters zur Parameterart des zweiten oder dritten Veränderungslevels können alle Inventar-Parameter für die konkrete Veränderung des nachfolgenden Schrittes vorbereitet werden, woraus eine erleichterte Wahl der Datenmodifikationstechnik resultiert.

#### **6.4.2 Fünfter Schritt der prospektiven Sachbilanz: Parameter Veränderung**

Die zwei Gütekriterien aufgrund der hohen Relevanz des Kernschrittes sind die Plausibilität und der Grad der Inklusion für Beteiligte für nicht unmögliche ausgebildete Zukunftspfade sowie eine interdisziplinäre Akteurs-Beteiligung. Das Ziel des fünften Schrittes der *Parameter Veränderung* ist die Durchführung von Parameteränderungen auf Grundlage des Modifikationszwecks mit spezifischen Techniken für die jeweilige Veränderungsmaßnahme. Die systematische Vorgehensweise in diesem zentralen Schritt der Parameter-Modifizierung besitzt ebenfalls Neuwert-Charakter für die prospektive Ökobilanzierung.

Grundsätzlich fehlen für Zukunftsannahmen von Inventar-Parametern vielfältige Daten auf höherem TRL im Vordergrundsystem bzw. zeitlich vorangeschrittene Entwicklungen im Hintergrundsystem. Da für zukunftsveränderte Daten andere Anforderungen existieren und die Parameter-Modifizierung beeinflusst ist durch Interpretation, Auswahl und Beurteilung des Ökobilanzierers (Villares et al., 2017), werden Techniken benötigt als Erweiterung der Datengenerierungstechniken zur Technologieabschätzung der LCI bzw. eLCI. Die Erzeugung von quantitativen Schlüsselfaktorausprägungen besitzt für die Zukunft stets subjektive und intuitive Anteile, folglich muss ein Fokus auf die geeignete Technik gelegt werden wie die Extrapolation bzw. Variation von Trends (Kosow & Gaßner, 2008). Tabelle 21 zeigt für die Zukunftsannahmen des zweiten und dritten Veränderungslevels eine Auswahl an möglichen Datenmodifikationstechniken zur Entwicklungspfaderzeugung eines Zukunftstrichters pro Parameter. Die Techniken zeigen differenzierte Werkzeugtypen und Vorgehen zur Bildung der Entwicklungspfade und sind je für mindestens eine der drei Parameterarten anwendbar.

Die Techniken zur Datenmodifikation umfassen systematisch-formalisierte Ansätze wie Lernkurven zur TRL-Erhöhung von UP, die kreativ-narrativen Ansätzen gegenüberstehen wie ein disruptives Ereignis, bei dem beispielsweise durch einen Atomkraftwerksunfall politische Weichenstellungen der nächsten Jahrzehnte schlagartig einen neuen Kurs einnehmen. Kreativität als Werkzeugtyp der Gestaltung sowie Partizipation stellen zwar teilweise sehr intuitive, aber fundamentale Qualitätsvoraussetzungen zur Erzeugung quantitativer Werte in der Szenarioanalyse dar. Nach der Wahl der geeignetsten Technik kann die Modifizierung des jeweiligen Inventar-Parameters durchgeführt werden. Es wird aufgrund einer großen Zukunftsunsicherheit empfohlen, die prospektive Datenveränderung iterativ umzusetzen mit einer der zwei partizipativen Techniken zur Überprüfung der anvisierten Wertänderung und gegebenenfalls weiteren Anpassungen. Beispielsweise kann der Näherungswert des alternativen Produkts einer Expertenannahme zur Validierung gegenübergestellt werden oder ein extrapolierter historischer Trend lässt sich mit einer Expertenumfrage aus vielfältigen Fachrichtungen erneut bewerten.



Tabelle 21 Datenmodifikationstechniken zur zukunftsgerichteten Quantifizierung der Input- und Outputflüsse für konventionelle und neuartige Produktsysteme.

<b>Datenmodifikationstechniken</b>	<b>Werkzeug-typen</b>	<b>Vorgehen</b>	<b>Vorgehensbeispiel zur Datenmodifikation</b>	<b>Technik-eignung</b>
Historischer Trend	Bewertung	Trend Analyse/ Extrapolation	Ermittlung Steigungsgrade, prozentuale Koeffizienten, zeitliche Durchschnitte für zu erwartenden Flusswert	- Technol. Fortschritt - Zeitlicher Fortschritt
Disruptives Ereignis	Gestaltung	Kreativitätstechnik	Veränderung Steigungsgrade mit unerwarteter Entwicklung für extremeren Flusswert	- / - Zeitlicher Fortschritt
Lernkurve	Wissen	Upscaling Ansatz	Herstellungsdegression durch Kostenreduktion mit höherer Stückzahl und Übertrag von Erfahrungswert auf Flusswert	- Technologischer Fortschritt - /
Expertenumfrage	Partizipation	Fragebogentechnik	Bewertung vorformulierte Werte oder prozentuale Koeffizienten durch mehrere Experten des Feldes	- Technol. Fortschritt - Zeitlicher Fortschritt
Expertenannahme	Partizipation	Befragung Experten	Entnahme exakter Wert oder prozentualer Koeffizient von einem Experten des Feldes	- Technol. Fortschritt - Zeitlicher Fortschritt
Literaturannahme	Wissen	Szenariennutzung	Entnahme exakter Wert oder prozentualer Koeffizient von Veröffentlichung des Feldes	- Technol. Fortschritt - Zeitlicher Fortschritt
Prospektive Datenbank	Entscheidung	Prospektive Datensätze	Substitution eines Flusses zu einem modifizierten Fluss	- / - Zeitlicher Fortschritt
Näherungswert alternatives Produkt	Entscheidung	Analogietechnik	Entnahme Stellvertreterwert oder prozentualer Koeffizient aus vergleichbarem Feld	- Technol. Fortschritt - Zeitlicher Fortschritt
Eigene Annahme	Gestaltung	Brainstorming	Erzeugung exakter Wert oder prozentualer Koeffizient mit Marktbeobachtungen, externen Faktoren etc.	- Technol. Fortschritt - Zeitlicher Fortschritt

Nach der iterativen Umsetzung von Datenmodifikationstechniken zur Festlegung auf einen geeigneten Wert ggf. in mehr als einer Ausprägung für die selektiven Inventar-Parameter kann die vorbereitende Modellquantifizierung mit einer konkreten Veränderungsmaßnahme anhand einer Flussmodifikation vorgenommen werden. Tabelle 22 verdeutlicht, wie Wertänderungen mittels sechs verschiedener Veränderungsmaßnahmen von Input- bzw. Outputflüssen für die beiden Datensatzarten Erzeugungsprozess und Marktprozess in der Datenbank umzusetzen sind. Ein Erzeugungsprozess Datensatz berücksichtigt spezifische Prozessmodule z.B. zur Herstellung des Fahrzeugs, die individuell modifiziert werden können. Dagegen sind im Marktprozess Datensatz nur vollständige Produktsysteme wie Energieerzeugungstechnologien integriert, die auf Basis bestimmter geographischer und technologischer Erfassungsbereiche zu verschiedenen Anteilen enthalten sind z.B. als

deutscher Strommix. Veränderungsmaßnahmen über den Lebensweg des Produktsystems lassen sich daher nur in ersteren umsetzen, während die durchschnittliche Produktsystem-Zusammensetzung in Märkten mit letzteren modifiziert werden kann, um einen künftigen Zustand wie einen dekarbonisierten Strommix abzubilden. Die Veränderung der Parameter endet mit der Flussmodifikation in einer oder mehreren quantitativen Varianten mit Veränderungsmaßnahmen wie der Flusswertreduktion durch Effizienz z.B. mit Materialreduktionen, zusätzlichen Bereitstellern im Markt durch neue Produkte z.B. als grüner Wasserstoff oder dem Flussaustausch durch Substitution z.B. mit modifizierten Inputflüssen auf Basis von vorhandenen prospektiven Datensätzen aus prospektiven Datenbanken wie premise oder FUTURA für die jeweilige Wertänderung im Modell.

Tabelle 22 Flussmodifikation durch Inventar-Parameter anhand von Veränderungsmaßnahmen im Datensatz.

Datensatzart in Datenbank	Veränderungsmaßnahme	Umsetzung der Flussmodifikation (Verbesserungseffekt zum Endresultat)
Erzeugungsprozess Datensatz (z.B. Technologieherstellung)	- Effizienz - Substitution - Geographie	- Flusswertreduktion (+) - Flussaustausch (+/-) - Herstellungsort Transportdistanzänderung (+/-)
Marktprozess Datensatz (z.B. Technologiemix)	- Marktanteil - Neue Produkte - Entfernte Produkte	- Zusammensetzungsänderung (+/-) - Zusätzliche Bereitsteller im Markt (+/-) - Reduzierte Bereitsteller im Markt (+/-)

Die Vorgehensweise der pLCI schließt zum Ende des fünften Schrittes mit der Ausbildung der konkreten quantitativen Veränderungen auf Basis von technologischem und zeitlichem Fortschritt bis zu einem bestimmten Betrachtungszeitpunkt ab. Bevor im sechsten Schritt die modifizierten Parameterwerte gemeinsam weiterführend analysiert werden, wird die Erarbeitung von zukünftigen Parametern im Rahmen der zweiten Stufe bis zu diesem Schritt für alle Parameterarten anhand von vier exemplarischen Anwendungen vorgestellt.

Die Durchführung der schrittweisen Parameter-Modifizierung in vier Anwendungsbeispielen ist in Abbildung 27 dargestellt und erfolgt in der Auswahl des Modifikationszwecks von einer der drei Parameterarten, die Wahl der geeigneten Datenmodifikationstechniken sowie die Umsetzung der jeweiligen Flussmodifikation mit dem Ergebnis von einer oder mehreren Wertänderungen. Das erste Beispiel zeigt die Substitution des Materials Aluminium mit dem neuen Verbundwerkstoff CFK in der Tragstruktur als technologischer Fortschritt des CT, um der Entwicklung der TTS im Marktetablierungsjahr zu entsprechen. Auf Basis einer Expertenannahme erfolgt die Veränderung des Parameters der Materialverteilung in der Tragstruktur und die Massereduktion im Produktsystem zwecks reduzierter Materialdichte. Das zweite Beispiel zeigt die Produktionssteigerung der Lithium-Schwefel-Batterie als technologischer Fortschritt für die TTS bis zum Marktetablierungsjahr. Die Veränderung besteht in einem Übertrag des lernkurvenbasierten Entwicklungsfortschritts auf den Parameter der Komponentenprozessenergie des neuartigen Produktsystems und führt zur Flusswertreduktion des Energieeinsatzes im Prozessmodul und im Produktsystem. Im dritten und vierten Beispiel wird anhand einer Erhöhung von regenerativen Energien einerseits eine Trendentwicklung für den Strommix auf Basis der letzten fünf Jahre und andererseits eine Entwicklung in zwei Variationen für den Stromeinsatz von gelbem und grünem Wasserstoff anstelle von aus Erdgas hergestelltem Wasserstoff als zeitlicher Fortschritt abgebildet. Diese

Veränderungen gelten für alle Verkehrsmittel gleichermaßen, wenn der Parameter enthalten ist. Für den Strommix erfolgt zunächst für ein BAU Szenario lediglich eine trendbasierte Zusammensetzungsänderung im Markt, während für die Wasserstoffproduktion je in einer BAU und Best Case Entwicklung fossile Bereitsteller den Markt verlassen und regenerative Bereitsteller hinzukommen. Aus dieser Veränderung resultiert ein Flussaustausch zu einem zukünftigen Strommix in den Prozessen des jeweiligen Fahrzeugs in zwei Ausprägungen. Mit dieser systematischen Modifizierung in vier Beispielen werden vielfältige prospektive Daten erzeugt, die im nächsten Schritt gebündelt dem anvisierten Zukunftszustand zugeordnet werden müssen.

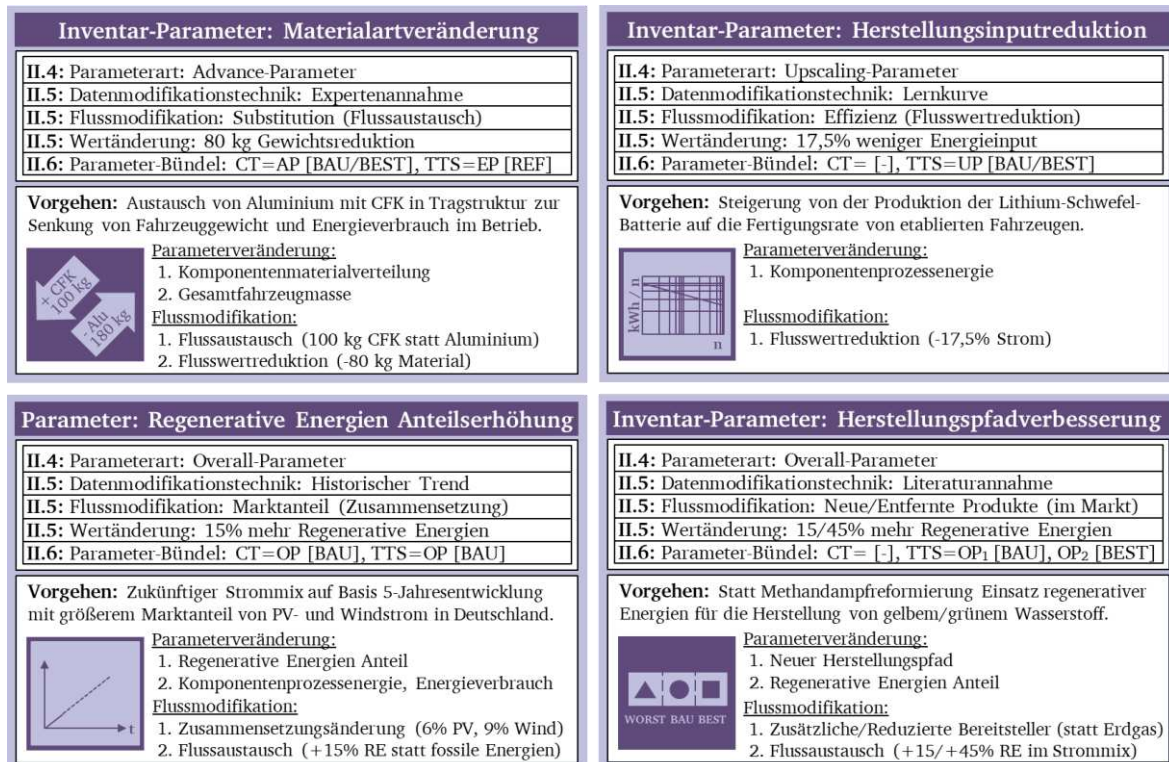


Abbildung 27 Schrittweise Anleitung zur Parameter-Modifizierung von Stufe zwei in vier Anwendungsbeispielen.

### 6.4.3 Sechster Schritt der prospektiven Sachbilanz: Szenariotyp Zuordnung

Das Gütekriterium ist die Trennschärfe für unterscheidbar gebündelte Parameter. Das Ziel des sechsten Schrittes der *Szenariotyp Zuordnung* ist die Parameter-Bündel Auflistung zur Einordnung der Entwicklungspfade zu dem anvisierten Szenariotyp. Nachdem alle Wertänderungen für die prospektiven Daten erhalten wurden, können als Folge die Entwicklungspfade jedes Inventar-Parameters in jeder Ausprägung in die zeitlichen Zustände eingeordnet werden zur Darstellung von bestimmten Szenariotypen, die in der Vorstufe gewählt wurden. Aus diesen zugeordneten Parameter-Bündeln lassen sich im Anschluss in der dritten Stufe ein oder mehrere abgrenzbare Zukunftsszenarien ausbilden. Diese systematische Zuordnung zum Szenariotyp findet sich in dieser Präzision ebenfalls noch in keiner identifizierten Methode zur prospektiven Ökobilanzierung wieder, ist in der Vorgehensweise der Vorausschaumethodik jedoch weit verbreitet und ein notwendiger Bestandteil in der Szenarioanalyse.

---

Die Auswahl von Szenarien besitzt ebenfalls stets subjektive und intuitive Anteile, daher muss die Logik des Szenarios untersucht werden, um abschließend eine händelbare Anzahl von konsistenten Szenarien zu erhalten (Kosow & Gaßner, 2008). Die Szenario-Logik stellt die Ordnung einer Gruppe von divergierenden Schlüsselfaktoren dar, die einen Vergleich zwischen verschiedenen Szenarien und deren Narrative ermöglicht (Rounsevell & Metzger, 2010). Die Zuordnung der Inventar-Parameter sollte demnach unter einer zugrunde gelegten Logik erfolgen, um mit geringer Komplexität eine bzw. wenige unterscheidbare Bündel je Szenariotyp zu erzeugen.

Zur Zusammenfügung empfehlen Kosow und Gaßner, eine Übersicht über die differenzierten Schlüsselfaktorausprägungen pro Szenario zu geben für die Bündelung z.B. in einem Szenario-Kreuz, aus dem im Minimum mit zwei Parametern in zwei Ausprägungen vier trennscharfe Marker-Szenarien entstehen können. Um die zentralen Schlüsselfaktoren jedes Szenarios ersichtlich zu machen, müssen die vorausgesetzten Grundannahmen für die Zukunft aufgedeckt werden. Eine Grundannahme ist, dass alle Parameter ohne deutliche Unsicherheit in einer einzigen Ausprägung berücksichtigt werden können, während die Parameter mit einer signifikanten Unsicherheit in mehreren Ausprägungen in die Szenarien integriert werden sollten. (2008)

Aus der Grundannahme zur Parameter-Bündelung ergibt sich, dass alle kritisch-unsicheren Parameter in mehreren Ausprägungen jeweils mit allen anderen Parametern in nur einfacher Ausprägung verbunden werden sollten, woraus die maximale Ausprägungsmenge die Szenarienzahl bestimmt. Die Kombinationslogik für den Zukunftszustand erfolgt demnach in der pLCI als ein selektives Szenario-Kreuz, bei dem die unterschiedlichen Ausprägungen die Anzahl der Marker-Szenarien ergibt und diesen bei fehlenden Unterschieden dieselben Ausprägungen der prospektiven Parameter zugeordnet werden. Auf Basis dieser Logik werden AP und UP in meist einfacher Ausprägung jeweils mit allen OP verbunden, welche mehrere Ausprägungen besitzen können und die Ausbildung von einem bzw. mehreren Marker-Szenarien bewirken. Die Erweiterung der literaturbasierten Szenario-Logik auf ein nur selektiv umgesetztes Szenario-Kreuz, bei der viele Parameter in einfacher Ausprägung integriert werden können, jedoch nur wenige künftige Möglichkeiten in Form von Marker-Szenarien auf Basis der kritisch-unsicheren Parameter aufgespannt werden, kann den Aufwand einer komplexen Bündelungslogik geringhalten und die Zuordnung vereinfachen.

Die exemplarische Einordnung in eine systematische Parameter-Bündel-Liste wird in Tabelle 23 für zwei Varianten eines explorativen Szenariotyps anhand drei differenzierter zeitlicher Zustände von einer TTS aufgezeigt. Diese TTS stellt den dritten Transformationstyp von u.a. einem Tragstrukturwechsel als ein vollelektrisches Zweipersonen-Leichtflugzeug dar. Die abgebildeten Inventar-Parameter basieren qualitativ und quantitativ auf den vorgestellten Schritten der Stufe eins und zwei. Zur Übersichtlichkeit sollten die quantifizierten Werte des Referenzzustands, aus denen die Veränderung vorgenommen wurde, immer mit aufgelistet werden. Die Auflistungssystematik der Parameter-Bündel erfolgt anhand der Kennung aller Inventar-Parameter als Inventar-Kürzel zu Parameterart (IP/EP/AP/UP/OP), Parameterart-Nummer und Ausprägungs-Nummer sowie als Zeit-Kürzel zu zeitlichem Zustand (REF/FUT), Szenariotyp (PRE/EXP/NOR) und Veränderungsintensität (BAU-BEST). Zur Trennschärfe zwischen einzelnen Bündeln und der jeweiligen Modifizierung individueller prospektiver Parameter können weitere Informationen wie die umgesetzte Flussmodifikation oder die Datenmodifikationstechnik angegeben werden.

Tabelle 23 Zuordnung der Inventar-Parameter in der Parameter-Bündel-Liste als Sammlung für Zukunftsszenarien.

<b>Parameter-Bündel-Liste</b>				
<b>Inventar-Kürzel</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Umsetzungsmaßnahme</b>
EP 1.1	REF	Materialartveränderung	100 kg CFK	- 80 kg
EP 2.1	REF	Energieverbrauchsreduktion	20 kWh/100 km	- 5%
UP 1.1	REF	Herstellungsinputreduktion	100% Energieinput Batterie	
UP 2.1	REF	Materialeffizienzerhöhung	100% Materialinput Batterie	
OP 1.1	REF	Regenerative Energien Anteilserhöhung	50% RE in Strommix	
OP 2.1	REF	Recyclinginputrateerhöhung	20% Recycling	
<b>Inventar-Kürzel</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Wert-änderung</b>
UP 1.2	FUT-EXP-BAU	Herstellungsinputreduktion	100% Energieinput Batterie	- 17,5%
UP 2.2	FUT-EXP-BAU	Materialeffizienzerhöhung	100% Materialinput Batterie	- 10%
OP 1.2	FUT-EXP-BAU	Regenerative Energien Anteilserhöhung	50% RE in Strommix	+ 15%
OP 2.2	FUT-EXP-BAU	Recyclinginputrateerhöhung	20% Recycling	+ 25%
<b>Inventar-Kürzel</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Wert-änderung</b>
UP 1.2	FUT-EXP-BEST	Herstellungsinputreduktion	100% Energieinput Batterie	- 17,5%
UP 2.2	FUT-EXP-BEST	Materialeffizienzerhöhung	100% Materialinput Batterie	- 10%
OP 1.3	FUT-EXP-BEST	Regenerative Energien Anteilserhöhung	50% RE in Strommix	+ 45%
OP 2.3	FUT-EXP-BEST	Recyclinginputrateerhöhung	20% Recycling	+ 70%

Die quantitative Datenbeschaffung für die Zukunftsszenarien endet in der zweiten Stufe mit den aufgelisteten Entwicklungspfaden jedes im Produktsystem berücksichtigten Inventar-Parameters. Für diese ist zwar mit Abschluss des sechsten Schrittes gewährleistet, dass sie dem richtigen Szenariotyp zugeordnet sind, jedoch müssen die Parameter-Bündel noch hinsichtlich ihrer Konsistenz überprüft werden, bevor aus diesen die Zukunftsszenarien final ausgebildet werden können. Sollten sich im nachfolgenden Schritt notwendige Änderungen ergeben, sind diese Parameter in der zweiten Stufe erneut zu untersuchen und die ausgebildeten Entwicklungspfade der Parameter-Bündel-Liste iterativ anzupassen, um nicht nur zu unterscheidbaren, sondern auch zu konsistenten Zukunftsszenarien zu gelangen.

### **6.5 Dritte Stufe der Zukunftsszenario Bestimmung zur Modellquantifizierung der Zukunftsveränderungsmodelle**

Nach Erhalt und Zuordnung der prospektiven Daten für bestimmte Zukunftsentwicklungen müssen diese in der dritten Stufe der pLCI für alle quantifizierten veränderten Parameter



---

und Flüsse in die Zukunftsveränderungsmodelle aller Fahrzeuge integriert werden, um zu verrechneten Sachbilanz-Ergebnissen von prospektiven Gesamtflussinventaren zu gelangen. Das übergeordnete Ziel ist, mit der *Zukunftsszenario Bestimmung* aus den Parameter-Bündeln konsistente Szenarien zu bilden, diese in die Modelle zu integrieren und zu kommunizieren. Die Vorgehensweise zur Festlegung der Zukunftsszenarien setzt sich zusammen aus dem Abschluss des Entwicklungsprozesses mit einem spezifischen Szenarioausprägungsergebnis pro konsistentem Szenario, der evidenten Einbeziehung ins Modell zur Nutzbarmachung für die LCA und der Visualisierung anhand einer erzählerischen Narrative und dem Aufzeigen der Konstruktion des Szenarios. Der benötigte Input stellt die quantifizierten und jeweils einem Szenariotyp zugeordneten Parameter aus der Untersuchung der zweiten Stufe dar, woraus als Resultate der dritten Stufe nutzbare Zukunftsszenarien zur zukunftsgerichteten Umweltbewertung erzeugt werden, mit denen die Wirkungsabschätzungsprofile der konventionellen bzw. neuartigen Verkehrsmittel im Zukunftszustand für den Vergleich und für die weitere Entscheidungsunterstützung erhalten werden können.

### **6.5.1 Siebter Schritt der prospektiven Sachbilanz: Zukunftsszenario Kombination**

Das Gütekriterium ist die Konsistenz für in sich stimmige Zukunftspfade. Das Ziel des siebten Schrittes der *Zukunftsszenario Kombination* ist mit einer Parametergegenüberstellung die Kombination zu einem Szenario zu prüfen und diese daraufhin zu einem spezifischen Zukunftsszenario festzulegen. Folglich sind wenige unterscheidbare und zudem konsistente Szenarien zu erhalten, aus denen quantitative Daten für die Zukunftsveränderungsmodelle entnommen werden können.

Die Bündelung von Entwicklungspfaden muss nach Abschluss von Schritt sechs hinsichtlich ihrer Eignung zur Ausbildung konsistenter Szenarien überprüft werden. Einige Autoren empfehlen für die Konsistenzanalyse die Konsistenzmatrix (Cucurachi et al., 2022; Kosow & Gaßner, 2008; Langkau et al., 2023; Spielmann et al., 2005), aus der in einer paarweisen Gegenüberstellung jeder Ausprägung von jedem Schlüsselfaktor die Vereinbarkeit zur Umsetzung von konsistenten Parameter-Bündeln bewertet werden kann. Es folgt die Matrixausbildung und Überprüfung von kombinierten Zukunftsannahmen der Inventar-Parameter zunächst hinsichtlich interner Konsistenz. In der direkten Gegenüberstellung können die korrekte Bündelung der modifizierten Parameter aus der Parameter-Bündel-Liste geprüft und inkonsistente Parameter identifiziert werden, um sie entweder in Stufe zwei iterativ anzupassen oder aus der Kombination des Zukunftsszenarios zu entfernen. Anschließend werden die Parameter auf ihre Eignung mit der Entwicklung der externen Haupt-Faktoren geprüft. Die zusätzlich zu überprüfenden externen Haupt-Faktoren der übergeordneten gesamtgesellschaftlichen Entwicklung können mit den meisten ausgehenden Pfeilverbindungen dem Kausalschleifendiagramm für den Konsistenzcheck entnommen werden. Denn nur wenn alle Schlüsselfaktoren der pLCI für die Zukunft die gleiche Veränderungsgrundlage im Szenarioentwicklungsprozess haben, kann für das spezifische Szenarioausprägungsergebnis die Szenario-Narrative in einem schlüssigen Erzählstrang ausgearbeitet werden. Tabelle 24 zeigt die Ausbildung der Konsistenzmatrix für den Konsistenzcheck zwischen den quantitativ modifizierten Inventar-Parametern und dem qualitativ ausgebildeten externen Haupt-Faktor für zwei explorative Zukunftsszenarien einer TTS auf.



Tabelle 24 Konsistenzmatrix als Konsistenzcheck von Schlüsselfaktoren zur Kombination von Zukunftsszenarien (in Anlehnung an Kosow & Gaßner, 2008).

Konsistenzmatrix							Externe Haupt-Faktoren
Parameter-Bündel für Zukunftsszenarien	Inventar-Parameter						
	1) UP 1.2 beide	2) UP 2.2 beide	3) OP 1.2 BAU	4) OP 1.3 BEST	5) OP 2.2 BAU	6) OP 2.3 BEST	PESTEL - Fortschritt grüner Schlüssel-technologien
1) UP 1.2	+	+	+	+	+	+	
2) UP 2.2			+	+	+	+	
3) OP 1.2				-	+	O	
4) OP 1.3					O	+	
5) OP 2.2						-	
6) OP 2.3						/	
Konsistenz: völlig (+), teilweise (O), nicht (-) keine Aussage möglich (/)							

Nach der iterativen Anpassung oder Entfernung inkonsistenter Parameter folgt der Erhalt der korrekt kombinierten Szenarien mit nur völlig oder teilweise konsistenten Parametern für einen spezifischen Zukunftszustand. Diese sind im nächsten Schritt in das jeweilige Sachbilanz-Modell zu überführen, um auf Grundlage dieser Erweiterung die zukünftigen Fahrzeuge quantifizieren zu können. Die Durchführung einer vorherigen Konsistenzprüfung vermeidet einen Mehraufwand, wenn Szenarien bereits mit Sachbilanz-Modellen verknüpft sind und erst im Verrechnungsprozess eine fehlende Konsistenz zwischen den prospektiven Daten von Vordergrundsystem und Hintergrundsystem des Produktsystems sowie der übergeordneten gesamtgesellschaftlichen Entwicklung festgestellt wird. Es ist zur besseren Differenzierung der finalisierten Zukunftsszenarien ein aussagekräftiger Name für jedes Szenario zu wählen, welcher die inhärenten Eigenschaften bestmöglich wiedergibt.

Die endgültige Kombination der prospektiven Daten zu dem jeweiligen Zukunftsszenario ist in einer transparenten Datenaufbereitungsstruktur aufzulisten, die zu den unterschiedlichen Ausprägungen der Inventar-Parameter im Zukunftszustand gegenüber dem Referenzzustand eine klare Übersicht liefert. Zur Dokumentation für Ökobilanzierer dient das editierbare Parameterverzeichnis im vierten Dokumentationsblatt, das für alle relevanten Änderungen der pLCI gegenüber der LCI bzw. eLCI Informationen zur Parameter-Modifizierung der Ökobilanzierung als Parametermodifikationsverzeichnis bereitstellt und welches öffentlich zugänglich ist über die DOI <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1349> (Hanesch, 2024a). Das Parametermodifikationsverzeichnis basiert auf der Parameter-Bündel-Liste, den Ergebnissen des Konsistenzchecks und der finalen Kombination zu Zukunftsszenarien. Die veränderten Parameter im Verzeichnis können als Datensteckbrief dem Ökobilanz-Bericht für die jeweilige TTS-Variante bzw. für das konventionelle Fahrzeug angehängt werden, um für TTS und CT die Datengrundlage von Zukunftsszenarien mit identischem zeitlichen

Fortschritt zum Vergleich aufzuzeigen. Diese Offenlegung kann anderen LCA-Studien als weiterverwendbarer Dateninput dienen und Entscheidungsträgern eine transparente Vergleichsmetrik liefern. Zudem kann unter Darstellung aller Zukunftsannahmen des Szenarioentwicklungsprozesses ein erleichterter Übertrag ins Zukunftsveränderungsmodell erfolgen.

### 6.5.2 Achter Schritt der prospektiven Sachbilanz: Sachbilanzmodell Integration

Das Prozesskriterium ist der Aufwand, sodass zur Modellierung die Beschränkung notwendig ist, um mit einer geringen Anzahl an Szenarien, Parametern und integrierten Experten die Aufwandssumme für die pLCI-Ergebnisse zu reduzieren. Das Ziel des achten Schrittes der *Sachbilanzmodell Integration* ist die Übertragung der Zukunftsszenarien zur Quantifizierung aller pLCI-Modelle im Zukunftszustand. Sobald spezifische Zukunftsszenarien vorliegen, müssen das Transportmodell bzw. das Transformationsmodell aus der retrospektiven LCA mit diesen erweitert werden für die Ausbildung von einem oder mehreren Zukunftsveränderungsmodellen im Rahmen der prospektiven LCA.

Da Szenarien abschließend in Modelle zu übersetzen sind (Kosow & Gaßner, 2008), wird der prospektive Datenübertrag der Inventar-Parameter mit der vorherigen Prozessstruktur aus den LCI- bzw. eLCI-Modellen verbunden, um hieraus Bestandsdaten mit modifizierten Daten verrechnen und folglich quantifizieren zu können. Abbildung 28 zeigt die erweiterte Modellausbildung, in der drei Produktsysteme beispielsweise aus einem Transportmodell und zwei Transformationsmodellen mit jeweils dem gleichen Zukunftsszenario zu drei Zukunftsveränderungsmodellen führen. Diese unterscheiden sich vom Referenzzustand nur in der berücksichtigten Zukunftsentwicklung, sodass die Prozessstruktur und Verrechnung der Daten identisch bleiben. Aufgrund der modifizierten Parameter ändern sich die Flüsse quantitativ und teilweise auch strukturell in jedem neuen Modell.

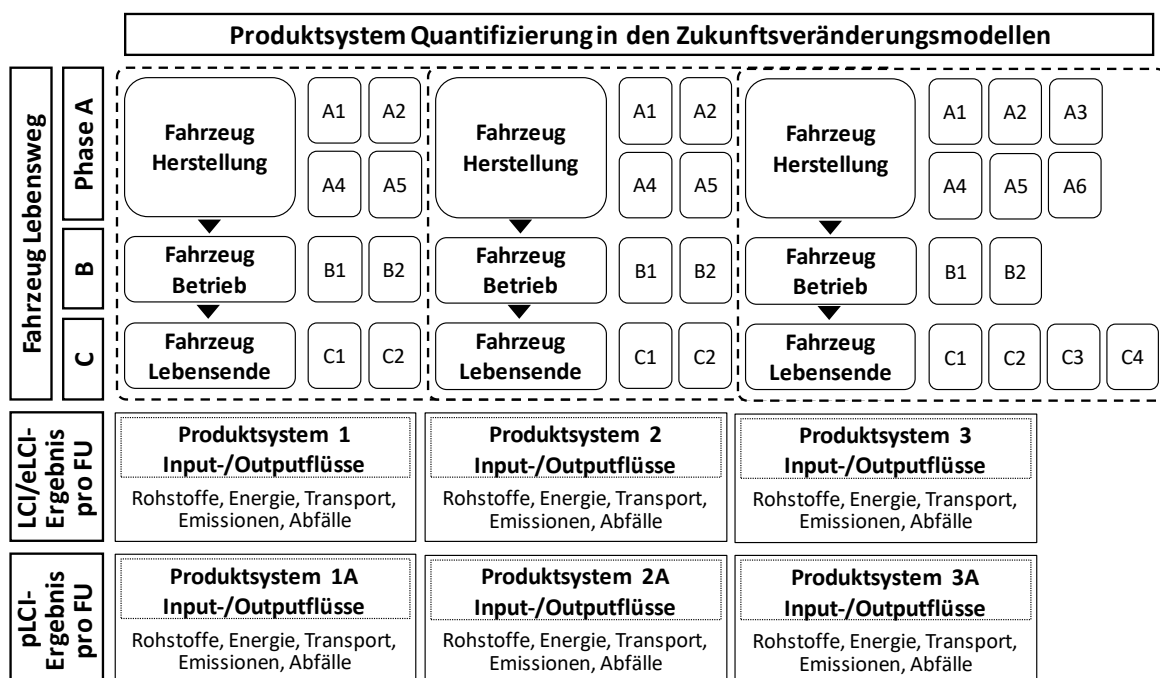


Abbildung 28 Erweiterte Modellausbildung von drei Produktsystemen auf Basis eines Zukunftsszenarios zur Integration und Verrechnung von Daten in drei Zukunftsveränderungsmodellen.

Die Ausbildung und Verrechnung von zwei Zukunftsveränderungsmodellen aus einem Transformationsmodell wird in Abbildung 29 dargestellt, wobei nicht jeder Prozess und jede Lebensphase wie in lila gekennzeichnet modifiziert werden muss, sodass an vielfältigen Stellen auf vorhandene Daten aus der LCI bzw. der eLCI zurückgegriffen werden kann.

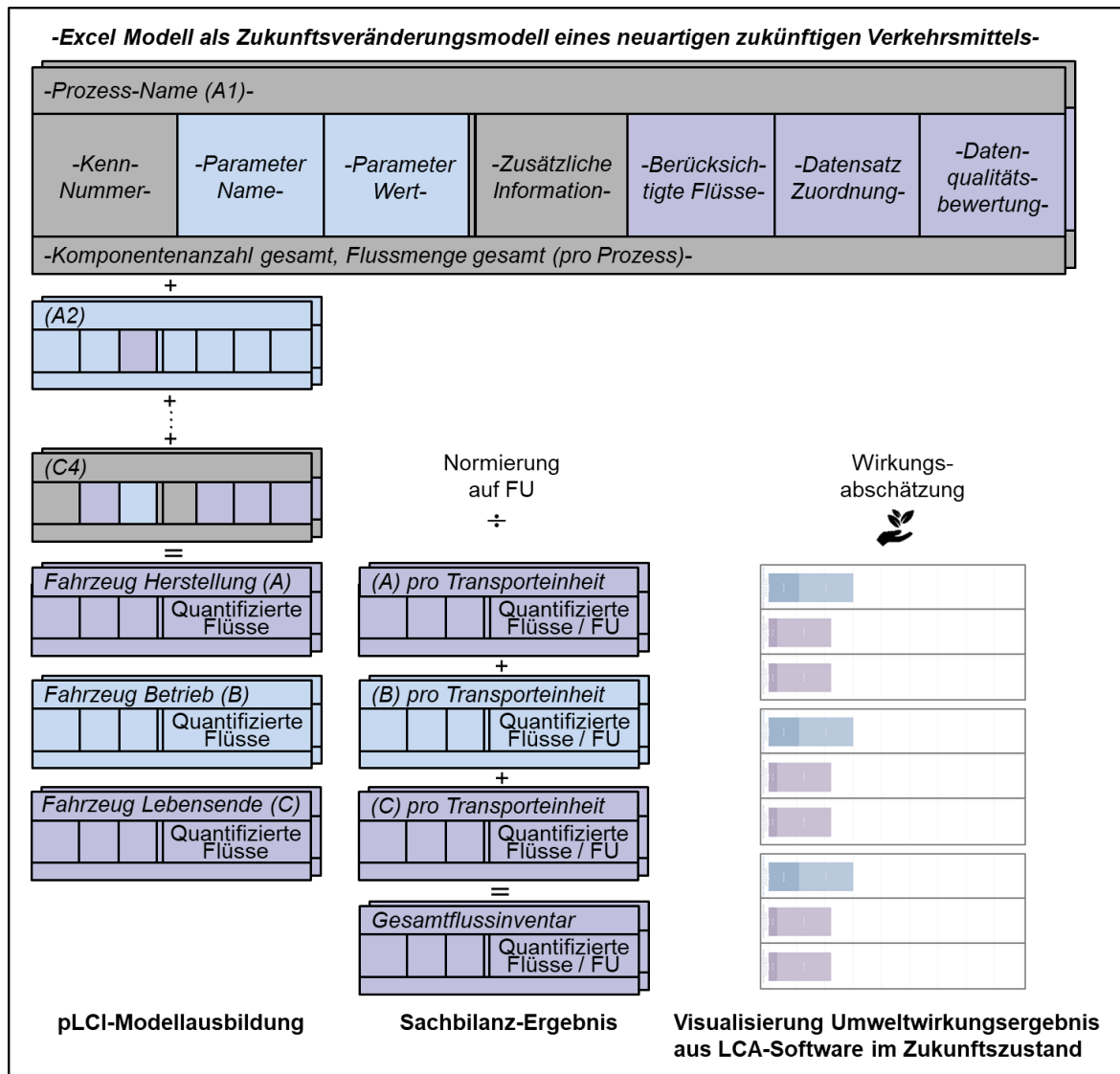


Abbildung 29 Excel-basierte Verrechnung teilweise modifizierter und quantifizierter Flüsse zur Nachbildung einer zukunftsgerichteten TTS in zwei Zukunftsveränderungsmodellen.

Aus der Integration vorhandener Prozesse und Flusswerte lässt sich im neuen Modell der Verrechnungsaufwand verringern, sodass teilweise der höhere Aufwand einer zusätzlichen Umweltbewertung pro pLCI-Ergebnis kompensiert werden kann. Aufgrund der Erzeugung eines prospektiven Gesamtflussinventars pro entwickeltem Szenario und Fahrzeugvariante sollte sich auf wenige, aussagekräftige Zukunftsszenarien beschränkt werden, da jeweils in einer prospektiven Umweltbewertung separat alle relevanten Umweltwirkungen ermittelt werden müssen. Tabelle 25 zeigt prospektive Gesamtflussinventare auf Basis der gewählten Produktsysteme von Tabelle 16 der eLCI für verschiedene Zukunftszustände auf, welche dem jeweiligen Sachbilanz-Modell im Referenzzustand gegenübergestellt werden und für CT und TTS gleichermaßen im Zukunftszustand modelliert werden müssen.

Tabelle 25 Prospektives Gesamtflussinventar zur Bereitstellung der Transportfunktion im Zukunftszustand.

	Gesamtflussinventar		CT LCI	TTS1 eLCI	TTS3 eLCI	CT pLCI PRE	TTS1 pLCI PRE	CT pLCI E <sub>1</sub> /N <sub>1</sub>	TTS3 pLCI E <sub>1</sub> /N <sub>1</sub>	...	
	Produktsystem, Modellierungszeitpunkt	/FU								pLCI EXP <sub>2</sub>	pLCI EXP <sub>2</sub>
	Produkt- und Elementarflüsse										
A – Herstellungsphase	Aluminium Bereitstellung	kg									
	Stahl Bereitstellung	kg									
	Chrom-Stahl Bereitstellung	kg									
	Kupfer Bereitstellung	kg									
	Nickel Bereitstellung	kg									
	Nickel-Legierung Bereitstellung	kg									
	Titan Bereitstellung	kg									
	Kobalt Bereitstellung	kg									
	Neodym Bereitstellung	kg									
	Lithium Bereitstellung	kg									
	Graphit Bereitstellung	kg									
	CFK Bereitstellung	kg									
	GFK Bereitstellung	kg									
	PET Bereitstellung	kg									
	PP Bereitstellung	kg									
	PVC Bereitstellung	kg									
	PUR Bereitstellung	kg									
	Gummi Bereitstellung	kg									
	Transport Straße	tkm									
	Transport Luft	tkm									
Strom Bereitstellung	kWh										
Wärme Bereitstellung	MJ										
Lackierung Bereitstellung	kg										
B – Nutzenphase	Kraftstoff Bereitstellung	kg									
	Strom Bereitstellung	kWh									
	Wasserstoff Bereitstellung	kg									
	Kohlendioxid Emission	kg									
	Stickoxide Emission	kg									
	Schwefeloxide Emission	kg									
	Wasser Emission	m <sup>3</sup>									
	Kohlenmonoxid Emission	kg									
	Kohlenwasserstoffe Emission	kg									
C – Entsorgungsphase	Transport Straße	tkm									
	Strom Bereitstellung	kWh									
	Abfall Deponierung	kg									
	Verbundwerkstoffe Verbrennung	kg									
	PET Verbrennung	kg									
	PP Verbrennung	kg									
	PVC Verbrennung	kg									
	PUR Verbrennung	kg									
	Gummi Verbrennung	kg									
	Aluminium Recycling	kg									
	Stahl Recycling	kg									
	Edelmetalle Recycling	kg									
	Polymere Recycling	kg									
	Aluminium Sekundärrohstoffe	kg									
	Stahl Sekundärrohstoffe	kg									
Edelmetalle Sekundärrohstoffe	kg										
Polymere Sekundärrohstoffe	kg										

---

Die neuen Gesamtflussinventare aus den Zukunftsveränderungsmodellen beinhalten alle modifizierten Parameter, mit denen die Zukunftsentwicklung abgebildet wird. Diese modifizierten Parameter beeinflussen die Input- bzw. Outputflüsse entweder nur in einem spezifischen Prozess oder im gesamten Modell (Langkau et al., 2023). Aus diesen entstehen für die vielfältigen Produkt- und Elementarflüsse über den Produktlebensweg Änderungen, die als lila Felder dargestellt sind. Dagegen markieren weiße Felder wiederum nicht vorhandene Flüsse, graue Felder bereits integrierte Daten aus dem Transportmodell sowie blaue Felder bereits integrierte Daten aus dem Transformationsmodell. Die Änderungen im entfernten Zukunftszustand der explorativen bzw. normativen Szenarien des prospektiven Gesamtflussinventars basieren auf den im Kausalschleifendiagramm abgebildeten und in der zweiten Stufe der pLCI modifizierten sechs Inventar-Parametern, die für den CT und die TTS unterschiedlich zu berücksichtigen sind. Im prädiktiven Zukunftsszenario einer nahen Entwicklung mit geringer Veränderungsintensität werden für beide Produktsysteme nur zu erwartende Zukunftsveränderungen in der Systemumgebung anhand der beiden OP Regenerative Energien Anteilserhöhung und Recyclinginputrateerhöhung umgesetzt, woraus weniger veränderte Flüsse mit prospektiven Daten resultieren.

Die umgesetzte Quantifizierung aller Flüsse erfolgt separat für CT und TTS pro Szenario und resultiert in mindestens einem pLCI-Modell mit spezifischen Flusswerten pro Technologie zusätzlich zum Modell der LCI bzw. eLCI. Für die Bewertung des konventionellen Fahrzeugs und der verschiedenen TTS in mehreren zeitlichen Zuständen sollte zudem die Anzahl an ausgebildeten Spalten im Gesamtflussinventar für den Zukunftszustand immer identisch sein, um im Nachgang von Stufe drei der pLCI die durchgeführte Umweltbewertung z.B. für den übergeordneten Modifikationszweck eines bestimmten Marktetablierungsjahres jeweils auf Basis des gleichen Zukunftsszenarios umzusetzen und untereinander zu vergleichen.

### **6.5.3 Neunter Schritt der prospektiven Sachbilanz: Narrative Kenntlichmachung**

Das Gütekriterium ist die Rezeptionsqualität für eine einprägsame Ergebnisgestaltung. Das Ziel des neunten Schrittes der *Narrative Kenntlichmachung* ist eine Kennzeichnung von dem Szenarioausprägungsergebnis mittels qualitativer Handlungsstränge und quantitativer Szenariobausteine. Im letzten Schritt der pLCI müssen die Zukunftsszenarien kenntlich gemacht und graphisch aufbereitet werden für einen transparenten Vergleich und zur Unsicherheitskommunikation.

Mit Beendigung der pLCI-Modellergebnisse kann die Übersetzung in Szenariotext erfolgen zur Darstellung der Zukunftssituation und dem Weg dorthin mit einer Hervorhebung von individuellen und symbiotischen Ausprägungen der Schlüsselfaktoren (Kosow & Gaßner, 2008). Nach der Kombination konsistenter Zukunftsszenarien benötigt es eine erzählerische Beschreibung, um Dynamiken und Zusammenhänge des Szenarioausprägungsergebnisses herauszuarbeiten und ein besseres Verständnis über den Szenarioentwicklungsprozess zu geben. Verschiedene Autoren heben die Szenario-Narrative zur Kommunikation von Szenarioentwicklung und Resultat hervor (Cucurachi et al., 2022; Fishman et al., 2021). Die strukturierte Vorgehensweise zur Erstellung einer Szenario-Narrative sowie ein Anwendungsbeispiel für eine Szenario-Narrative eines explorativen Zukunftsszenarios im Jahr 2045 sind in Abbildung 30 dargestellt.

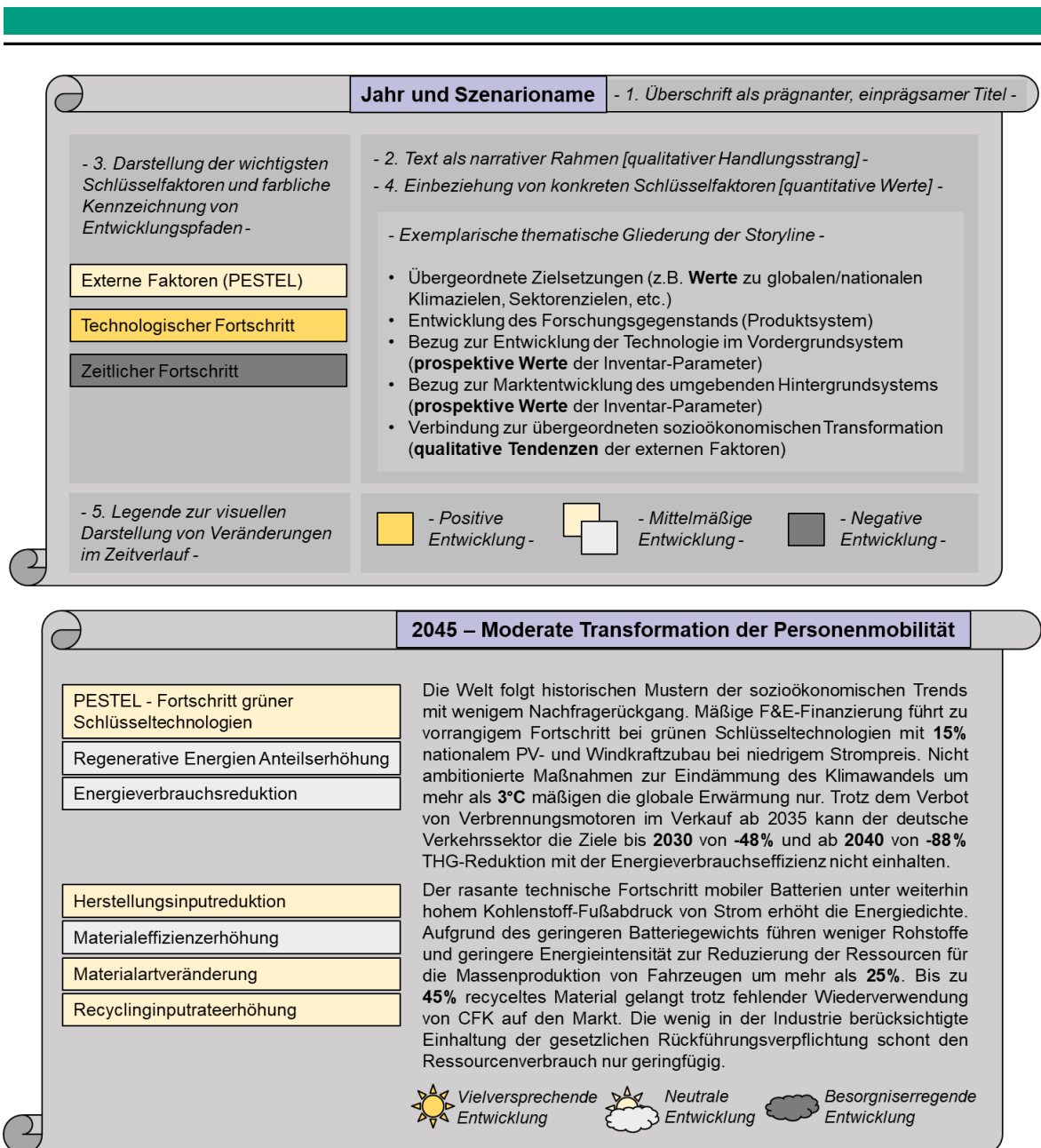


Abbildung 30 Vorgehensweise zur Erstellung einer Szenario-Narrative (oben) und Visualisierung einer exemplarischen Szenario-Narrative für einen entfernten Zukunftszustand (unten).

Die Szenario-Narrative fasst die quantifizierte Modellausbildung der Inventar-Parameter aus dem achten Schritt zusammen und integriert die qualitativ beschriebenen externen Hauptfaktoren als übergeordneter Kontext aus der ersten Stufe. Die Visualisierung der Narrative geschieht mittels einem aussagekräftigen Titel, einer überzeugenden Storyline, der Übersicht über Parameteränderungen sowie einer erklärenden Legende. Diese Kernelemente sind zu berücksichtigen, indem der kurze, prägnante und gut zu merkende Name des Szenarios von Schritt sieben zusammen mit dem Betrachtungszeitpunkt z.B. dem Marktetablierungsjahr als unterscheidbarer Titel der Narrative dient. Weiterhin ist die wichtigste Handlung der Zukunftsentwicklungen in einem Fließtext nachvollziehbar und konsistent zu erläutern, woraus sich die Storyline der Narrative als ein strukturiertes Grundgerüst entwickelt. Die Übersicht über die wichtigsten Schlüsselfaktoren und ihre jeweilige Ausprägung sollte einerseits qualitativ als farblich gekennzeichnete Bausteine und andererseits als quantitative Werte in die Storyline integriert werden. Die Farbkodierung der punktuell quantifizierten



---

Szenariobausteine ist abschließend in einer Legende übersichtlich zu differenzieren zwischen vielversprechender Zukunftsentwicklung bzw. nicht hinreichend ausgeschöpftem Verbesserungspotenzial der Schlüsselfaktoren. Aus diesen Kernelementen der Narrative lässt sich die Zukunftsentwicklung für das jeweilige Szenario konkretisieren, um diese wiederum von anderen Zukunftsszenarien und deren Narrative abzugrenzen und für Akteure rasch ersichtlich zu machen.

Die finalisierte Ergebnisgrafik von einer Narrative pro Zukunftsszenario bildet zusammen mit der Datenaufbereitungsstruktur des Parametermodifikationsverzeichnisses als zuvor dokumentierte Darstellung des Szenarioentwicklungsprozesses die Vorgehensweise und das Resultat der prospektiven Sachbilanz hinreichend ab für eine Grundlage zum Verständnis der im Nachgang erzeugten Umweltwirkungsergebnisse im Zukunftszustand gegenüber dem Referenzzustand. Zur Dokumentation für Ökobilanzierer dient das editierbare Parameterverzeichnis im fünften Dokumentationsblatt, das aus der Parameter-Modifizierung die Szenario-Narrative in Form einer graphischen Vorlage für eine Ergebnisgrafik bereitstellt und welches öffentlich zugänglich ist über die DOI <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1349> (Hanesch, 2024a). Die graphische Aufbereitung der pLCI-Resultate kann für die zweite Phase der Sachbilanz die Dokumentation im Ökobilanz-Bericht zielführend vervollständigen. Mit dieser lassen sich für Nutzer der Ökobilanz-Ergebnisse die Spezifikationen jedes Zukunftsszenarios übersichtlich kenntlich machen und gewährleisten eine Vergleichbarkeit zu anderen transparenten pLCA-Studien. Denn zur Übermittlung von inhärenten Unsicherheiten in der prospektiven Ökobilanzierung benötigen Entscheidungsträger für die erfolgreiche Anwendung hinreichend verständliche Resultate bezüglich der spezifischen Zukunftssituation, die mit der Szenario-Narrative kommuniziert werden kann. Folglich stellt die anschauliche Präsentation der pLCI-Ergebnisse den Abschluss der Sachbilanz auf Basis der drei Teile der Forschungsmethodik dieser Arbeit dar und kommuniziert die auf unsicherer Zukunftsentwicklung basierende Ökobilanz als Ergebnis-Transfer präzise an politische und wirtschaftliche Akteure.

## **6.6 Nachgelagerte Stufe der prospektiven Sachbilanz zur Bewertung von zukünftigen Verkehrsmitteln**

Zum Abschluss der prospektiven Sachbilanz als zweite Erweiterung der zweiten Phase der Ökobilanzierung können alle pLCI-Daten der zukunftsgerichteten Technologien auf Basis von berücksichtigtem Fortschritt passgenau aufbereitet werden. Die Umweltbewertung für den Zukunftszustand resultiert unter einer höheren Datenzuverlässigkeit mit hinreichender technologischer und zeitlicher Repräsentativität aufgrund der abgeschlossenen Marktreife und Zukunftsentwicklung. Das pLCI-Ergebnis des jeweiligen Zukunftsveränderungsmodells wird an die dritte Phase der Wirkungsabschätzung übermittelt, um iterativ pro Szenario und pro Fahrzeug die Umweltwirkungen zu erhalten. Die Umweltbewertung der quantifizierten Flüsse resultiert für jedes pLCI-Ergebnis in einem prospektiven Wirkungsabschätzungsprofil für die Ökobilanz im Zukunftszustand. Diese bilden die potenziellen Umweltwirkungen beispielsweise in einem bestimmten Marktetablierungsjahr für die Verkehrsmittel ab, in welchem mögliche Optimierungspotenziale der jeweiligen Technologie auf Basis von zukunftsgerichteten Annahmen mit inhärenten Unsicherheiten enthalten sind. Folglich kann die Wirkung des Szenarios mit der Wirkungsabschätzung ermittelt werden.

---

Diese potenziellen Umweltwirkungen sind in der vierten Phase der Auswertung hinsichtlich der Signifikanz abschließend zu beurteilen, um die Resultate daraufhin weiterführend zu vergleichen. Demnach kann die Strategie des Szenarios als eine Entscheidungsunterstützung mit der Auswertung und Vergleichsbewertung eingeschätzt werden. Die Ergebnisse aus den entwickelten Zukunftsszenarien offenbaren, verglichen mit dem Ergebnis aus dem Status Quo, die Auswirkungen von den modifizierten Parametern. Daher sind in den Markt gelangte TTS mit der in Entwicklung befindlichen TTS bzw. zukunftsveränderte CT mit der nicht-modifizierten CT gegenüberzustellen, um im internen Vergleich zur Zukunftsentwicklung die zukunftsveränderten Bestandteile aufzuzeigen und unsicheres Veränderungspotenzial zu interpretieren. Im externen Vergleich ist zur Ermittlung der ökologischen Vorteilhaftigkeit als vergleichende Aussage pro Zukunftsszenario die Umweltverträglichkeit des neuartigen zukünftigen Fahrzeugs mit dem konventionellen zukünftigen Fahrzeug gegenüberzustellen.

Weiterhin kann mit sektoralen Analysen die Bedeutung der Szenarien für unterschiedliche Wirtschaftsbereiche aufgezeigt werden (Kosow & Gaßner, 2008). Diese Analysen sind mit Sektorenzielsetzungen beispielsweise für den gesamten Verkehrssektor oder den gewählten Teilbereich anhand eines Benchmarkings von den erzeugten Umweltwirkungsergebnissen vergleichend umzusetzen. Für diese Gegenüberstellung kann es dienlich sein, den Zukunftszustand einer Transport-Transformationslösung mit dem Referenzzustand des konventionellen Transports zu vergleichen, wenn das Benchmarking mit einem Zukunftsziel unter Bezug auf einen prozentualen Ausgangswert durchgeführt werden soll, der mit dem CT im Status Quo hinreichend abgebildet wird. Demnach resultieren aus der pLCA nach der Umsetzung aller vier Phasen im Transfer Handlungsoptionen als Strategieableitung für zukünftige Maßnahmen hinsichtlich eines nachhaltigeren Fahrzeugtransports und sektorale Analysen mit Benchmarking zu Sektorenzielsetzungen, um den Erfolg der Maßnahmen in Bezug auf den Zielzustand einer nachhaltigen Mobilität zu messen.

## **6.7 Zusammenfassung von Kernelementen der prospektiven Sachbilanz für zukunftsgerichtete konventionelle bzw. neuartige Verkehrsmittel**

Das Vorgehen in diesem Kapitel zur Nachbildung von zukunftsgerichteten Verkehrsmitteln kann in den drei Stufen und neun Schritten von Abbildung 31 zusammengefasst werden, die eine Erweiterung der drei Stufen der standardisierten ex-post Sachbilanz von Kapitel 4 darstellen.

Für die Anwendung der Methode von Kapitel 6 ist für Ökobilanzierer zusammenzufassen, dass in den ersten drei Schritten von Stufe eins anhand gescanntem Parameter-Einfluss und verknüpften Wechselwirkungen selektive Parameter mit qualitativer Veränderungstendenz zu identifizieren sind. Daraufhin erfolgt in den nächsten drei Schritten von Stufe zwei auf Basis von Veränderungsursache, Veränderungsumsetzung und Entwicklungspfadausbildung die systematische Modifizierung zur Erarbeitung zukünftiger Parameter mit quantitativen Veränderungen in ggf. mehreren Ausprägungen. In den letzten drei Schritten von Stufe drei wird anhand der Entwicklung von konsistenten Zukunftsszenarien, der Modellintegration sowie der Unsicherheitskommunikation die Bestimmung des jeweiligen Zukunftsszenarios zur Nutzbarmachung für die Entscheidungsunterstützung umgesetzt.



Abbildung 31 Vorgehensweise für die dreistufige Durchführung der prospektiven Sachbilanz in neun Schritten von zukunftsgerichteten Verkehrsmitteln zur Entwicklung der Zukunftsveränderungsmodelle.

---

Die neun iterativen Schritte zur Durchführung der pLCI-Methode sind erstens das Scannen der Inventar-Parameter, zweitens das Scannen der externen Faktoren und drittens die Verknüpfung dieser mit dem LCI- bzw. eLCI-Modell in einem Kausalschleifendiagramm. Weiterhin sind viertens die Wahl des Modifikationszwecks von AP, UP und OP umzusetzen, fünftens auf Basis von Datenmodifikationstechniken und Flussmodifikation die konkreten Parameterveränderungen zu tätigen und sechstens die Zuordnung des Szenariotyps zu den erzeugten Parameter-Bündeln vorzunehmen. Abschließend erfolgt siebtens die Überprüfung auf konsistente Entwicklungspfade zur Kombination von finalisierten Zukunftsszenarien, achtens die Integration von allen modifizierten Inventar-Parametern in das jeweilige Fahrzeugmodell der LCI bzw. eLCI mit dem Resultat eines Zukunftsveränderungsmodells pro Szenario und Fahrzeug sowie neuntens die Kenntlichmachung des Zukunftsszenarios anhand einer spezifischen Szenario-Narrative.

Die prospektive Sachbilanz kann zum Abschluss des entwickelten Frameworks im dritten Methodenteil mit den modifizierten Parametern in verschiedenen Dokumentationsblättern und auf Basis einer schrittweisen Anleitung die Nachbildung von zukünftigen Technologien erreichen. Mit diesen prospektiven Daten erzeugen Ökobilanzierer Sachbilanz-Modelle von höherer Repräsentativität für einen zukünftigen Zustand, welcher einen abgeschlossenen Technologieentwicklungsprozess unter der Berücksichtigung von Zukunftsveränderungen abbildet. Aus diesem Vorgehen lassen sich konventionelle bzw. neuartige Verkehrsmittel anhand der entwickelten Zukunftsszenarien technologisch und zeitlich korrekt modellieren, woraus ein passgenauer Vergleich zwischen den Technologien ermöglicht wird, um zur Transformation des Verkehrssektors schon jetzt geeignete Handlungsmöglichkeiten aufzuzeigen. Mit diesen prospektiven Resultaten erhalten Entscheidungsträger nachvollziehbare Schlussfolgerungen und Empfehlungen auf Basis von potenziellen Umweltwirkungen. Der systematische und transparente Entwicklungsprozess dieser möglichen zukünftigen Umweltauswirkungen kann die Entscheidungsunterstützung verbessern, um den Klima- und Nachhaltigkeitszielen mit geeigneten klimaresilienten Maßnahmen für anthropogene Transportprozesse sukzessive näherzukommen und den Zielzustand einer nachhaltigen Mobilität langfristig zu erreichen.

---

## 7 Praktische Umsetzung des Frameworks für Ergebnisse zur Fallstudie von Kleinflugzeugen

---

### 7.1 Fallstudienbeschreibung des Projekts GNOSIS

Nach Darlegung der Methodik der Forschungsarbeit in den Kapiteln 4-6 wird aufbauend auf der Methodenentwicklung in diesem Kapitel die Methodenanwendung für das Framework in drei Methodenteilen vorgestellt. Die praktische Umsetzung der erweiterten Sachbilanz wird für die Fallstudie von zwei Transport-Transformationslösungen eines regionalen Kleinflugzeugs in einem nahen und entfernten Zeithorizont durchgeführt. Die in der Fallstudie zu untersuchenden TTS entstammen aus dem Flugzeugvorentwurf des Forschungsprojekts GNOSIS und sind für zwei unterschiedlich elektrifizierte Kleinflugzeuge mit einer möglichen Marktetablierung in den Jahren 2025 bzw. 2050 entwickelt worden. Für die Flugzeugentwürfe, die bis zum Projektende die technologische Machbarkeit erlangt haben, wurde auf die Fachexpertise interner wissenschaftlicher Experten der Bereiche Flugzeuge, Ökobilanzierung, Energie, Fahrzeuge und Kraftstoffe sowie externer praxisnaher Experten im Flugzeugbau zurückgegriffen. Die Zukunftsbetrachtung bildet einerseits eine kurzfristige, zu erwartende BAU Entwicklung und andererseits eine langfristige, differenzierte BETTER bzw. FASTER Entwicklung ab. Am Szenarioentwicklungsprozess waren 13 interne Experten unterschiedlicher Fachdisziplinen in einer Beratungsfunktion mit individuellen Befragungen und einem Expertenworkshop beteiligt.

Im Flugsektor existiert für die aktuelle Ausgangslage hinsichtlich der Umweltwirkungen eine große Distanz zum Zielzustand der nachhaltigen Mobilität. Zur Erreichung des Zielzustands werden für die Realisierung der Anforderungen an die Mobilität im Kurzstreckensegment in den Flugzeugentwürfen als Erweiterung oder Ersatz des konventionellen Antriebssystems neuartige Antriebssysteme erprobt. Als Lösungsvorschlag für den Verkehrssektor entstehen im Projekt aus der Technologieänderung zwei Transformationslösungen im Flugsektor von einem hybridelektrischen Flugzeug (HEA, hybrid electrical aircraft) und einem brennstoffzellenelektrischen Flugzeug (FCEA, fuel cell electrical aircraft) zur Erfüllung der gleichen Transportfunktion wie das konventionelle Flugzeug (CA, conventional aircraft), einer 19-Sitzer Beechcraft 1900D aus dem Jahr 2002. Die neuartigen Flugzeuge variieren im Grad der Elektrifizierung, da für die HEA nur der Rollvorgang auf dem Boden elektrifiziert abläuft, während für die FCEA eine vollelektrische Flugmission durchgeführt werden kann.

Die grundsätzliche Motivation des Forschungsprojekts GNOSIS und der durchzuführenden Umweltbewertung von den entwickelten Flugzeugentwürfen basiert auf den europäischen Sektorenzielsetzungen aus dem Flightpath 2050, um in Zukunft einen umweltverträglichen Luftverkehr zu ermöglichen (EU COM, 2011). Das Ziel der Fallstudie stellt den Vergleich des Personentransports in einem Kleinflugzeug dar unter den Vorgaben globaler Klima- und Nachhaltigkeitsziele und spezifischer Zielsetzungen im Flugsektor. Der Flugzeugvorentwurf der in Entwicklung befindlichen Technologien HEA und FCEA wird in den Reifegrad des Labormaßstabs von TRL 2 „Technologiekonzept formuliert“ eingeordnet und erhöht sich bis zum Abschluss des Projekts auf TRL 3 „Technologiekonzept nachgewiesen/demonstriert“; bis zum Marktetablierungsjahr 2025 der HEA und 2050 der FCEA sollen die neuartigen Flugzeuge TRL 9 „Ist-System flugerprobt durch erfolgreichen Missionsbetrieb“ erreicht haben (NASA, 2012). Die Rahmenbedingungen umfassen für den regionalen

---

Personentransport in den 19-Sitzer Flugzeugen eine Distanz von 476 km, für die eine Flugmission innerhalb der Grenzen Deutschlands durchzuführen ist.

Die Umweltbewertung im Projekt fokussiert sich auf die Ermittlung der Auswirkungen in den drei Wirkungsbereichen Klimawandel, Humangesundheit und Rohstoffnutzung, um die transportbedingten Umweltwirkungen der Produktsysteme anhand der drei Eckpfeiler der ökologischen Nachhaltigkeit zu evaluieren. Die ökobilanzielle Bewertung erfolgt auf Basis der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe2016 für die Wirkungskategorien Klimawandel, Photochemische Ozonbildung und Mineralischer Ressourcenverbrauch (Huijbregts et al., 2017). Der Zeithorizont der Ökobilanz besteht aus der Datensammlung für das Jahr 2002, dem letzten Fertigungsjahr der Beechcraft 1900D, der projektinternen Datengenerierung in den Jahren 2020 bis 2023, dem Modellierungszeitpunkt im Jahr 2023 und der prospektiven Datenmodifizierung zur Entwicklung der Zukunftsszenarien in den Jahren 2025 und 2050.

Aus Vollständigkeitsgründen wird für die Anwendung der dreigeteilten Sachbilanz in dieser Fallstudie auf den ausführlichen GNOSIS Ökobilanz-Bericht verwiesen. Der Bericht umfasst die vollständige vergleichende LCA-Studie für das 19-Sitzer Flugzeug CONV und die beiden elektrifizierten Varianten PTE und FCB, welche den Flugzeugen CA, HEA und FCEA der Fallstudie entsprechen. Der GNOSIS Ökobilanz-Bericht ist öffentlich zugänglich über die DOI <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1244.2> (Hanesch & Schebek, 2023). Die folgenden drei Unterkapitel zeigen wichtige Inhalte und Resultate dieser ökobilanziellen Untersuchung im Rahmen der Sachbilanz zur Anwendung des Frameworks der LCI, eLCI und pLCI. Für Einzeldarstellungen wird auf die entsprechenden Ausarbeitungen im GNOSIS Ökobilanz-Bericht hingewiesen.

## **7.2 Anwendung der standardisierten ex-post Sachbilanz zur Nachbildung des konventionellen Flugzeugs**

Das Vorgehen der ex-post Sachbilanz als standardisierte zweite Phase der Ökobilanzierung soll auf den Untersuchungsgegenstand eines Kleinflugzeugs angewendet werden. Dieses Produktsystem des CA wird als konventionelles 19-Sitzer Flugzeug zur Erfüllung der Transportfunktion *Regionaler Personentransport mit einem Kleinflugzeug* auf Grundlage der vorgestellten Methodik im ersten Teil des Frameworks untersucht und nachgebildet. Die Vorgehensweise umfasst die drei Stufen Vorbereitung der Datenerhebung, Datenerhebung sowie Datenberechnung und wird nachfolgend für das CA umgesetzt. Ziel der Durchführung ist die Ausbildung von einem parametrisierten Transportmodell für das konventionelle Flugzeug, aus dem eine Umweltbewertung im Referenzzustand erfolgen kann.

### **7.2.1 Erste Stufe zur Ausbildung der Modellstruktur des konventionellen Flugzeugs für die qualitative Beschreibung des Produktsystems**

Für die strukturelle Nachbildung im Transportmodell zeigt das Systemfließbild des CA in Abbildung 32 den Lebensweg des Kleinflugzeugs für den regionalen Personentransport in insgesamt dreizehn Prozessen, die in sieben Prozesse der Herstellungsphase, zwei Prozesse der Nutzenphase und vier Prozesse der Entsorgungsphase unterteilt sind. Diese enthalten diversifizierte Prozessmodule, für die alle Inputs und Outputs bestimmt werden müssen. Das technologische Antriebskonzept des konventionellen 19-Sitzer Flugzeugs beinhaltet als



wichtigste Spezifikationen zwei Gasturbinen, zwei Propeller und den Einsatz von Kerosin während allen Boden- und Flugbewegungen. Die Flugzeugbestandteile umfassen in den Herstellungsprozessen Konventioneller Antrieb, Propeller, Tragstruktur, Flugzeugsysteme und Kabinenausrüstung vielfältige Komponenten wie für die Tragstruktur die Prozessmodule Flügel, Rumpf, Höhenleitwerk, Seitenleitwerk, Fahrwerk, Triebwerkseinbau und Gondel. Die Flugzeugstruktur untergliedert sich in Kleinbauteile als Teilkomponenten wie im Prozess der Flugzeugsysteme Herstellung das Prozessmodul Flugzeuganlagen aus Steuerungsanlage, Instrumentenanlage, Hydraulische/Pneumatische Anlagen, Elektrische Anlage, Klimaanlage sowie Enteisungsanlage besteht. Zur Erstellung des parametrisierten Vordergrundsystems des CA aus Abbildung 32 und die Verknüpfung mit dem Hintergrundsystem wie vorgelagerte Rohstoffmärkte oder nachgelagerte Recyclingmärkte werden alle Komponenten in die zugeordneten Flüsse untergliedert. Für das Flugzeug des letzten Fertigungsjahres 2002 sind die wichtigsten Materialien der Tragstruktur die Rohstoffe Aluminium, Stahl und Titan (DIN 9020-5), zudem sind im CA Nickel, Kupfer, Kobalt sowie verschiedene Polymere eingesetzt.

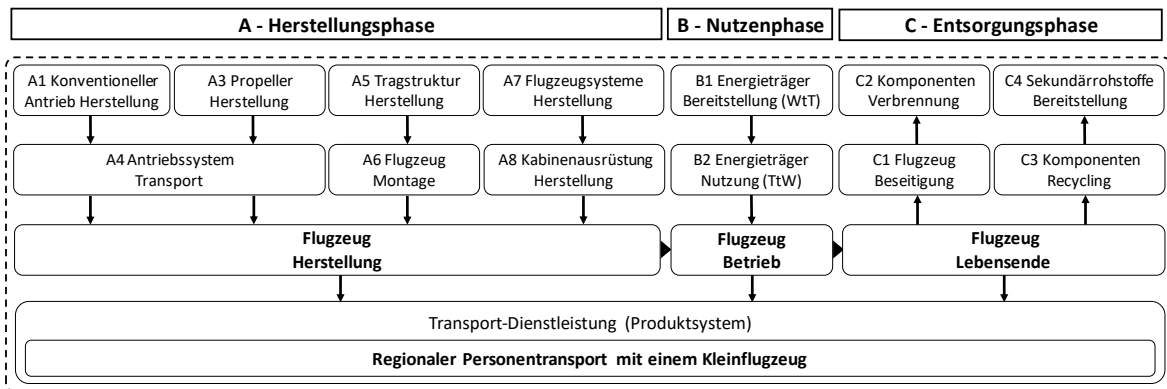


Abbildung 32 Systemflussbild des konventionellen Flugzeugs und den Prozessen über den Lebensweg.

Nach der Zuordnung der Flüsse wie Aluminium Bereitstellung zu den Prozessmodulen der einzelnen Prozesse müssen diese quantifiziert werden. Zur Vorbereitung der Datenerhebung sind relevante Parameter zu definieren, um Parameterbeziehungen herzustellen und darüber eine minimale Menge an Daten aufzunehmen. Die Standard-Parameter des CA sind u.a. Komponentenmasse und Komponentenmaterialverteilung, die zusammen mit weiteren relevanten Parametern für die FU und den Lebensweg in Anhang B4 aufgelistet sind. Das ausgefüllte Parameterverzeichnis der Standard-Parameter für das CA wird zur Bearbeitung der eLCI benötigt und dient der späteren Datenübernahme für die beiden TTS.

### 7.2.2 Zweite Stufe zur Generierung von Daten lebenswegbezogener Prozesse für die quantitative Datenbeschaffung im Referenzzustand

Für die Prozessmodule des komplexen Produktsystems des CA aus dem Jahr 2002 sind vielfältige quantitative Daten für die Produkt- und Elementarflüsse des Transportmodells zu beschaffen. Die Sammlung lebenswegbezogener Informationen für die Beechcraft 1900D inklusive der Generierung fehlender Daten ist in der Datengenerierungsliste von Tabelle 26 mit der Zuordnung der Datengenerierungstechniken zu den Prozessen des konventionellen Flugzeugs zusammengefasst.

Tabelle 26 Datengenerierungsliste zur Nachbildung des konventionellen Flugzeugs über den Lebensweg.

Datengenerierungstechniken	Prozess	Bezug Produktsystem	Umsetzungsinformationen
Simulation	A1	Getriebe, Gasturbine, Auspuff, Welle, Struktur	Modellierungs-Software GasTurb
	A1, A3, A5, A7, A8	Komponentenanzahl und -gewicht	Modellierungs-Software MICADO/UNICADO
Veröffentlichte Messung	B1	Kerosinmenge für Beechcraft 1900D	Emissionshandbuch der Luftfahrt
	B2	Emissionen zu Reiseflug /LTO Motorverbrennung	Emissionshandbuch der Luftfahrt
Datenbank	A1 – C4	Hintergrundsystem Datensatz-Verknüpfung	Produkt-/Elementarflüsse in ecoinvent v3.8 Datenbank
Produkthandbuch	A1 – A8	Übergeordnete Fahrzeugstruktur	Komponentenauflistung, illustrierter Teilekatalog
Interne auswertbare Information	A8	Kabinenausrüstung (Aufbau Wände, Böden, Einrichtung, Notsystem)	Materialzusammensetzung aus Regierungsdokument zur Brandprävention
	A4	Gasturbine, Propeller	Standort und Transportweg
Expertenabschätzung	A5	Flügel, Rumpf, Höhen-/Seitenleitwerk, Gondel, Triebwerk, Fahrwerk	Materialzusammensetzung aus Prozentwert-Ermittlung mittels Daten und Expertise
Literaturwert	A7	Elektrische, Steuerungs-/Instrumentenanlage	Materialzusammensetzung aus Referenzstudien
	C1 – C4	Trennen, Verbrennung, Recycling/Bereitstellung	Energie und Recyclingquote aus Referenzstudien
Geometrische Berechnung	A3	Propellerbestandteile	Bauteilzeichnung zu Dichte-/Volumenermittlung
Hochskalierte Teilberechnung	A6	Thermische/elektrische Energie Flugzeugbau	Fertigungsprozess Flügel im Detail nachgebildet, skaliert
Eigene Schätzung	A1 – A8	Flugzeuglackierung, Brandschutz, Treibstoffsystem, Zapfluftanlage	Abschätzungen zu Menge und Zusammensetzung
Vernachlässigung	A1 – C4	Geringer Einsatz von Material, Prozessenergie	-

Auf Basis der umgesetzten Datengenerierungstechniken für das konventionelle Flugzeug erfolgt eine Kurzbeschreibung der beschafften Daten. Die Datenaufnahme basiert im Detail auf der bis 2002 real gefertigten Beechcraft 1900D und umfasst über deren Lebensweg alle vorhandenen Informationen als Primärdaten sowie weitere ergänzende Sekundärdaten. Die Zusammensetzung beispielsweise der Tragstruktur wie dem Flügel ist Bauteilzeichnungen des illustrierten Teilekatalogs zu entnehmen (Textron Aviation, 2019), Informationen zu den technischen Systemen sind in der Herstellersystembeschreibung enthalten (Ratheon Aircraft, 2000). Die Transportwege ließen sich mit Daten für den internationalen Versand (Hawker Beechcraft, 2008a) oder Inlandsversand (Hawker Beechcraft, 2008b) als straßenbasierter Transport zum Fertigungsstandort Wichita nachbilden und auf den veränderten Standort Deutschland übertragen. Die Werte zu den durchschnittlichen Verbrennungsemissionen von THG und Luftschadstoffen in den Betriebsphasen Rollen, Abflug und Anflug des LTO-Zyklus sowie Reiseflug wurden mit einem Luftfahrthandbuch anhand des Kraftstoffbedarfs der

Durchschnittsflugmission von 476 km erzeugt (EMEP/EEA, 2019). Zum Lebensende, das für das CA nach den in der LCA festgelegten 20 Jahren Lebensdauer im Jahr 2022 eingetreten ist, werden aus einer Fallstudie, die Recyclingaktivitäten von Flugzeugherstellern in Wichita evaluiert, die Weiterverarbeitung von 20% der eingesetzten Rohstoffe und Energieeinsätze zur Demontage verschiedener Rohstoffe entnommen (Asmatulu et al., 2013a). Aus dieser Beschaffung der Primärdaten und der Ergänzung um Daten wie den Komponentengewichten aus der Modellierungs-Software MICADO/UNICADO von den Projektpartnern der RWTH Aachen kann das konventionelle Flugzeug als vollständiges Modell ausgebildet werden.

Das aus allen Daten abschließend quantifizierte Modell des CA im Jahr 2002 berücksichtigt 4.283,5 kg Modellmasse, mit Flugzeiglackierung und vernachlässigter Betriebsausrüstung entstehen 4.630,0 kg Gesamtgewicht. Da die Beechcraft 1900D eine Gesamtfahrzeugmasse bis zu 4.919,0 kg besitzt, ließ sich 6% der Masse nicht nachbilden. Die Modellfahrzeugmasse setzt sich zusammen aus 568,5 kg Antriebssystem, 2.465 kg Tragstruktur und 1.250 kg Standardausrüstung, zudem wird über die 476 km Flugmission eine Energieträgermasse von 412,5 kg Kerosin benötigt. Für die Fallstudie wird ein exemplarisches Datenerhebungsblatt des CA in Tabelle 27 zur Herstellung des konventionellen Antriebs anhand dem Getriebe, zwei Gasturbinen und deren Flugzeugeinbau als Teil des Antriebssystems abgebildet.

Tabelle 27 Datenerhebungsblatt für die Lebensweg-Prozesse des CA zur Konventioneller Antrieb Herstellung.

<b>Datenerhebungsblatt CA: Prozess A1 - Konventioneller Antrieb Herstellung</b>				
Gesamtgewicht: 448,66 kg				
Anzahl: 1 Stück				
<b>Prozessmodul Name</b>	<b>Modulmasse (in kg)</b>	<b>Teilkomponente Name</b>	<b>Datensatz Zuordnung</b>	<b>Materialverteilung (in %)</b>
Getriebe	145,37	Getriebe	Stahl	1
Gasturbine Verdichter	83,00	1. Stufe Rotor Blik	Titan	0,128
		2.-4. Stufe Rotor Blik	Chrom-Stahl	0,4
		1.-4. Stufe Schaufeln	Chrom-Stahl	0,079
		Zentrifugalkompressor	Titan	0,252
		Gehäuse	Chrom-Stahl	0,141
Gasturbine Brennkammer	85,69	Einspritzdüsen	Kobalt	0,079
		Dome	Nickel	0,013
		Flammrohr	Nickel-Legierung	0,26
		Gehäuse	Nickel-Legierung	0,648
Gasturbine Hochdruckturbine	17,05	Scheibe	Nickel-Legierung	0,632
		Rotor Schaufeln	Nickel-Legierung	0,135
		Stator Schaufeln	Nickel-Legierung	0,042
		Gehäuse	Nickel-Legierung	0,191
Gasturbine Freie Nutzturbine	43,97	Scheibe	Nickel-Legierung	0,284
		Rotor Schaufeln	Nickel-Legierung	0,413
		Stator Schaufeln	Nickel-Legierung	0,196
		Gehäuse	Nickel-Legierung	0,107
Auspuff, Welle, Struktur	73,58	Auspuff	Nickel-Legierung	0,13
		Welle	Stahl	0,291
		Struktur 1	Aluminium	0,289
		Struktur 2	Stahl	0,145
		Struktur 3	Nickel-Legierung	0,145

---

Alle einzubeziehenden Daten der lebenswegbezogenen Prozessmodule sind im Ökobilanz-Bericht in Kapitel 3.2.1 im Detail beschrieben, die vollständigen Datenerhebungsblätter für die ex-post Sachbilanz des konventionellen Flugzeugs sind in Anhang 1-8 des Berichts dargestellt sowie die vollständige Datengenerierungsliste inklusive der Referenzen für alle Prozesse in Anhang 9 und 10 des Berichts dokumentiert, weiterhin kann die Datensatz-Flussliste über den kompletten Lebensweg des CA aus Anhang 36 und 37 des Berichts entnommen werden (Hanesch & Schebek, 2023).

### **7.2.3 Dritte Stufe zur Nachbildung des konventionellen Flugzeugs im Transportmodell für die Berechnung der Flüsse des Fahrzeugtransports**

Nach der strukturellen Modellausbildung und quantitativen Datenerfassung lässt sich das Transportmodell des konventionellen Flugzeugs quantifizieren. Aus den verrechneten Prozessmodulen ergibt sich, dass zu einem großen Anteil das Material Aluminium in den Flugzeugbestandteilen eingesetzt wird. Während im Prozess Flugzeugsysteme Herstellung die Flugzeuganlagen zu Zweidrittel daraus bestehen, entfallen im Prozess Tragstruktur Herstellung für den Flügel 90% und für Rumpf, Höhen- sowie Seitenleitwerk 94% auf das Material. Insgesamt sind für die Flugzeug Herstellung in der ersten Lebensphase 62,5% Aluminium enthalten, das einer Gesamtmenge von 2.678,2 kg entspricht. Zum Lebensende werden davon 20% recycelt, wobei durch einen qualitätsbedingten Korrekturfaktor 19,8% Sekundäraluminium zu 530,8 kg der Kreislaufwirtschaft erneut zugeführt werden. Weiterhin haben die Flüsse Stahl Bereitstellung mit 10,1% und Chrom-Stahl Bereitstellung mit 12% sowie Titan Bereitstellung mit 4,3%, welches zu den kritischen Rohstoffen gezählt wird, und Nickel-Legierung Bereitstellung mit 3,7%, welche zu dem Rohstoff Nickel zugehörig ist, einen großen Anteil am Gesamtergebnis. Für den Flugzeug Betrieb beträgt der Fluss Kerosin Bereitstellung 5.197.500 kg zum Energieträgereinsatz über den Lebensweg von 20 Jahren.

Aus der Berechnung von den Prozessmodulen, Prozessen und Lebensphasen ergeben sich die Flusswerte für den gesamten Lebensweg des CA, die nach der Zusammenfassung auf die FU von einem Personenkilometer zu normieren sind. Das Transportmodell des konventionellen Flugzeugs mit allen Prozessmodulen und deren Berechnungsverfahren ist in den ersten sechs Datenblättern einer Excel-Datei für die GNOSIS Flugzeugmodelle dokumentiert, welche öffentlich zugänglich ist über die DOI <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1350> (Hanesch, 2024b). Im Transportmodell wird der komplette Lebensweg des CA zur Modellgenerierung der LCI abgebildet, zudem werden bereits alle Zukunftsveränderungsmodelle für das konventionelle Flugzeug dargestellt, welche in der pLCI entstehen. Diese müssen in Übereinstimmung mit der Zukunftsentwicklung bis zu den Marktetablierungsjahren 2025 und 2050 der zwei elektrifizierten Flugzeuge stehen, die in der eLCI generiert und in der pLCI modifiziert werden.

Als Ergebnis des Transportmodells im Rahmen der umgesetzten ex-post Sachbilanz ergibt sich ein Gesamtflussinventar, das alle aggregierten Flüsse des komplexen Produktsystems enthält. Das Gesamtflussinventar für das CA als LCI-Ergebnis wird in Anhang B11 dargestellt und ist bereits den pLCI-Ergebnissen der Zukunftsveränderungsmodelle gegenübergestellt. Datensätze wie der Fluss Polymere Recycling oder Flüsse, die nur für die TTS relevant sind, werden für das CA im Jahr 2002 nicht berücksichtigt, alle weiteren Flusswerte sind mit den Parametern der FU von 20 Jahren Flugzeuglebensdauer, durchschnittlich 14 transportierten

---

Passagieren und 299.880 km Jahresflugleistung heruntergerechnet. Die erste Spalte des CA 2002 mit den finalisierten Werten der Input- und Outputflüsse für den Transport von einem Personenkilometer stellt das LCI-Ergebnis zum Modellierungszeitpunkt im Jahr 2023 für den Referenzzustand dar. Diese quantifizierten Produkt- und Elementarflüsse, die sich auf die Biosphärenflüsse aus der bzw. in die Technosphäre zurückführen lassen, umfassen die vollständige Sachbilanz des CA, aus welcher die Umweltwirkungen unter Rückgriff auf Ökobilanz-Software ermittelt werden können, um die Auswirkungen des Flugzeugtransports auf die Umwelt zu erhalten.

### **7.3 Anwendung der erweiterten ex-ante Sachbilanz zur Nachbildung der zwei elektrifizierten Flugzeuge**

Das Vorgehen der ex-ante Sachbilanz für die erste Erweiterung der standardisierten zweiten Phase der Ökobilanzierung soll auf den Untersuchungsgegenstand von zwei elektrifizierten Kleinflugzeugen angewendet werden. Diese Produktsysteme der Transformationslösungen im Flugsektor von einerseits HEA als hybridelektrisches 19-Sitzer Flugzeug und andererseits FCEA als brennstoffzellenelektrisches 19-Sitzer Flugzeug werden wiederum zur Erfüllung der Transportfunktion *Regionaler Personentransport mit einem elektrifizierten Kleinflugzeug* im Rahmen der vorgestellten Methodik im zweiten Teil des Frameworks untersucht und nachgebildet. Die Vorgehensweise umfasst die drei Stufen Neue Parameter Identifizierung, Vollständige Parameter Erarbeitung sowie Produktsystem Bestimmung und wird für die HEA und die FCEA nachfolgend umgesetzt. Ziel der Durchführung ist die Ausbildung von zwei Transformationsmodellen für die zwei neuartigen Flugzeuge auf Basis des parametrisierten Transportmodells des CA, die ebenfalls zur Umweltbewertung im Referenzzustand dienen.

#### **7.3.1 Vorgelagerte Stufe der ex-ante Sachbilanz zur Klassifizierung der zwei elektrifizierten Flugzeuge**

Für das Ziel einer möglichen Substitution des CA mit den beiden TTS sind die neuartigen Flugzeuge in ihren Spezifikationen zu präzisieren und die technologische Veränderung zu bestimmen. Der Mobilitätstyp stellt Kleinflugzeuge dar, die als Mobilitätszweck in gleicher Weise die Kurzstrecke im Nationalverkehr für den Personenflugtransport realisieren können, sodass die FU von einem pkm gegenüber dem CA mit einer Flugmission von 476 km in den elektrifizierten 19-Sitzer Flugzeugen bestehen bleibt. Der Flugzeugvorentwurf von HEA und FCEA basiert auf dem Flugzeugmodell des CA und wird in den Unterschieden in einer ersten übersichtlichen Gegenüberstellung für die Vergleichs-Parameter der zwei elektrifizierten Flugzeuge jeweils gegenüber der Vergleichstechnologie in je einem Datenblatt festgehalten. Die aufgelisteten Festlegungen befinden sich in Anhang B5 und B6.

Der Transformationstyp beinhaltet je eine große Transformationsintensität gegenüber dem konventionellen Flugzeug, da eine Formänderung der elektrifizierten Flugzeuge erfolgt. Die Energienutzungsveränderung für Energieträger-, Antriebssystem- und Tragstrukturwechsel basiert auf den eingesetzten Energieträgern Kerosin und Strom für die HEA und Wasserstoff und Strom für die FCEA. Beide Entwürfe haben zur Technologiereife die Stufe TRL 3 und folglich technologische Machbarkeit erreicht und sollen im Anschluss an die eLCI im Rahmen einer Zukunftsbetrachtung für das jeweilige Marktetablierungsjahr im industriellen Maßstab

mittels Upscaling nachgebildet werden. Der zeitliche Zustand des Referenzzustands im Jahr 2023 entspricht dem Modellierungszeitpunkt des CA, für differenzierte Zukunftszustände sollen im Anschluss Modelle für das hybridelektrische Flugzeug mit prädiktiver Entwicklung bis 2025 und für das brennstoffzellenelektrische Flugzeug mit explorativer Entwicklung bis 2050 erzeugt werden. Die technologischen Veränderungen der Flugzeuge werden zunächst in der Modellstruktur qualitativ ausgebildet, um innerhalb der eLCI zu den vollständigen Transformationsmodellen zu gelangen.

### 7.3.2 Erste Stufe zur Ausbildung der veränderten Modellstruktur der zwei elektrifizierten Flugzeuge gegenüber dem konventionellen Flugzeug

Die neue Struktur der beiden Transformationsmodelle soll anhand des Technologiewechsels mit veränderten Prozessen und zusätzlichen Parametern im Modell übersichtlich dargestellt werden. Abbildung 33 zeigt die graphisch veränderten Systemfließbilder von HEA und FCEA, die sich in die grau markierte identische Prozessstruktur zum Vergleichsflugzeug und in die blau markierten transformierten Bestandteile als strukturelle Veränderungen im Modell differenzieren. Die HEA basiert auf 14 und die FCEA auf zwölf Prozessen, die sich in neu hinzugekommene Prozesse wie Elektrischer Antrieb Herstellung, veränderte Prozesse wie Tragstruktur Herstellung oder weggelassene Prozesse wie Energieträger Nutzung vom Produktsystem des konventionellen 19-Sitzer Flugzeugs abgrenzen lassen.

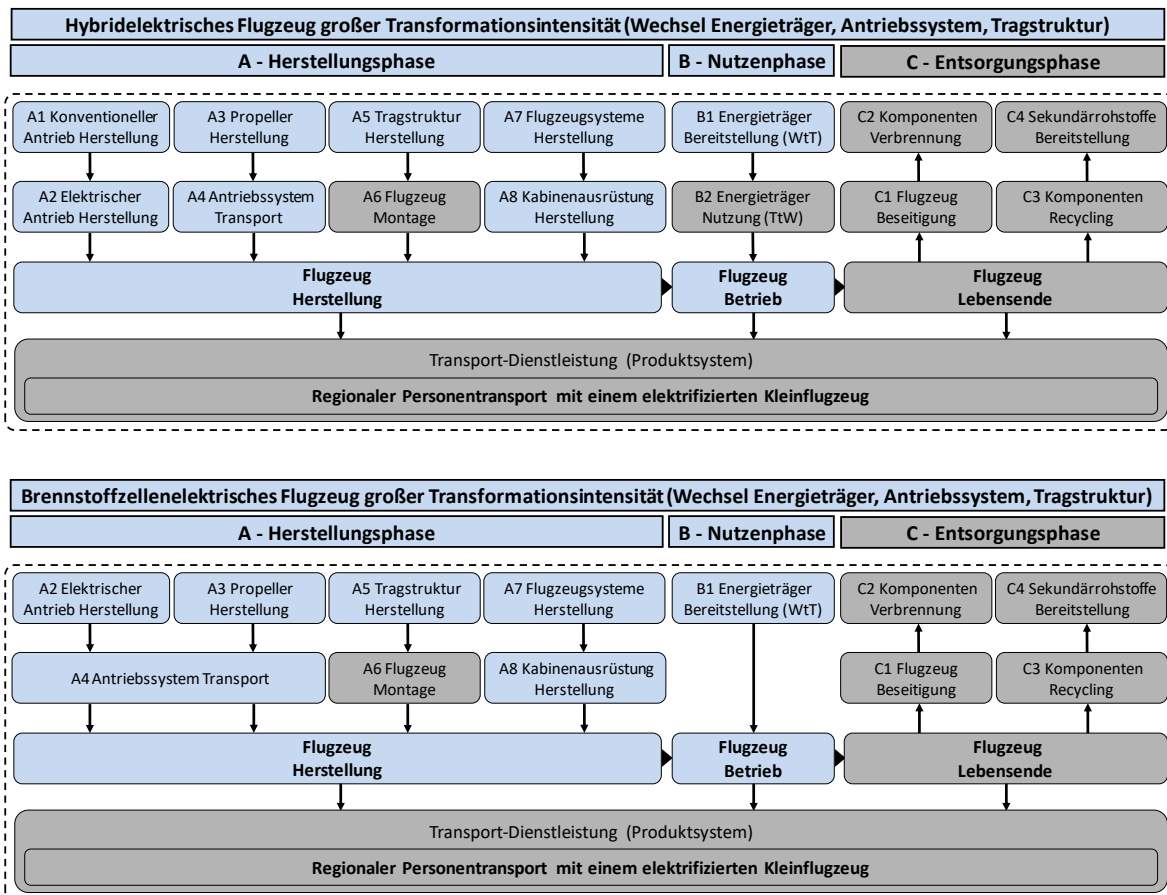


Abbildung 33 Veränderte zwei Systemfließbilder der elektrifizierten Flugzeuge HEA (oben) und FCEA (unten) mit den blau markierten veränderten und grau markierten gleichgebliebenen Prozessen über den Lebensweg.



---

Die veränderten Prozesse enthalten erweiterte oder reduzierte Prozessmodule, mit denen die Modelle der TTS anzupassen sind. Für diese technologischen Veränderungen des ersten Veränderungslevels können zusätzliche Inputs und Outputs entstehen. Neben den kritischen Rohstoffen Titan und Kobalt im konventionellen Flugzeug, die für die EU zu einem künftigen Versorgungsrisiko führen können, kommen durch die Schlüsseltechnologien Elektromotor, Batterie und Brennstoffzelle die kritischen Rohstoffe Neodym, Lithium und Graphit hinzu, welche in den neuartigen Flugzeugen mit Inputflüssen zur Bereitstellung der Rohstoffe zu berücksichtigen sind, aufgrund niedrigen Recyclingquoten und fehlenden Outputflüssen werden diese geringen Rohstoffmengen dem Fluss Edelmetalle Recycling zugeordnet (EU COM, 2020). Das technologische Antriebskonzept der konkreten TTS-Variante HEA bildet sich aus zwei Gasturbinen, zwei Elektromotoren und vier Propellern sowie dem Einsatz von Strom für den Bodenbetrieb und Kerosin für den Flugbetrieb. Die konkrete TTS-Variante FCEA umfasst als technologische Spezifikationen zwei Brennstoffzellen, eine Batterie, vier Elektromotoren und vier Propeller sowie einen dauerhaften Einsatz von Strom und Flüssigwasserstoff (LH<sub>2</sub>, liquid hydrogen) während den Boden- und Flugbewegungen.

Der Transformationstyp von großer Veränderungsintensität u.a. zwecks Tragstrukturwechsel ist für beide Flugzeugmodelle in die Transportmodellstruktur des CA zu integrieren. Die angepassten Bestandteile für den Antriebssystemwechsel der Flugzeuge beinhalten im Prozess Elektrischer Antrieb Herstellung neue Komponenten der HEA wie Elektromotor, Generator, Gleichrichter, Wechselrichter sowie Getriebe und veränderte Komponenten in den Prozessen Konventioneller Antrieb bzw. Propeller Herstellung sowie neue Komponenten der FCEA wie Elektromotor, Wechselrichter, Batterie, Brennstoffzelle, Verdichter, Wärmetauscher, Flüssigwasserstofftank sowie Getriebe und veränderte Propeller. Für den rein elektrischen Betrieb der FCEA aufgrund des Energieträgerwechsels entstehen keine Verbrennungsemissionen aus der Kerosinnutzung, sodass die Umweltwirkungen in der Nutzenphase des Flugzeugs lediglich aus den Vorketten der Energieträgerbereitstellung von Wasserstoff und Strom entstehen. Weiterhin berücksichtigt der Tragstrukturwechsel für die HEA Veränderungen zu innovativen Materialien wie Flugzeugsitze aus CFK statt Stahl sowie eine geänderte Bauteilanordnung und Dimensionierung von Flugzeugrumpf und Flügel als Hochdecker. Durch zeitliche Änderungen zum CA im Jahr 2002 wird bereits eine Reduktion von Komponentenmasse und Energieträgereinsatz im Flugzeugvorentwurf vorgenommen. Die FCEA beinhaltet dieselben technologischen Veränderungen gegenüber dem CA sowie größere Reduktionen von 25% Komponentenmasse aufgrund neuer Fertigungsverfahren in Verbundbauweise aus CFK statt Aluminium in Prozessmodulen der Tragstruktur und von 33% Energieträgereinsatz aufgrund des zeitlich späteren Marktetablierungsjahres in 2050.

Für die neuartigen Produktsysteme sind vielfältige zusätzliche Parameter notwendig wie Elektrischer Fahranteil, Ladezyklen Anzahl der Batterie oder Materialsubstitutionsmenge, für die neue Daten zu beschaffen sind. Die Identifizierung neuer Parameter zur Erzeugung zusätzlicher Bestandteile als Transformations-Parameter und veränderter Bestandteile als Standard-Parameter ist pro TTS zur Modellerweiterung zu dokumentieren. Viele Parameter können bereits von den Standard-Parametern des CA aus Anhang B4 übernommen werden wie im Prozess Flugzeug Montage oder zum Lebensende des Flugzeugs. Strukturell bleiben sie bestehen und teilweise können mittels Parameterbeziehungen wertbasierte Übernahmen wie von funktioneller Einheit und Entsorgungsphase des CA erfolgen, woraus die effizientere Datenbeschaffung nur für veränderte Bestandteile ermöglicht wird. Die Standard-Parameter

und Transformations-Parameter aus dem Parameterverzeichnis sind für die HEA und FCEA in zwei Datenblättern von Anhang B7 und B8 zusammengefasst. Sie erleichtern einerseits die nachgelagerte Datenbeschaffung, da nur für zusätzliche und veränderte Bestandteile neue Daten zu generieren sind und dienen andererseits als Vergleichsmetrik zwischen nicht-modifizierten Daten der retrospektiven LCA und modifizierten Daten der prospektiven LCA.

### 7.3.3 Zweite Stufe zur Generierung von Daten für alle neuen und veränderten Lebenswegprozesse im Referenzzustand

Die quantitative Erfassung aller Input- und Outputflüsse über den Lebensweg der neuartigen Flugzeuge erfolgt mit einer Datenerhebung zu allen veränderten, übernommenen und hinzugefügten Bestandteilen, um HEA und FCEA vollständig nachzubilden. Die erweiterte Sammlung lebenswegbezogener Informationen für die zwei Varianten der Beechcraft 1900D ist in der Datengenerierungsliste von Tabelle 28 mit vielfältigen zu den Prozessen der elektrifizierten Flugzeuge zugeordneten Datengenerierungstechniken zusammengefasst.

Tabelle 28 Datengenerierungsliste zur Nachbildung der beiden neuartigen Flugzeuge über den Lebensweg.

Datengenerierungstechniken	Prozess	Bezug Produktsystem	Umsetzungsinformationen
Simulation	A1, A2, A3, A8	Komponentenanzahl und -gewicht	Modellierungs-Software MICADO/UNICADO
	A7	Gewicht von Systemen, Batterie	Modellierungs-Software MICADO/UNICADO
	B1	Energieträgermenge	Modellierungs-Software MICADO/UNICADO
Datenbank	A2	Zusammensetzung neue Komponenten im Antrieb	Produktflüsse in ecoinvent v3.8 Datenbank
	A1 – C4	Hintergrundsystem Datensatz-Verknüpfung	Produkt-/Elementarflüsse in ecoinvent v3.8 Datenbank
Expertenabschätzung	A5	Flügel, Rumpf, Höhen-/Seitenleitwerk, Gondel, Triebwerk, Fahrwerk	Materialzusammensetzung aus Prozentwert-Ermittlung mittels Daten und Expertise
Literaturwert	B1	Bereitstellung flüssiger Wasserstoff	Daten zu Herstellungspfad und Verflüssigung
	A2	Zusammensetzung neue Komponenten im Antrieb	Informationen für neue Datensätze von Produkten
Eigene Schätzung	A1 – A8	Lackierung, Elektrischer Antrieb Transport	Abschätzungen zu Menge, Standort und Transportweg
Vernachlässigung	A1 – C4	Geringer Einsatz von Material, Prozessenergie	-
Datenübernahme Vergleichstechnologie	A1 – A8	Übergeordnete Fahrzeugstruktur	Komponenten, Mengen, Materialzusammensetzung
	A4	Konventioneller Antrieb und Propeller Transport	Standort und Transportweg
	A6	Thermische/elektrische Energie im Flugzeugbau	Skalierung Energiebedarf zu Fertigung neuer Flugzeuge
	B2	Kerosinverbrennung	Verbrennungsemissionen
	C1 – C4	Trennen, Verbrennung, Recycling/Bereitstellung	Verwertungsverteilungen zum Lebensende

---

Von neun ab dem Labormaßstab nutzbaren Datengenerierungstechniken wurden für die Quantifizierung des Flugzeugvorentwurfs von HEA und FCEA zum Großteil die Techniken Simulation und Datenübernahme Vergleichstechnologie genutzt. Für vollständige Modelle enthält die Dokumentation der Beschaffung quantitativer Werte neben erstens der Auflistung von vorhandenen Daten der TTS aus der Simulation wie Anzahl und Gewicht von vielfältigen Komponenten in den Prozessen der ersten und zweiten Lebensphase sowie zweitens der Auswahl von Stellvertreterdaten des CA als Wertübernahmen für gleiche Standard-Parameter drittens die Wertgenerierungen für alle fehlenden Daten wie fehlende veränderte Standard-Parameter und neue Transformations-Parameter. Die zusätzlich generierten Informationen umfassen u.a. neue Daten für die Prozesse Elektrischer Antrieb Herstellung bzw. Energieträger Bereitstellung, neue Transportwege für den elektrischen Antrieb und veränderte Daten für die geänderte Materialzusammensetzung in der Tragstruktur.

Die Kurzbeschreibung der beschafften Daten für die neuartigen Flugzeuge fokussiert auf die veränderten Bestandteile des Transformationstyps, die sich vom Lebensweg der Beechcraft 1900D unterscheiden. Für die technologieveränderten Daten aller Prozessmodule aus dem Wechsel von Energieträger, Antriebssystem und Tragstruktur resultieren verschiedene Neuerungen am Flugzeugentwurf. Beispielsweise entstehen aus den zwei Propellern des Turboprop-Antriebs der Beechcraft 1900D verteilte Antriebe von je einem Hauptpropeller nahe des Rumpfes und einem Nebenpropeller an der Flügelspitze sowie einer neuen Dimensionierung der Flügel als Hochdecker. Für die Herstellung des Flugzeugs werden alle veränderten und neuen Komponenten in Anzahl und Gewicht aus Simulationen im Flugzeugvorentwurf auf Basis der Modellierungs-Software MICADO/UNICADO generiert. Die Materialzusammensetzung basiert für vorhandene Prozesse auf den beschafften Daten des CA bzw. auf Berechnungen von projektbeteiligten Luftfahrtingenieuren sowie für den Prozess Elektrischer Antrieb Herstellung größtenteils auf Produktdatensätzen der Datenbankecoinvent (Wernet et al., 2016). Zwecks nicht vorhandener realer Daten zu Transport und Fertigung der Flugzeuge wird auf Stellvertreterdaten des konventionellen Flugzeugs zurückgegriffen, woraus die Zuverlässigkeit der Daten sinkt, jedoch für HEA und FCEA vollständige Produktsysteme entstehen. Die Mengen der Energieträger Kerosin, Strom und Wasserstoff entstammen aus MICADO/UNICADO, während deren Vorketten wie die aktuelle Stromerzeugung in Deutschland den veröffentlichten Daten zum Strommix (Fraunhofer ISE, 2022), die netzstrombasierte Elektrolyse der Wasserstoffherstellung aus Informationen des Ffe Open Data Portals (Ffe, 2020) sowie die Wasserstoffverflüssigung der Projektstudie (Strathoff et al., 2022) entnommen werden. Das Lebensende der elektrifizierten Flugzeuge basiert auf den beschafften Daten des CA, jedoch erreichen die elektrischen Komponenten teilweise ein sehr frühes Lebensende, sodass beispielsweise die Elektromotoren nach 6.000 Flugstunden ausgetauscht und den Verwertungswegen zugeführt werden müssen (Pipistrel, 2017). Trotz zeitlichem Unterschied zu dem Fertigungsjahr der Beechcraft 1900D und anderer Flugzeugmaterialverteilung erhalten die eLCI-Modelle von HEA und FCEA für die Beseitigung, die Verbrennung, das Recycling sowie die Sekundärrohstoffbereitstellung dieselben quantitativen Verteilungen wie das CA.

Aus den generierten Daten kann mit der Erarbeitung vollständiger quantifizierter Parameter trotz vielen fehlenden Primärdaten die lebenswegbezogene Nachbildung der neuartigen Flugzeuge ermöglicht werden. Das Modell der HEA berücksichtigt 4.623,1 kg Modellmasse mit 441,5 kg zusätzlicher Austauschmasse und umfasst 979,4 kg Antriebssystem, 2.351,3 kg

---

Tragstruktur und 1.292,4 kg Standardausrüstung, zudem sind über die 476 km Flugmission eine Energieträgermasse von 290,9 kg Kerosin und 7,6 kWh Strom im Einsatz. Dagegen enthält das quantifizierte Modell der FCEA 6.054,0 kg Modellmasse mit 22.507,6 kg zusätzlicher Austauschmasse und bildet sich aus 2.722 kg Antriebssystem, 2.089,7 kg Tragstruktur und 1.242,3 kg Standardausrüstung. Für eine vollelektrifizierte Flugmission von 476 km sind eine Energieträgermasse von 80,9 kg Flüssigwasserstoff und 197,1 kWh Strom notwendig. Der signifikante Massezuwachs der FCEA, trotz Gewichtsreduktion durch den Einsatz des Verbundwerkstoffs CFK in der Tragstruktur, ist auf die neuen Komponenten im elektrischen Antrieb für den rein elektrischen Betrieb zurückzuführen. Aufgrund der in Entwicklung befindlichen Schlüsseltechnologien wie die Lithium-Schwefel-Batterie oder die Polymerelektrolytmembran-Brennstoffzelle ergeben sich nur sehr geringe Lebensdauern, sodass ein zusätzlich hoher Materialeinsatz durch den häufigen Austausch der Komponenten Batterie, Brennstoffzelle, Elektromotor und Wasserstofftank alle ein bis acht Jahre resultiert. Für die Fallstudie werden zwei exemplarische Datenerhebungsblätter des Prozesses Elektrischer Antrieb Herstellung als Teil des Antriebssystems von HEA und FCEA in Anhang B9 und B10 abgebildet.

Ausführliche Erläuterungen der technologieveränderten Daten der Prozessmodule von HEA und FCEA befinden sich im Ökobilanz-Bericht in Kapitel 3.2.2, alle Datenerhebungsblätter über den Lebensweg der zwei elektrifizierten Flugzeuge können für die ex-ante Sachbilanz Anhang 11-27 des Berichts entnommen werden und die Dokumentation der Techniken pro Prozess zur Datengenerierung inklusive den Datenquellen ist in der Datengenerierungsliste von Anhang 28 und 29 aufgelistet, weiterhin kann die erweiterte Datensatz-Fluss-Liste für HEA und FCEA Anhang 38 des Berichts entnommen werden (Hanesch & Schebek, 2023).

### **7.3.4 Dritte Stufe zur Nachbildung der zwei elektrifizierten Flugzeuge in zwei Transformationsmodellen und Kennzeichnung des Transformationstyps**

Nach der Beschaffung aller quantitativen Werte für vollständige Modelle der beiden TTS sind die Inputs und Outputs aller Prozessmodule quantitativ zu verrechnen und zu kennzeichnen. In den zwei Transformationsmodellen ergibt die Verrechnung der neuen und veränderten Prozesse, dass der Anteil an Aluminium in der Fahrzeugmaterialverteilung gegenüber dem CA für die HEA auf 55,1% und für die FCEA auf 42,1% sinkt sowie höhere Anteile an Edelmetallen und Verbundwerkstoffen entstehen. Beispielsweise ist für die FCEA im Prozess Tragstruktur Herstellung der Verbundwerkstoff CFK im Flügel zu 85%, im Rumpf zu 70% sowie im Höhen- und Seitenleitwerk zu 99% eingesetzt. Aufgrund des neuen Prozesses Elektrischer Antrieb Herstellung kommen für die HEA hohe Mengen an Stahl und Kupfer sowie für die FCEA hohe Mengen an Kupfer und kritischen Rohstoffen hinzu. Zudem erhöht der häufige Austausch der elektrischen Komponenten den Einfluss dieses Prozesses auf den Rohstoffeinsatz der neuartigen Flugzeuge über den kompletten Lebensweg. Demgegenüber verändert sich der Energieträgereinsatz für 20 Jahre Flugzeugbetrieb von 5.197.500 kg Kerosin des CA auf 3.665.214 kg Kerosin und 95.634 kWh Strom für die HEA sowie 1.019.718 kg Wasserstoff und 2.482.956 kWh Strom für die FCEA.

Aus den quantifizierten Werten der erneuten Datensammlung und der Berechnung von allen Prozessmodulen, Prozessen und Lebensphasen ergeben sich die zusammengefassten Werte der hinzugekommenen und veränderten Flüsse. Diese sind wiederum anhand von 20 Jahren

Flugzeuglebensdauer, 14 transportierten Passagieren und 299.880 km Jahresflugleistung auf ein pkm zu normieren, um zum eLCI-Ergebnis der beiden TTS zu gelangen. Die beiden Transformationsmodelle sind in allen Prozessmodulen und Berechnungsverfahren in den mittleren vier Datenblättern für die HEA und in den letzten fünf Datenblättern für die FCEA der Excel-Datei für die GNOSIS Flugzeugmodelle dokumentiert, die öffentlich zugänglich ist über die DOI <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1350> (Hanesch, 2024b). Diese enthalten ebenfalls die jeweiligen Zukunftsveränderungsmodelle mit Zukunftsentwicklungen bis zum Marktetablierungsjahr 2025 für die HEA und 2050 für die FCEA, die in der pLCI im Detail vorgestellt werden. Die Gesamtflussinventare der Input- und Outputflüsse für beide TTS als Ergebnisse der ex-ante Sachbilanz sind in Anhang B12 und B13 abgebildet und zeigen bereits die prospektiven Gesamtflussinventare in der Gegenüberstellung. Aus den eLCI-Ergebnissen sind die Umweltwirkungen im Referenzzustand für die neuartigen Flugzeuge anhand von Ökobilanz-Software zu ermitteln, die sich jedoch nicht zum Vergleich mit dem CA eignen.

Die Produktsystem Bestimmung endet nach der abgeschlossenen Modellverrechnung mit der Kennzeichnung der eLCI-Ergebnisse der jeweiligen TTS in den drei Veränderungslevel, um diese gegenüber der LCI und pLCI abzugrenzen. Die Veränderungen zum konventionellen Flugzeug sind in den markierten Transformationstyp-Spezifizierungsmöglichkeiten der zwei elektrifizierten Flugzeuge in Abbildung 34 übersichtlich aufgezeigt.

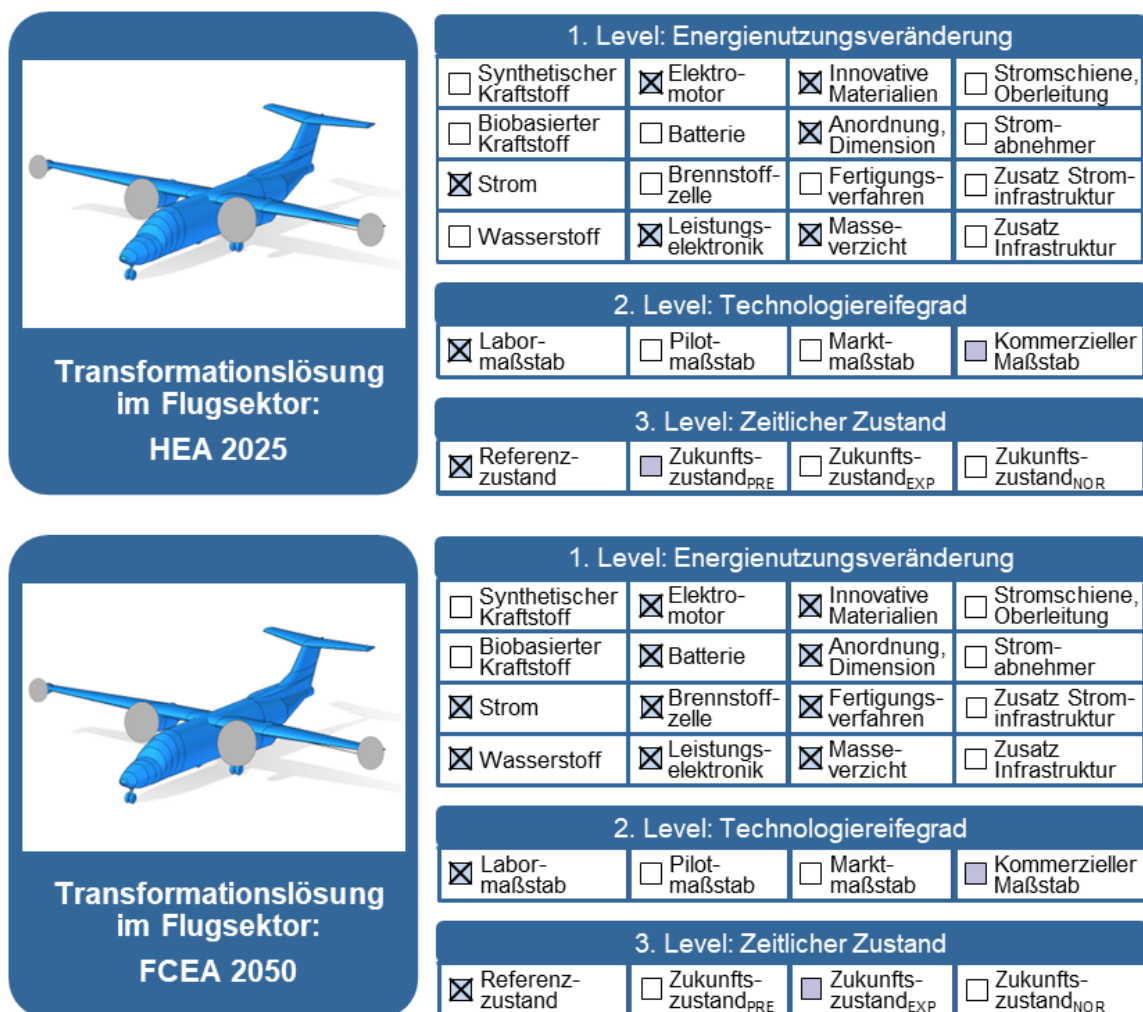


Abbildung 34 Kennzeichnung der Transformationstyp-Spezifizierungsmöglichkeiten für HEA und FCEA.



---

Alle Angaben für die LCA im Referenzzustand sind in blau hervorgehoben, während die Abweichungen der anvisierten LCA im Zukunftszustand mit lila differenziert dargestellt sind. Im ersten Level werden die wichtigsten physischen Veränderungen des Transformationstyps für die elektrifizierten Flugzeuge in den drei Wechseln aufgezeigt. Auch ohne detaillierte Informationen zu den eLCI-Daten zeigen sich die Unterschiede zwischen den Flugzeugen im Antrieb mit Einsatz von Elektromotoren, Batterie, Brennstoffzellen und Leistungselektronik für die FCEA gegenüber Elektromotoren und Leistungselektronik für die HEA zusammen mit den verwendeten Energieträgern und umgesetzten Maßnahmen am Flugzeugkorpus. Darauf folgt die Einordnung in die Entwicklungszustände mit und ohne technologischen Fortschritt der Flugzeuge für das zweite Level sowie in die Zukunftszustände prädiktiv für die HEA bzw. explorativ für die FCEA gegenüber dem Referenzzustand zur Kennzeichnung umzusetzender Umweltbewertungen mit und ohne zeitlichen Fortschritt für das dritte Level. Das Aufzeigen wichtigster Spezifikationen der spezifischen TTS-Variante erhöht die Nachvollziehbarkeit der im Nachgang im Rahmen der Modellierung erhaltenen Umweltwirkungsergebnisse für die elektrifizierten Flugzeuge im Technologieentwicklungsprozess.

### **7.3.5 Nachgelagerte Stufe der ex-ante Sachbilanz zur Bewertung der zwei elektrifizierten Flugzeuge**

Zum Abschluss werden die Sachbilanz-Ergebnisse an die Wirkungsabschätzung übergeben, um die Umweltwirkungsergebnisse für die drei Wirkungskategorien der Wirkungsbereiche Klimawandel, Humangesundheit und Rohstoffnutzung pro Flugzeug im Referenzzustand zu erhalten. Aus den vollständigen eLCI-Modellen resultiert je ein Wirkungsabschätzungsprofil, mit dem sich anhand der Gesamtergebnisse der retrospektiven LCA und den prozessbezogenen Auswirkungen aus der Beitragsanalyse von Tabelle 29 mögliche Verbesserungspotenziale aus den signifikanten Parametern für die Technologieentwicklung von HEA und FCEA und für die Zukunftsentwicklung bis zum Marktetablierungsjahr bestimmen lassen. Zudem sind die Umweltwirkungsergebnisse des CA gezeigt, die ebenfalls in der pLCI modifiziert werden.

Die Wirkungsabschätzungsprofile der Umweltwirkungen in den Kategorien Klimawandel, Photochemische Ozonbildung und Mineralischer Ressourcenverbrauch ergeben für die drei Flugzeuge, dass die größte Stellschraube im Referenzzustand der Energieträgereinsatz des Flugzeugbetriebs ist, der zu etwa Zweidrittel bzw. deutlich mehr in der Nutzenphase auf die Prozesse Energieträger Bereitstellung und Energieträger Nutzung zurückzuführen ist. Von großer Relevanz in allen drei Wirkungskategorien ist zudem der Prozess Elektrischer Antrieb Herstellung für die FCEA, der aufgrund hoher Materialeinsätze und geringer Lebensdauern der Komponenten zu verbessern ist. Für die HEA ist bezüglich der Ressourcenwirkung in weiteren Prozessen der Flugzeugherstellung der Rohstoffeinsatz signifikant, der in der pLCI zur Optimierung des Markthochlaufs der neuartigen Technologien weiter untersucht werden muss. Aus den Outputs der signifikanten Parameter aller drei Flugzeuge resultiert als größte Bedeutung für die Umweltwirkungsbeiträge die Nutzenphase mit den Einsätzen von Kerosin, Strom und Flüssigwasserstoff, welche zugleich eine hohe Sensitivität gegenüber möglichen Änderungen aufzeigen. Aufgrund erhöhter Beiträge durch den hohen Materialeinsatz sind die Prozesse des Antriebssystems und der Tragstruktur in der Zukunftsentwicklung bezüglich möglicher Verbesserungspotenziale ebenfalls zu berücksichtigen. Zudem haben die Prozesse des Lebensendes eine große Unsicherheit, die durch sinkende metallische Rohstoffeinsätze



und steigenden Einsatz an Verbundwerkstoffen sowie kritischen Rohstoffen gegenüber dem CA zusammen mit größerer Komplexität und Austauschhäufigkeit der Komponenten sowie sehr schwieriger Behandlung von CFK und GFK zur Verwertung einhergehen. Die u.a. für Lithium und CFK resultierenden hohen Umweltwirkungen aus der Materialbereitstellung sowie der insgesamt höhere Materialbedarf für die HEA und FCEA zeigen das Potenzial einer Erhöhung der Recyclingquote in Zukunft zur Reduktion dieser Umweltwirkungen auf.

Tabelle 29 Signifikante Parameter der Flugzeugvarianten am prozessbezogenen Umweltwirkungsbeitrag für die Wirkungskategorien Klimawandel, Photochemische Ozonbildung und Mineralischer Ressourcenverbrauch.

<b>Beitragsanalyse der Umweltwirkungen im Referenzzustand</b>										
<b>Produkt-system</b>	<b>Einheit [in %]</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>A4</b>	<b>A5</b>	<b>A6</b>	<b>A7</b>	<b>A8</b>	
CA-2002	CO <sub>2</sub> -eq	0,02%	-	0,01%	0,00%	0,19%	0,01%	0,06%	0,02%	
	NO <sub>x</sub> -eq	0,03%	-	0,01%	0,00%	0,25%	0,01%	0,07%	0,03%	
	Cu-eq	7,84%	-	0,16%	0,00%	11,63%	0,20%	3,52%	0,90%	
	<b>Gesamt [g/pkm]</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>			
	<b>225,88</b>	13,39%	86,32%	0,00%	0,00%	0,02%	-0,04%			
	<b>0,452</b>	29,32%	70,31%	0,00%	0,00%	0,03%	-0,06%			
	<b>0,075</b>	78,37%	0,00%	0,02%	0,00%	0,56%	-3,21%			
HEA-2025	CO <sub>2</sub> -eq	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%	0,25%	0,02%	0,09%	0,09%	
	NO <sub>x</sub> -eq	0,06%	0,04%	0,01%	0,03%	0,32%	0,02%	0,12%	0,09%	
	Cu-eq	11,90%	4,85%	0,20%	0,01%	12,32%	0,22%	9,25%	0,91%	
	<b>Gesamt [g/pkm]</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>			
	<b>160,35</b>	13,71%	85,79%	0,01%	0,00%	0,03%	-0,07%			
	<b>0,336</b>	28,04%	71,33%	0,00%	0,00%	0,05%	-0,10%			
	<b>0,070</b>	64,45%	0,00%	0,03%	0,00%	0,80%	-4,95%			
FCEA-2050	CO <sub>2</sub> -eq	-	1,22%	0,00%	0,00%	0,38%	0,01%	0,05%	0,03%	
	NO <sub>x</sub> -eq	-	2,59%	0,01%	0,00%	0,67%	0,01%	0,11%	0,06%	
	Cu-eq	-	13,47%	0,01%	0,00%	0,50%	0,01%	0,97%	0,06%	
	<b>Gesamt [g/pkm]</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>			
	<b>402,06</b>	98,32%	-	0,02%	0,01%	0,11%	-0,14%			
	<b>0,483</b>	96,72%	-	0,02%	0,00%	0,29%	-0,48%			
	<b>0,926</b>	88,28%	-	0,01%	0,00%	0,52%	-3,83%			

Hellrot: mehr als 1% Beitrag am Gesamtergebnis, Dunkelrot: mehr als 10% Beitrag am Gesamtergebnis

Die graphisch aufbereiteten Umweltwirkungsergebnisse der LCA im Referenzzustand können für alle drei untersuchten Flugzeuge dem Ökobilanz-Bericht in Abbildung 7-9 entnommen werden, die jedoch nicht vergleichend gegenübergestellt sind und nur dem späteren internen Vergleich dienen, weiterhin befindet sich die Sensitivitätsanalyse für die elektrifizierten Flugzeuge in Abbildung 10 des Berichts (Hanesch & Schebek, 2023).

Alle diese kritischen und unsicherheitsbehafteten Parameter von CA, HEA und FCEA sind als Input in die prospektive Sachbilanz weiter zu untersuchen. Auf die Parameter-Modifizierung ausgewählter Parameter aus dem Referenzzustand der drei Flugzeuge wird nachfolgend in der pLCI im Detail eingegangen.

---

## **7.4 Anwendung der erweiterten prospektiven Sachbilanz zur Nachbildung der zukunftsgerichteten Flugzeuge**

Das Vorgehen der prospektiven Sachbilanz für die zweite Erweiterung der standardisierten zweiten Phase der Ökobilanzierung soll auf den Untersuchungsgegenstand der drei 19-Sitzer Flugzeuge angewendet werden. Die Produktsysteme konventionelles, hybridelektrisches und brennstoffzellenelektrisches Flugzeug sind zur Bewertung zukünftiger Umweltauswirkungen im Flugsektor im Rahmen der vorgestellten Methodik im dritten Teil des Frameworks zu untersuchen und hinsichtlich möglicher Zukunftsveränderungen modifiziert nachzubilden. Die Vorgehensweise umfasst die drei Stufen Selektive Parameter Identifizierung, Zukünftige Parameter Erarbeitung sowie Zukunftsszenario Bestimmung und untergliedert sich in neun iterative Arbeitsschritte, die nachfolgend für CA, HEA und FCEA umgesetzt werden. Ziel der Durchführung ist der Erhalt von Zukunftsszenarien für die Ausbildung von differenzierten Zukunftsveränderungsmodellen der drei Flugzeuge auf Grundlage des parametrisierten Transportmodells des CA und den zwei daraus hervorgegangenen Transformationsmodellen der HEA und FCEA. Aus diesen Modellen kann eine Umweltbewertung im Zukunftszustand erfolgen, die einen Vergleich der potenziellen Umweltwirkungen untereinander ermöglicht.

### **7.4.1 Vorgelagerte Stufe der prospektiven Sachbilanz zur Klassifizierung der Zukunftsszenarien von den zukünftigen Flugzeugen**

Für das Ziel der modellierten Zukunftsentwicklung bis zu den Marktetablierungsjahren 2025 und 2050 ist in allen Flugzeugmodellen technologischer Fortschritt im Vordergrundsystem und zeitlicher Fortschritt im Hintergrundsystem zu berücksichtigen. Daraus folgt, dass der übergeordnete Modifikationszweck die vergleichbare Nachbildung von CA und TTS für den gleichen Modellierungszeitpunkt nach abgeschlossenem Markthochlauf in 2025 bzw. 2050 ist. Der gewählte Szenariotyp stellt im nahen Zeithorizont ein prädiktives Zukunftsszenario mit moderater Veränderungsintensität und im entfernten Zeithorizont aufgrund größerer Unsicherheit zwei explorative Zukunftsszenarien mit extremerer Veränderungsintensität dar. Die Zukunftsveränderungen für gleiche technologische und zeitliche Systemgrenzen gewährleisten die Vergleichbarkeit von CA und HEA bzw. FCEA im Marktetablierungsjahr.

### **7.4.2 Erste Stufe zur Vorbereitung der Datenerhebung für die zukünftigen Flugzeuge**

Die veränderte Struktur der Flugzeugmodelle wird mit Schlüsselfaktoren qualitativ gebildet. Im ersten Schritt des Inventar-Parameter Scannen ergeben sich aus dem Parameterübertrag der eLCI für die HEA acht und für die FCEA zehn verschiedene Inventar-Parameter, die mit den jeweiligen Veränderungstendenzen in Anhang B14 und B15 aufgelistet sind. In den zwei Parameterverzeichnissen der prospektiven Ökobilanzierung sind aus dem zweiten Schritt des Externe Faktoren Scannen die acht externen Faktoren Klimapolitik, Lieferkettentransport, Verzicht, Allgemeiner technologischer Fortschritt, Innovation, Umweltwirkungen Dienstleistungen, Klimakonformität und Kreislauffähigkeit integriert mit unterschiedlicher Veränderungstendenz in Abhängigkeit der übergeordneten Zukunftsentwicklung der beiden Szenariotypen. Im dritten Schritt Sachbilanz Verknüpfung folgt die Verbindung der 16 bzw. 18 Schlüsselfaktoren zum vereinfachten Sachbilanz-Modell der beiden TTS in Abbildung 35.

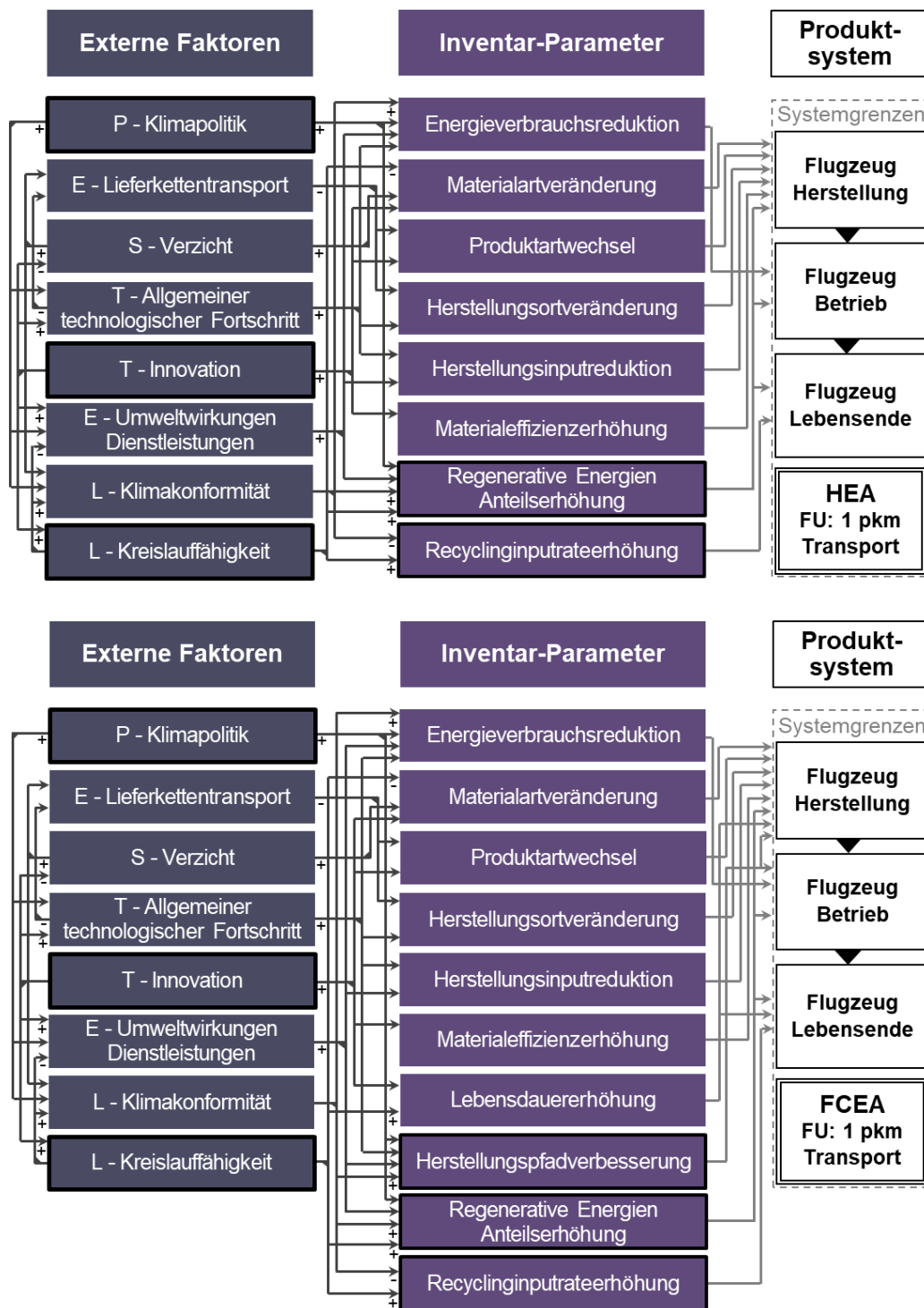


Abbildung 35 Kausalschleifendiagramm mit vereinfachtem Systemfließbild zur Kombination von acht Inventar-Parametern und acht externen Faktoren mit dem Sachbilanz-Modell der HEA (oben) sowie von zehn Inventar-Parametern und acht externen Faktoren mit dem Sachbilanz-Modell der FCEA (unten) (in Anlehnung an Cucurachi et al., 2022).

Die Kausalschleifendiagramme von HEA und FCEA zeigen die Einordnung aller Inventar-Parameter über den Flugzeuglebensweg und den Einfluss der externen Entwicklung auf die zu verändernden Parameter zur Ausbildung der Zukunftsveränderungsmodelle. Als externe Haupt-Faktoren ergeben sich Innovation mit sechs bzw. sieben sowie Kreislauffähigkeit und Klimapolitik mit fünf bzw. sechs ausgehenden Pfeilverbindungen für die HEA bzw. FCEA.

Dem Hintergrundsystem sind die Parameter Regenerative Energien Anteilserhöhung und Recyclinginputrateerhöhung sowie für die FCEA zusätzlich Herstellungspfadverbesserung zuzuordnen. Zum Abschluss der Identifizierung selektiver Zukunftsparameter mit größter Relevanz für den Fortschritt der Flugzeuge können die festgelegten Inventar-Parameter des prospektiven Parameterverzeichnisses auf den qualitativen Veränderungsbeschreibungen aufbauend in Stufe zwei schrittweise zur Quantifizierung der Modelle modifiziert werden.

### 7.4.3 Zweite Stufe zur Modifizierung von Daten für die Zukunftsszenarien der Flugzeuge im Zukunftszustand

Die systematische Quantifizierung erfolgt für die Parameter der prädiktiven und explorativen Zukunftsentwicklung. Zunächst werden im vierten Schritt der Modifikationszweck Auswahl alle Veränderungen für CA und HEA bzw. CA und FCEA kategorisiert in die Parameterart und die Ausprägungsmenge. Diese sind für die Parameter des nahen Zeithorizonts in Tabelle 30 dargelegt und zeigen die Einordnung von technologischem und zeitlichem Fortschritt des konventionellen und neuartigen Flugzeugs. Die Advance-Parameter als Modifikationszweck technologischen Fortschritts der konventionellen Technologie sind in AP 3 und AP 4 für das CA nicht enthalten, sie dienen lediglich zur Differenzierung zwischen HEA sowie FCEA und werden als Emerging-Parameter ohne Modifizierung in die prospektiven Modelle integriert. Alle weiteren Parameter sind je mit einem Wert für CA oder HEA bzw. für beide ausgebildet. Anhang B16 zeigt die eingeordneten Parameter der explorativen Zukunftsentwicklung von CA und FCEA mit ein- oder zweifacher Ausprägungsmenge aufgrund größerer Unsicherheit.

Tabelle 30 Einordnung des Modifikationszwecks für Inventar-Parameter der prädiktiven Zukunftsentwicklung.

Parameterart	Inventar-Parameter für die Modifizierung 2025 Prädiktive Zukunftsentwicklung	Ausprägungsmenge	
		CA	HEA
Advance-Parameter	AP 1 - Energieverbrauchsreduktion	1 Wert	Bereits enthalten
	AP 2 - Materialartveränderung	1 Wert	Bereits enthalten
	AP 3 - Produktartwechsel	Nicht enthalten	Bereits enthalten
	AP 4 - Herstellungsortveränderung	Nicht enthalten	Bereits enthalten
Upscaling-Parameter	UP 1 - Herstellungsinputreduktion	Nicht enthalten	1 Wert
	UP 2 - Materialeffizienzerhöhung	Nicht enthalten	1 Wert
Overall-Parameter	OP 3 - Regenerative Energien Anteilserhöhung	Prädiktiv: 1 Wert	Prädiktiv: 1 Wert
	OP 4 - Recyclinginputrateerhöhung	Prädiktiv: 1 Wert	Prädiktiv: 1 Wert

Für die Gesamtmenge von drei Zukunftsszenarien werden im fünften Schritt der Parameter Veränderung verschiedene Entwicklungspfade jedes einzelnen Inventar-Parameters für die Betrachtungszeitpunkte 2025 und 2050 erzeugt. Vielfältige Datenmodifikationstechniken wurden zur Modifizierung verwendet und daraufhin die Werte mit einer der partizipativen

Techniken Expertenumfrage oder Expertenannahme überprüft und ggf. angepasst. Mit der Flussmodifikation ergeben sich Änderungen an den Erzeugungsprozess und Marktprozess Datensätzen für die Produktsysteme der Kleinflugzeuge wie als AP der Austausch von CFK in Flugzeugsitzen oder Strukturbauteilen anhand von Substitution, als UP die Reduktion des Materialeinsatzes zur Produktion der Batterien oder deren Erhöhungen der Nutzungsdauern anhand von Effizienz sowie als OP der Wegfall von fossilen Energieträgern, zusätzlichen Energieerzeugungsanlagen wie Wasserstoff und der Veränderung der Zusammensetzung des Strommix anhand von den Veränderungsmaßnahmen entfernte und neue Produkte sowie Marktanteil. Die Änderungen von Vordergrund- und Hintergrundsystem der Flugzeuge sind in Tabelle 31 für die prädiktive Zukunftsentwicklung und in Anhang B17 für die explorative Zukunftsentwicklung abgebildet. Die Parameter-Modifizierung im Vordergrundsystem des konventionellen Flugzeugs basiert als aussagekräftiger Vergleich auf Anpassungen der eLCI für die neuartigen Flugzeuge, um aus der Modellierungs-Software MICADO/UNICADO zwei neue Flugzeugentwürfe des CA für die Marktetablierungsjahre 2025 und 2050 zu erhalten.

Tabelle 31 Ausbildung von Entwicklungspfaden für Inventar-Parameter der prädiktiven Zukunftsentwicklung.

<b>Inventar-Parameter für 2025 Entwicklungspfade</b>	<b>Datenmodifikations-technik</b>	<b>Flussmodifikation</b>
AP 1 - Energieverbrauchsreduktion	Näherungswert alternatives Produkt, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Energie für Flugzeugbetrieb
AP 2 - Materialartveränderung	Näherungswert alternatives Produkt, Expertenumfrage	Substitution: Austausch CFK in Flugzeugsitzen
AP 3 - Produktartwechsel	-	-
AP 4 - Herstellungsortveränderung	-	-
UP 1 - Herstellungsinpurreduktion	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Energie Batterie
UP 2 - Materialeffizienz-erhöhung	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material Batterie
OP 3 - Regenerative Energien Anteilserhöhung	Literaturannahme, Expertenumfrage	Marktanteil/entfernte Produkte: Reduzierte Bereitsteller fossile Energieträger am Markt
OP 4 - Recyclinginputrate-erhöhung	Historischer Trend, Expertenumfrage	Marktanteil/neue Produkte: Zusätzliche Bereitsteller Sekundärrohstoffe am Markt

Das Vorgehen endet mit der Ausbildung der konkreten quantitativen Veränderung für jeden Parameter mit einer maximalen Ausprägungsmenge von drei neuen Werten. Im Anschluss werden im sechsten Schritt der Szenariotyp Zuordnung die einzelnen Wertänderungen zu Parameter-Bündeln zusammengefasst, die dem zuvor definierten prädiktiven Szenariotyp in 2025 und den zwei explorativen Szenariotypen in 2050 entsprechen. Die Parameter-Bündel-Liste ist im Referenzzustand und im Zukunftszustand mit allen Entwicklungspfaden der HEA anhand Wertänderungen der zwei Upscaling-Parameter und Overall-Parameter für die FUT-PRE-BAU Zukunftsentwicklung in Tabelle 32 gezeigt. Die explorative Zukunftsentwicklung der FCEA in den Variationen FUT-EXP-BETTER sowie FUT-EXP-FASTER befindet sich in Anhang B18 und alle drei Zukunftszustände des CA sind in Anhang B19 dargestellt.

Tabelle 32 Zuordnung der Inventar-Parameter in der Parameter-Bündel-Liste für alle HEA Entwicklungspfade.

<b>Parameter-Bündel-Liste der HEA</b>				
<b>Inventar-Kürzel</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter 2023 Referenzzustand</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Umsetzungsmaßnahme</b>
EP 1.1	REF	Energieverbrauchsreduktion	0,61 kg/km Kerosin, 0,02 kWh/km Strom	-20%
EP 2.1	REF	Materialartveränderung	94,5 kg (2/3) Stahl zu CFK (1/5 Kabine)	-2% insg.
EP 3.1	REF	Produktartwechsel	38,5 kg Li-Ion NMC 811 in Flugsystemen	-
EP 4.1	REF	Herstellungsortveränderung	7538 km Flugtransport	-
UP 1.1	REF	Herstellungsinputreduktion	100% Energiebedarf Batterie	-
UP 2.1	REF	Materialeffizienzerhöhung	100% Materialbedarf Batterie	-
OP 3.1	REF	Regenerative Energien Anteilserhöhung	45% RE Strommix in Fahrzeug und Batterie Produktion	-
OP 4.1	REF	Recyclinginputrateerhöhung	20% Recyclingquote	-
<b>Inventar-Kürzel</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter 2025 Zukunftszustand</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Wertänderung</b>
UP 1.2	FUT-PRE-BAU	Herstellungsinputreduktion	100% Energiebedarf Batterie	- 17,5%
UP 2.2	FUT-PRE-BAU	Materialeffizienzerhöhung	100% Materialbedarf Batterie	- 10%
OP 3.2	FUT-PRE-BAU	Regenerative Energien Anteilserhöhung	45% RE Strommix in Fahrzeug und Batterie Produktion	+ 25%
OP 4.2	FUT-PRE-BAU	Recyclinginputrateerhöhung	20% Recyclingquote	+ 22%

#### 7.4.4 Dritte Stufe zur Datenberechnung der zukunftsgerichteten Flugzeuge im Zukunftsveränderungsmodell und Kennzeichnung der Zukunftsszenarien

Nach der Modifizierung für alle quantitativen Zukunftsannahmen lassen sich drei nutzbare Zukunftsszenarien ausbilden und in den Flugzeugmodellen einsetzen. Im siebten Schritt der Zukunftsszenario Kombination werden die Szenarien geprüft und final gebildet. Tabelle 33 zeigt die Konsistenzmatrix zur Überprüfung der Schlüsselfaktoren der HEA untereinander anhand der vier Parameter-Ausprägungen und mit den externen Hauptfaktoren. Da für das prädiktive Zukunftsszenario keine nicht-konsistenten Entwicklungen enthalten sind, ergibt sich eine Passgenauigkeit der Bündelung. Die Konsistenzmatrix für die Schlüsselfaktoren der FCEA mit 21 unterschiedlichen Parameter-Ausprägungen ist in Anhang B20 dargestellt und zeigt ebenfalls eine Passgenauigkeit für die zwei explorativen Zukunftsszenarien auf.



Tabelle 33 Konsistenzmatrix für Schlüsselfaktoren der HEA zur Kombination eines prädiktiven Zukunftsszenarios (in Anlehnung an Kosow & Gaßner, 2008).

Konsistenzmatrix der HEA Parameter-Bündel für Zukunfts- szenarien	Inventar- Parameter				Externe Haupt- Faktoren		
	1) UP 1.2 FUT-PRE-BAU	2) UP 2.2 FUT-PRE-BAU	3) OP 3.2 FUT-PRE-BAU	4) OP 4.2 FUT-PRE-BAU	PESTEL - Klimapolitik	PESTEL - Innovation	PESTEL - Kreislauffähigkeit
1) UP 1.2	+	+	+	+	+	+	/
2) UP 2.2			+	+	+	+	+
3) OP 3.2				+	+	+	/
4) OP 4.2					+	+	+
Konsistenz: völlig (+), teilweise (O), nicht (-) keine Aussage möglich (∕)							

Die drei finalisierten Szenarien mit nur völlig oder teilweise konsistenten Schlüsselfaktoren erhalten zum Abschluss differenzierte Namen. Die prädiktive Entwicklung bis 2025 des FUT-PRE-BAU Zukunftszustands wird durch den Szenario-Namen *Keep moving forward* (KMF) als ein Voranschreiten in moderater Veränderungsstärke gekennzeichnet. Die zwei explorativen Entwicklungen bis 2050 differenzieren sich mit dem FUT-EXP-BETTER Zukunftszustand in den Szenario-Namen *Wind of change* (WOC), in dem besonders der Strommix auf Basis eines hohen Windkraftanteils erhebliche Verbesserungen wie für die Wasserstoffherstellung im gesamten Produktsystem erreicht, sowie mit dem FUT-EXP-FASTER Zukunftszustand in den Szenario-Namen *Fast progress* (FP), in dem die schnellere Umsetzung von teilweise größeren Verbesserungen mittels höheren Recyclingquoten oder längeren Lebensdauern erfolgt. Die explorativen Zukunftsszenarien stellen zwar eine sehr ambitionierte Veränderungsintensität dar, bilden jedoch keine Best Case Entwicklung wie Wasserstoff aus 100% regenerativen Energien ab. Abschließend lässt sich das Parametermodifikationsverzeichnis ausfüllen, das in Abbildung 36 für die HEA und in Anhang B21 für die FCEA dargestellt ist. Gleichmaßen sind die Zukunftszustände auf das CA zu übertragen, wofür kein eigenes Verzeichnis erstellt ist, jedoch diese auf der Entwicklung aller drei Zukunftszustände von Anhang B19 basieren.

Im achten Schritt der Sachbilanzmodell Integration sind die Datenaufbereitungsstrukturen der Szenarien zum Übertrag der quantifizierten Parameter des jeweiligen Parameter-Bündels in die Flugzeugmodelle zu verwenden. Die pLCI-Modelle bilden sich aus den Modellwerten des Referenzzustands im Rahmen der in Abbildung 37 aufgespannten drei Szenariotrichter für CA, HEA bzw. FCEA. Diese werden in drei, ein bzw. zwei Zukunftsveränderungsmodelle überführt, indem die geänderte Struktur von Transportmodell bzw. Transformationsmodell für alle selektiv gewählten und prospektiv quantifizierten Parameter modifiziert wird, die in Zukunftsszenario und jeweiliger Prozessstruktur von CA, HEA bzw. FCEA enthalten sind.

Parametermodifikationsverzeichnis für Ökobilanzierung						
Zur Modellierung zukunftsgerichteter Verkehrsmittel mittels Parameter-Modifizierung						
*Konventioneller Transport: Incumbent-Parameter [IP] / Advance-Parameter [AP] / Overall-Parameter [OP]						
**Transport-Transformationslösung: Emerging-Parameter [EP] / Upscaling-Parameter [UP] / Overall-Parameter [OP]						
HEA 2025			Referenzzustand			
Inventar-Kürzel <sup>*/**</sup>	Zeit-Kürzel	Inventar-Parameter	Datengenerierungstechnik	Flussumsetzung	Referenzwert	Umsetzungsmaßnahme
EP 1.1	REF	Energieverbrauchsreduktion	Simulation	Effizienz: Reduktion Energie Flugzeugbetrieb	0,61 kg/km Kerosin, 0,02 kWh/km Strom	-20%
EP 2.1	REF	Materialartveränderung	Geometrische Berechnung	Substitution: Austausch CFK in Flugzeugsitzen	94,5 kg (2/3) Stahl zu CFK (1/5 Kabine)	-2% insg.
EP 3.1	REF	Produktartwechsel	Datenbank	Neue Produkte: Zusätzliche Bereitsteller Li-Ion NMC 811	38,5 kg Lithium-Ionen-Batterie NMC 811 in Flugsystemen	-
EP 4.1	REF	Herstellungsortveränderung	Eigene Schätzung	Distanz: Antrieb Produktionsortveränderung	7538 km Flugtransport	-
UP 1.1	REF	Herstellungsinputreduktion	-	-	100% Energiebedarf Li-Ion Batterie	-
UP 2.1	REF	Materialeffizienzerhöhung	-	-	100% Materialbedarf Li-Ion Batterie	-
OP 3.1	REF	Regenerative Energien Anteilserhöhung	-	-	45% RE Strommix in Fahrzeug und Batterie Produktion	-
OP 4.1	REF	Recyclinginputrateerhöhung	-	-	20% Recyclingquote	-
HEA 2025A			Zukunftszustand - Szenariovariante A			
Inventar-Kürzel <sup>*/**</sup>	Zeit-Kürzel	Inventar-Parameter	Datenmodifikationstechnik	Flussmodifikation	Referenzwert	Wertänderung
UP 1.2	FUT-PRE-BAU	Herstellungsinputreduktion	Lernkurve, Expertenfrage	Effizienz: Reduktion Energie Batterie	100% Energiebedarf Li-Ion Batterie	-17,5%
UP 2.2	FUT-PRE-BAU	Materialeffizienzerhöhung	Lernkurve, Expertenfrage	Effizienz: Reduktion Material Batterie	100% Materialbedarf Li-Ion Batterie	-10%
OP 3.2	FUT-PRE-BAU	Regenerative Energien Anteilserhöhung	Literaturannahme, Expertenfrage	Marktanteil/entfernte Produkte: Reduzierte Bereitsteller fossile Energieträger am Markt	45% RE Strommix in Fahrzeug und Li-Ion Batterie Produktion	+ 25%
OP 4.2	FUT-PRE-BAU	Recyclinginputrateerhöhung	Historischer Trend, Expertenfrage	Marktanteil/neue Produkte: Zusätzliche Bereitsteller Sekundärrohstoffe am Markt	20% Recyclingquote	+ 22%
Konstanzcheck			Völlig konsistent	Teilweise konsistent	Nicht konsistent	Keine Aussage möglich
HEA 2025A			16 x (+)	0 x (O)	0 x (-)	2 x (/)
Szenariokombination			Szenariovariante			
HEA 2025A			Keep moving forward (KMF)			

Abbildung 36 Parametermodifikationsverzeichnis für die Szenarioentwicklungsprozess-Dokumentation der HEA.

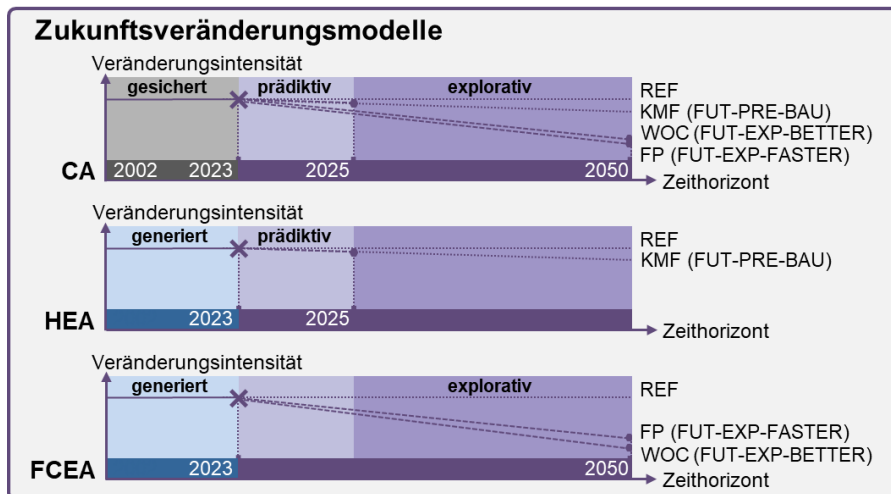


Abbildung 37 Szenariotrichter für die Zukunftsszenarien KMF, WOC und FP der Flugzeuge CA, HEA bzw. FCEA.

---

Die Zukunftsveränderungsmodelle aus der vorgestellten Fallstudie des Projekts GNOSIS umfassen die vollständigen und teilweise modifizierten Prozessmodule sowie deren Berechnungsverfahren und befinden sich für das CA im dritten bis fünften Datenblatt, für die HEA im neunten Datenblatt und für die FCEA im dreizehnten und vierzehnten Datenblatt der dokumentierten Excel-Datei für die GNOSIS Flugzeugmodelle, die öffentlich zugänglich ist über die DOI <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1350> (Hanesch, 2024b). Diese sechs pLCI-Modelle bilden mit allen modifizierten Parametern die Szenarien KMF, WOC und FP je in zwei Varianten ab, aus denen sechs differenzierte prospektive Gesamtflussinventare entstehen. Die prospektiven Gesamtflussinventare sind für das CA in Anhang B11, für die HEA in Anhang B12 und für die FCEA in Anhang B13 dieser Arbeit dargestellt.

Aus den verrechneten und normierten Daten der prospektiven Sachbilanz-Modelle zeigt sich in den Gesamtflussinventaren, dass für das CA in der Nutzenphase große Veränderungen durch den geringeren Energieträgereinsatz von 0,049 kg/pkm Kerosin in 2025 bzw. 0,041 kg/pkm Kerosin in 2050 gegenüber 0,062 kg/pkm Kerosin in 2002 entstehen. Zudem zeigt das geringere Flugzeuggewicht von ehemals 4.919 kg zu 4.589 kg bzw. 3.726 kg in den zwei neuen Flugzeugentwürfen des CA in der ersten Lebensphase Materialeinsparungen auf, die sich auf die letzte Lebensphase auswirken. Aufgrund des kurzen Zeithorizonts von zwei Jahren entstehen für die HEA nur geringe Änderungen im Zukunftsveränderungsmodell, die hauptsächlich zu veränderten Flüssen in der letzten Lebensphase führen. Für die FCEA resultieren durch die explorativen Szenarien bis 2050 zwar große Veränderungen in der Nutzenphase, diese werden jedoch aufgrund von Veränderungen in den Datensätzen des Hintergrundsystems, u.a. durch OP Herstellungspfadverbesserung für die LH<sub>2</sub> Bereitstellung und Regenerative Energien Anteilserhöhung für den Strommix, erst mit der Modellierung in Ökobilanz-Software ersichtlich. Aus den Gesamtflussinventaren der zwei pLCI-Modelle der FCEA sind dennoch vielfältige Änderungen im Vordergrundsystem des Flugzeugs erkennbar wie durch UP Lebensdauererhöhung im Antriebssystem. Der Materialeinsatz von 2.615 kg für den elektrischen Antrieb, der aufgrund geringen Komponentenlebensdauern über die 20 Jahre Flugzeuglebensdauer auf 22.273 kg Materialbedarf um ein Vielfaches gesteigert wird, kann z.B. für die ehemals alle 0,8 Jahre getauschte Lithium-Schwefel-Batterie und deren Materialbedarf im WOC Szenario um ein Drittel und im FP Szenario um Zweidrittel reduziert werden. Weiterhin kann der Parameter Recyclinginputrateerhöhung im FP Szenario auf 90% Recyclingquote Einsparungen von Primärmaterial mit berücksichtigtem Korrekturfaktor von 94% Aluminium, 84% Stahl, 63% Edelmetalle und 70% Polymere ermöglichen. Verwendete Literaturquellen zu den Szenario-Parametern und neu erstellten Datensätzen befinden sich im Ökobilanz-Bericht in Tabelle 1 und Anhang 38 (Hanesch & Schebek, 2023).

Abschließend werden im neunten Schritt der Narrative Kenntlichmachung die drei zeitlichen Zustände der Zukunftsszenarien in Szenariotext übersetzt, um die Szenarioentwicklung und das jeweilige Resultat für den Flugzeugtransport zu kommunizieren. Die drei Szenario-Narrativen in Abbildung 38 und 39 zeigen den unsicherheitsbehafteten Weg zur spezifischen Zukunftssituation im Marktetablierungsjahr auf und verdeutlichen die vielversprechenderen Entwicklungspfade der Schlüsselfaktoren in der langfristigen Entwicklung der WOC und FP Szenarien gegenüber dem KMF Szenario. Mit den Narrativen können die in den sechs pLCI-Modellen getätigten Zukunftsannahmen für im Nachgang erzeugte Ökobilanz-Ergebnisse prägnant an Entscheidungsträger und alle Nutzer der LCA-Studie hinsichtlich Unsicherheiten und Besonderheiten der zugrunde gelegten Entwicklungen vermittelt werden.

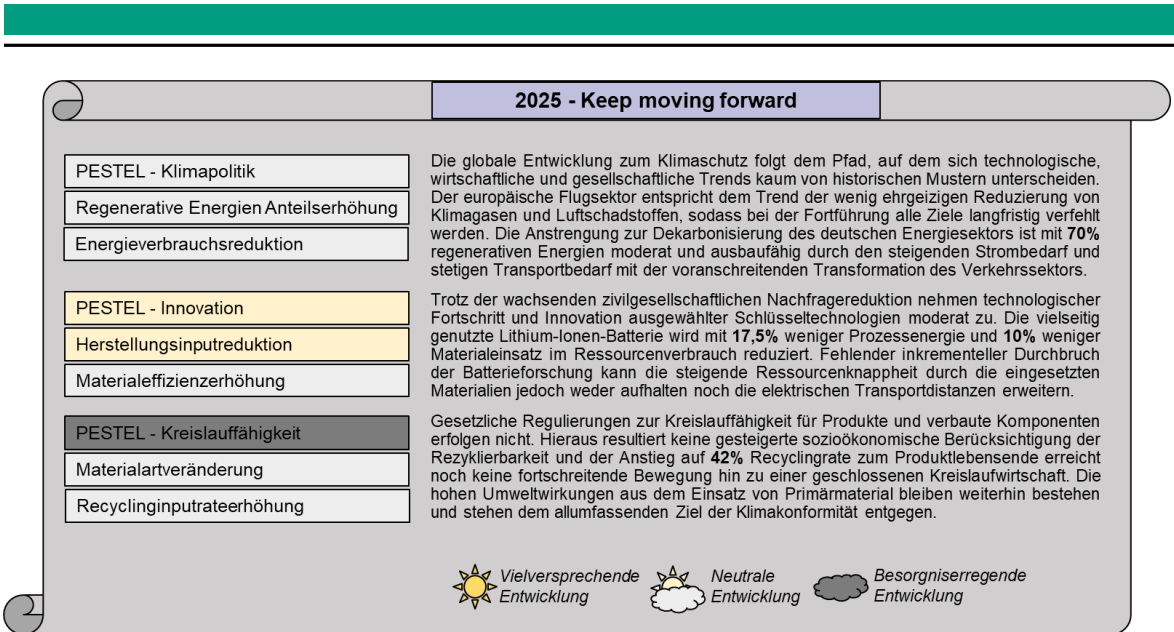


Abbildung 38 Szenario-Narrative für die 2025 Entwicklungspfade des KMF Zukunftsszenarios.

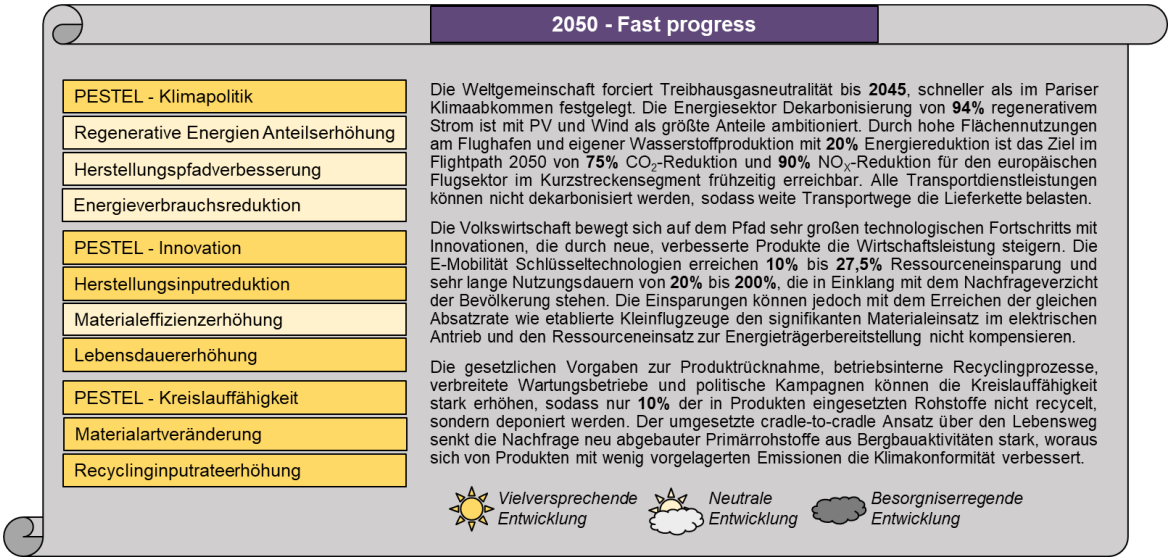
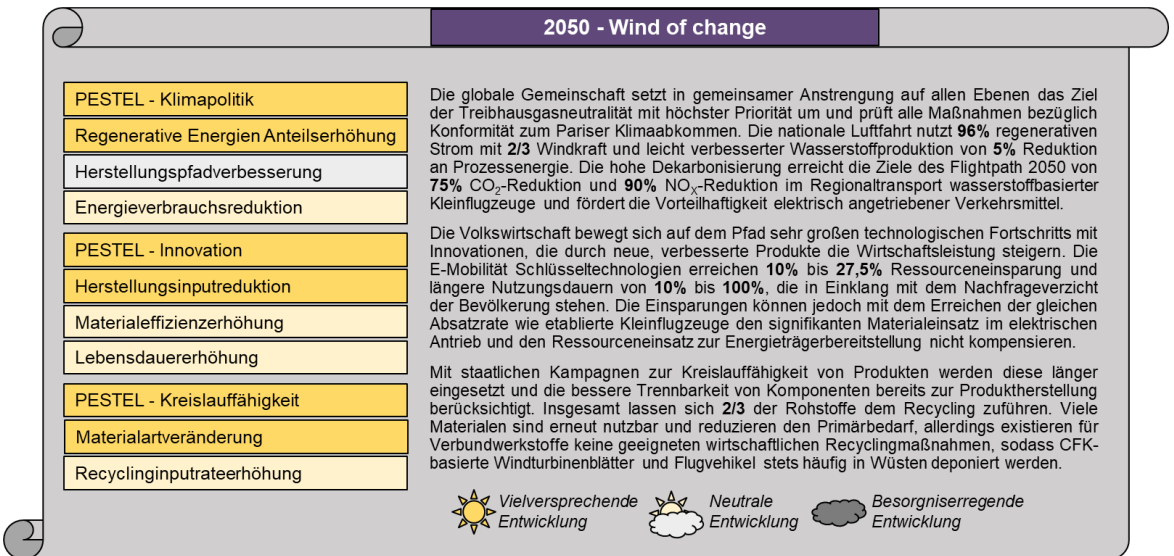


Abbildung 39 Szenario-Narrativen für die 2050 Entwicklungspfade der WOC und FP Zukunftsszenarios.

---

#### 7.4.5 Nachgelagerte Stufe der prospektiven Sachbilanz zur Bewertung der zukunftsgerichteten Flugzeuge

Zur Bewertung vergleichbarer Umweltwirkungsergebnisse werden die zukunftsgerichteten Flugzeugmodelle des dreistufigen Szenarioentwicklungsprozesses anhand der Modellierung in Ökobilanz-Software weiterverwendet. Die auf Basis der Wirkungsabschätzung erzeugten Wirkungsabschätzungsprofile aller Flugzeuge im Referenzzustand und im Zukunftszustand für die Wirkungskategorien Klimawandel, Photochemische Ozonbildung und Mineralischer Ressourcenverbrauch sind als Gesamtergebnisse in Abbildung 40 aufgezeigt, aus denen der interne Vergleich zwischen den zeitlichen Zuständen desselben Flugzeugs oder der externe Vergleich zwischen den jeweiligen Zukunftsszenarien KMF, WOC und FP bzw. gegenüber Sektorenzielsetzungen erfolgen kann.

Aus dem Wirkungsabschätzungsprofil der FCEA wird die Wirkung der extremeren Szenarien ersichtlich, mit denen sich in der Nutzenphase für die zwei emissionsbasierten Kategorien die hohen Umweltwirkungen u.a. aufgrund berücksichtigter Verbesserungen im Strommix und durch den hohen Anteil an regenerativen Energien für dekarbonisierten Wasserstoff signifikant reduzieren lassen. Dies verdeutlicht die überragende Rolle der dekarbonisierten Energieträger als Optimierungspotenzial für den Flugzeugtransport, zeigt jedoch für den Rohstoffbedarf gegenläufige Effekte zur Herstellung der Energieträger auf. In der ersten und letzten Lebensphase können u.a. aufgrund von Lebensdauererweiterungen und Recycling die Umweltwirkungen der FCEA in allen drei Kategorien meist um mehr als die Hälfte reduziert werden. Aus den Umweltwirkungsergebnissen des Szenarioentwicklungsprozesses ergeben sich für vollelektrifizierte Flugzeuge die Inventar-Parameter Regenerative Energien Anteilserhöhung im Strommix, Herstellungspfadverbesserung von Flüssigwasserstoff, Lebensdauererhöhung von Komponenten und Recyclinginputrateerhöhung zum Lebensende als relevante Stellschrauben zu Verbesserungspotenzial im Technologieentwicklungsprozess. Aufgrund einer geringen Elektrifizierung der HEA und dem kurzen Zeithorizont von zwei Jahren ist kein Potenzial für prospektive Maßnahmen herzuleiten. Für das konventionelle Flugzeug trägt die Energieverbrauchsreduktion von Kerosin im Betrieb neben Maßnahmen zu Design und Konstruktion in den neuen Flugzeugentwürfen des CA am meisten zu Verbesserungen aller betrachteten Wirkungsindikatorwerte bei.

Die Veränderungen bzw. Verbesserungen der Umweltwirkungen, die sich für CA, HEA und FCEA im Technologieentwicklungsprozess zwischen Referenzzustand und Zukunftszustand ergeben, sind in Abbildung 41 zusammengefasst. Der interne Vergleich zwischen nicht-modifizierten und modifizierten Daten zeigt eine gleichmäßige Verbesserung in allen drei Kategorien für das CA von bis zu einem Drittel, eine geringe Veränderungsintensität von 5% nur für den Wirkungsbereich der Rohstoffnutzung für die HEA sowie große Veränderungen für die FCEA im Bereich Klimawandel von fast 90% und Humangesundheit von etwa Dreiviertel geringeren Emissionen. Die Rohstoffnutzung führt durch den hohen Einsatz von regenerativen Energieträgern wie PV und Wind über den Lebensweg zu keiner signifikanten Verringerung des Ressourcenbedarfs trotz gesteigerten Lebensdauern und Recyclingquoten, da die Nutzenphase mit den verwendeten Energieträgern im Betrieb weiterhin die größte Auswirkung auf die Umweltwirkungen des regionalen Personentransports in einem Kleinflugzeug hat.



## Umweltwirkungsergebnisse für den Personentransportvergleich in einem Kleinflugzeug



Abbildung 40 Wirkungsabschätzungsprofile für den Personentransportvergleich zwischen CA, HEA und FCEA.



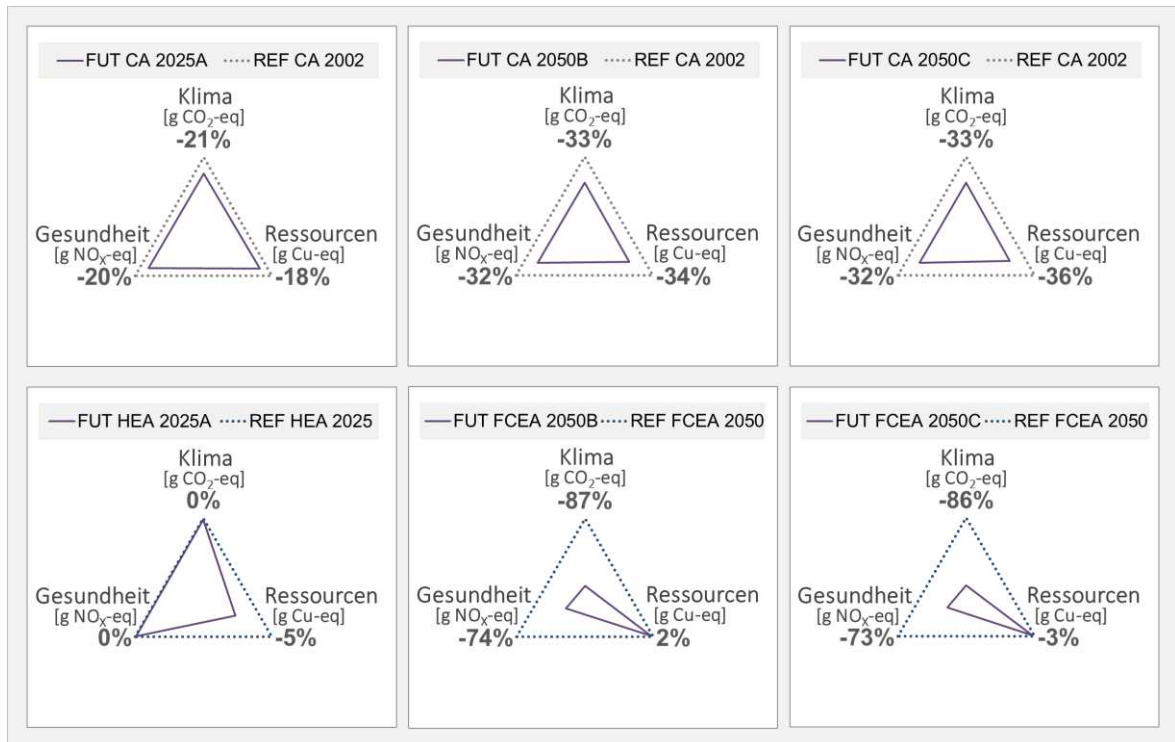


Abbildung 41 Interner Vergleich der Umweltwirkungen des Zukunftszustands gegenüber dem Referenzzustand.

Die Optimierungspotenziale im möglichen vollendeten Technologieentwicklungsprozess mit berücksichtigten Zukunftsentwicklungen lassen sich aus den Gesamteffekten der erzeugten prospektiven Umweltwirkungen weiter auf einzelne modifizierte Parameter zurückführen. Da der Betrieb für die HEA hauptsächlich aus Kerosin und nebensächlich aus Strom sowie für die FCEA hauptsächlich aus Flüssigwasserstoff und nebensächlich aus Strom resultiert, entfallen beispielsweise für die FCEA in der Kategorie Klimawandel im internen Vergleich Verbesserungen auf den reinen Strommix von lediglich 3,8% im WOC und 3,7% im FP Szenario, während die dekarbonisierte Flüssigwasserstoffherstellung 83,0% in WOC und 79,2% in FP erreicht. Für die HEA ergibt sich im Prozess Energieträger Bereitstellung eine THG-Verteilung von 1,6% Strom sowie 98,4% Kerosin, der Prozess Energieträger Nutzung ist vollständig auf Kerosin zurückzuführen. Weiterhin führt der reine Strommix der FCEA für den Mineralischen Ressourcenverbrauch nur zu unter einem Prozent Erhöhung, während aus der Bereitstellung des Flüssigwasserstoffs Erhöhungen von 15,9% in WOC und 26,0% in FP resultieren. Der Anstieg der Umweltwirkungen im Szenario Fast progress mit 94% regenerativen Energien gegenüber dem Szenario Wind of change mit 96% regenerativen Energien ist grundsätzlich auf den höheren Materialeinsatz pro produzierter Kilowattstunde durch mehr regenerative Energieerzeugungstechnologien und insbesondere auf den höheren Einsatz von PV im Strommix statt Wind zurückzuführen. Die resultierende Verringerung des Mineralischen Ressourcenverbrauchs von insgesamt 3% im FP Szenario basiert auf einer Kompensation der kombinierten Parameter von u.a. ambitionierter Lebensdauererhöhung und Recyclinginputrateerhöhung. Zudem werden in FP 20% Energiebedarfsreduktion für die LH<sub>2</sub>-Bereitstellung gegenüber 5% in WOC angenommen. Da die Nutzenphase weiterhin den größten Anteil an allen Umweltwirkungen besitzt, muss im Technologieentwicklungsprozess der elektrifizierten Flugzeuge ein Fokus auf die Bereitstellung der Energieträger Kerosin und Flüssigwasserstoff und deren Energieeffizienz im Betrieb gelegt werden.

Im externen Vergleich sind die Flugzeuge untereinander für die Bewertung der ökologischen Vorteilhaftigkeit gegenüberzustellen, um zur abschließenden Entscheidungsunterstützung zwischen den Flugtransporttechnologien zu gelangen. Potenzielle Umweltwirkungsresultate insgesamt und pro Prozess sind für das prädiktive Szenario im Jahr 2025 von CA und HEA anhand der Beitragsanalyse in Tabelle 34 aufgezeigt, die Beiträge für die zwei explorativen Szenarien im Jahr 2050 lassen sich in der Gegenüberstellung von CA und FCEA Anhang B22 und B23 entnehmen. In der Nutzenphase entstehen für das CA 99% emissionsbedingte Wirkungen hauptsächlich aus der TtW Kerosinverbrennung und Dreiviertel materialbasierte Wirkungen ausschließlich aus der WtT Kerosinbereitstellung, für die HEA resultieren 99% emissionsbedingte Wirkungen und Zweidrittel materialbasierte Wirkungen, während für die FCEA mindestens 95% aller berücksichtigten Umweltwirkungen auf die Bereitstellung von Wasserstoff und Strom entfallen. Bezogen auf die Gesamtergebnisse der Umweltwirkungen kann für die elektrifizierten Flugzeuge im jeweiligen Marktetablierungsjahr gegenüber dem konventionellen Flugzeug in den Wirkungskategorien Klimawandel und Photochemische Ozonbildung eine ökologische Vorteilhaftigkeit über den Lebensweg festgestellt werden. Jedoch erreicht elektrisches Fliegen insbesondere für die FCEA nur mit dekarbonisierten Herstellungspfaden große Umweltverbesserungen. In der Wirkungskategorie Mineralischer Ressourcenverbrauch erzielt das CA insgesamt trotz längeren Lebensdauern im elektrischen Antrieb und höheren Recyclingquoten in allen drei Zukunftsszenarien geringere Werte.

Tabelle 34 Signifikante Parameter von CA und HEA am prozessbezogenen Umweltwirkungsbeitrag im externen Vergleich des Szenarios KMF für die drei Wirkungskategorien im Zukunftszustand.


<b>Beitragsanalyse der Umweltwirkungen im Zukunftsszenario Keep moving forward</b>									
<b>Produkt-system</b>	<b>Einheit [in %]</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>A4</b>	<b>A5</b>	<b>A6</b>	<b>A7</b>	<b>A8</b>
CA-2025A	CO <sub>2</sub> -eq	0,03%	-	0,01%	0,00%	0,24%	0,01%	0,07%	0,08%
(KMF)	NO <sub>x</sub> -eq	0,05%	-	0,01%	0,00%	0,30%	0,01%	0,08%	0,08%
	Cu-eq	12,43%	-	0,27%	0,00%	13,69%	0,10%	4,12%	0,96%
	<b>Gesamt [g/pkm]</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>		
	179,21	13,37%	86,24%	0,01%	0,00%	0,05%	-0,11%		
	0,364	28,90%	70,63%	0,00%	0,00%	0,08%	-0,17%		
	0,062	75,62%	0,00%	0,05%	0,00%	1,46%	-8,72%		
<b>Produkt-system</b>	<b>Einheit [in %]</b>	<b>A1</b>	<b>A2</b>	<b>A3</b>	<b>A4</b>	<b>A5</b>	<b>A6</b>	<b>A7</b>	<b>A8</b>
HEA-2025A	CO <sub>2</sub> -eq	0,04%	0,02%	0,01%	0,01%	0,25%	0,01%	0,09%	0,09%
(KMF)	NO <sub>x</sub> -eq	0,06%	0,04%	0,01%	0,03%	0,32%	0,02%	0,12%	0,09%
	Cu-eq	12,51%	5,10%	0,22%	0,01%	12,95%	0,22%	9,72%	0,95%
	<b>Gesamt [g/pkm]</b>	<b>B1</b>	<b>B2</b>	<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>		
	159,99	13,55%	85,98%	0,01%	0,00%	0,07%	-0,14%		
	0,336	27,99%	71,43%	0,01%	0,00%	0,10%	-0,21%		
	0,066	67,56%	0,00%	0,05%	0,00%	1,76%	-11,07%		

Hellrot: mehr als 1% Beitrag am Gesamtergebnis, Dunkelrot: mehr als 10% Beitrag am Gesamtergebnis

Als Gesamtergebnis des transparenten Szenarioentwicklungsprozesses ergibt sich aus dem externen Vergleich von einem regionalen Personentransport in elektrifizierten gegenüber konventionellen 19-Sitzer Flugzeugen in Tabelle 35 pro Szenario das jeweilige Potenzial der Flugzeugsubstitution mit den Werten in der mittleren Spalte. In den Zukunftsszenarien KMF,

WOC bzw. FP können insgesamt potenzielle Umweltwirkungsverbesserungen von 11%, 65% bzw. 62% CO<sub>2</sub>-eq, 8%, 60% bzw. 57% NO<sub>x</sub>-eq und Umweltwirkungsverschlechterungen von 7%, 1.804% bzw. 1.763% Cu-eq im Technologievergleich gegenüber dem CA im gleichen Szenario auftreten. Die ökologische Vorteilhaftigkeit in zwei von drei Kategorien erreicht die HEA im kurzfristigen Zeithorizont mit moderatem Verbesserungspotenzial, jedoch wird von der FCEA im langfristigen Zeithorizont ein weitaus größeres Verbesserungspotenzial zu den Emissionsreduktionen erzeugt, allerdings zu Lasten eines sehr hohen Materialbedarfs. Trotz verstärktem Einsatz von CFK zur Gewichtsreduktion, welches einen hohen Aufwand zur Herstellung und eine schwere Rezyklierbarkeit aufgrund einer möglichen Krebserregung der Fasern aufzeigt, sowie mehr strategisch relevanten Rohstoffen im Flugzeug aufgrund der Elektrifizierung, die zu künftigen Versorgungsrisiken führen können, liegt die Ursache der Umweltwirkungen weiterhin auf den Energieträgern. Demnach sind als Handlungsoptionen zur Strategieableitung für alle drei Kleinflugzeugvarianten bis 2025 bzw. 2050 Energieträger zu reduzieren und zu dekarbonisieren, um als oberstes Ziel die Klimaziele des Flugsektors zu erreichen und auch in Zukunft einen flugbasierten Personentransport zu ermöglichen.

Tabelle 35 Externer Vergleich zu Umweltwirkungen von HEA und FCEA im Zukunftszustand gegenüber dem CA im gleichen Marktetablierungsjahr und Benchmarking zu der im Markt befindlichen realen Beechcraft 1900D.

 <a href="https://leaerospace.com/aircraft-windows/beechcraft-1900d-replacement-windows/">https://leaerospace.com/aircraft-windows/beechcraft-1900d-replacement-windows/</a>	<b>Beechcraft 1900D</b>		
	<b>HEA-2025A, Keep moving forward</b>		
	CO <sub>2</sub> -eq	-11% vs. CA-2025A	-29% vs. CA-2002
	NO <sub>x</sub> -eq	-8% vs. CA-2025A	-26% vs. CA-2002
	Cu-eq	+7% vs. CA-2025A	-12% vs. CA-2002
	<b>FCEA-2050B, Wind of change</b>		
	CO <sub>2</sub> -eq	-65% vs. CA-2050B	-77% vs. CA-2002
	NO <sub>x</sub> -eq	-60% vs. CA-2050B	-72% vs. CA-2002
	Cu-eq	+1804% vs. CA-2050B	+1149% vs. CA-2002
	<b>FCEA-2050C, Fast progress</b>		
	CO <sub>2</sub> -eq	-62% vs. CA-2050C	-74% vs. CA-2002
	NO <sub>x</sub> -eq	-57% vs. CA-2050C	-71% vs. CA-2002
	Cu-eq	+1763% vs. CA-2050C	+1092% vs. CA-2002

Zum Abschluss des Technologievergleichs wird für die drei entwickelten Zukunftsszenarien ein Benchmarking gegenüber den Sektorenzielsetzungen im Flugsektor durchgeführt. Als Zielvorgaben werden die europäischen Zielsetzungen des Flightpath 2050 von 75% CO<sub>2</sub>-Reduktion pro pkm und 90% NO<sub>x</sub>-Reduktion gegenüber typischer neuer Flugzeuge im Jahr 2000 bis zum Jahr 2050 herangezogen (EU COM, 2011). In Tabelle 35 sind die Ergebnisse aus den drei Zukunftsszenarien von HEA bzw. FCEA in der rechten Spalte als Benchmark den Umweltwirkungsergebnissen des CA im Referenzzustand gegenübergestellt, welches ein typisches konventionelles Flugzeug aus dem Jahr 2002 repräsentiert. Es ergibt sich eine noch größere ökologische Vorteilhaftigkeit der elektrifizierten Flugzeuge gegenüber der im Markt befindlichen realen Beechcraft 1900D als Vergleichstechnologie. Die große Bedeutung der TTS und deren prospektiver Ergebnisse kann anhand möglicher Verbesserungspotenziale in den Zukunftsszenarien KMF, WOC bzw. FP von 29%, 77% bzw. 74% CO<sub>2</sub>-eq und 26%, 72% bzw. 71% NO<sub>x</sub>-eq gegenüber den Zielsetzungen von 75% CO<sub>2</sub> und 90% NO<sub>x</sub> für den Flugsektor als Teil des Verkehrssektors bestätigt werden. Für den Rohstoffeinsatz sind keine Zielwerte definiert. Die HEA erreicht in allen betrachteten Wirkungskategorien eine bessere

---

Performance als die aktuell eingesetzte Beechcraft 1900D aus dem Jahr 2002, jedoch ohne die Zielwerte zu erreichen. Die FCEA erzielt in den emissionsbasierten Kategorien bessere Ergebnisse als das CA und kann die anvisierten Zielsetzungen weitestgehend erreichen bzw. im WOC Szenario die THG-Reduktionen sogar übererfüllen. Dennoch kann für elektrisches Fliegen ohne Dekarbonisierung der berücksichtigten Energieträger Strom und Wasserstoff auch ein deutliches Verfehlen der Zielvorgaben eintreten wie die LCA-Ergebnisse von HEA und FCEA im Referenzzustand zeigen. Als erste Handlungsmöglichkeit kann der Einsatz eines hybridelektrischen Kleinflugzeugs mit elektrischen Rollvorgängen während einer Mission identifiziert werden, um die Umweltwirkungen im Flugsektor zu vermindern. Jedoch zeigt erst der Einsatz eines brennstoffzellenelektrischen Kleinflugzeugs mit einer Vollelektrifizierung zur Durchführung einer Flugmission für das Erreichen übergeordneter Zielsetzungen im Flugsektor notwendige Verbesserungspotenziale auf. Demnach ist für die FCEA im spezifischen Zukunftsbild des WOC Szenarios die beste Umweltleistung möglich, sodass diese weiter erforscht und eingesetzt werden sollte. Zur Erfüllung klimapolitischer Ziele muss allerdings ein deutlich erhöhter Rohstoffbedarf in Kauf genommen werden.

Die abschließende Sensitivitätsprüfung inklusive weiteren Parametervariationen für alle Kleinflugzeuge wie dem Einsatz alternativer Kraftstoffe, der Bewertung der NO<sub>x</sub>-Emissionen ohne den Reiseflug oder einem Strommix unter Best Case Entwicklung von 100% Windstrom befindet sich im Ökobilanz-Bericht in Abbildung 12, weiterhin sind die Einordnungen in die Zielsetzungen des Flightpath 2050 in Kapitel 5.2.5 im Detail beschrieben, woraus sich für die HEA drei von fünf überprüfbareren Teilzielen und für die FCEA vier von fünf überprüfbareren Teilzielen erfüllen lassen, weitere Handlungsempfehlungen zur Entscheidungsunterstützung können dem Bericht in Kapitel 5.3.2 entnommen werden (Hanesch & Schebek, 2023).

Aus dieser Forschungsarbeit ergibt sich mit der umgesetzten GNOSIS Fallstudie, dass für das elektrische Fliegen zum Erreichen ehrgeiziger Ziele im Verkehrssektor als sektorales Handeln noch einige Herausforderungen zu bewältigen sind, die bereits jetzt konsequente Maßnahmen auf vielfältigen Ebenen benötigen. Als klimaresiliente Maßnahmen stellen die Inventar-Parameter Regenerative Energien Anteilserhöhung, Herstellungspfadverbesserung, Lebensdauererhöhung und Recyclinginputrateerhöhung der pLCI, neben der bereits in der eLCI berücksichtigten Energieverbrauchsreduktion, gemeinsam die größten Stellschrauben für das ökologische Verbesserungspotenzial an den beiden TTS dar. Sie sind eine Grundvoraussetzung für das elektrische Fliegen, um künftig eine bessere Umweltleistung in allen betrachteten Wirkungskategorien anzustreben. Im Rahmen der Methoden Anwendung konnte das Potenzial von diesen und weiteren Verbesserungsmaßnahmen für einen abgeschlossenen Markthochlauf unter berücksichtigten Zukunftsentwicklungen mit den relevantesten Parametern und deren Zukunftsannahmen im technologischen und zeitlichen Fortschritt aufgezeigt werden. Folglich kann die transparente Umsetzung des Frameworks mit den erhaltenen Ergebnissen aus den Zukunftsszenarien KMF, WOC und FP zum Abschluss einem Erfolgsmessen in Bezug auf die Klima- und Nachhaltigkeitsziele zur Transformation des Flugsektors insgesamt dienen. Mit der durchgeführten prospektiven Sachbilanz, die in der nachgelagerten Stufe die Transferphasen der Wirkungsabschätzung und Auswertung der Ökobilanzierung bereits aufgreift, ist die Anwendung des Frameworks in den drei Methodenteilen für die GNOSIS Fallstudie vollendet.

---

## 7.5 Validierung und Auswertung der Flugtransportergebnisse

Unter Anwendung des in dieser Arbeit entwickelten Frameworks wurde aufgezeigt, dass die Flugzeugalternativen komplett und passgenau nachgebildet und im Anschluss die Resultate mit dem konventionellen Kleinflugzeug verglichen und den Zielsetzungen gegenübergestellt werden können. Die Auswertung dieser potenziellen Umweltwirkungsergebnisse für den regionalen Personentransport in einem elektrifizierten Kleinflugzeug erfolgt nun, indem die erreichten Ergebnisse von HEA und FCEA zunächst validiert und daraufhin mit den übergeordneten sektoralen und nationalen Zielsetzungen auf Korrelation bzw. Abweichung untersucht werden. Die Validierung der Daten wird anhand einer Datenqualitätsbewertung für die Methodenanwendung durchgeführt, um die Methodenresultate hinsichtlich des Verbesserungspotenzials zu überprüfen. Nach bestätigter Eignung werden die anhand des Frameworks erzeugten LCA-Resultate in die nationalen Sektorenzielsetzungen eingeordnet. Im Rahmen dieses abschließenden Benchmarks können die Forschungsergebnisse in Bezug auf das Erreichen des Zielzustands einer nachhaltigen Mobilität ausgewertet werden.

### 7.5.1 Bewertung der Datenqualität für die umgesetzten Fallstudienenergebnisse

Die Methodenanwendung aus der Fallstudie enthält hinsichtlich der verwendeten Daten für den regionalen Personentransport mit den drei Kleinflugzeugalternativen vielfältige Unsicherheiten in LCI, eLCI und pLCI. Um den Unsicherheiten zu begegnen, wurde der semi-quantitative Ansatz der Pedigree-Matrix zur Validierung von Methodik und Ergebnissen anhand der Bewertung der Qualität der verwendeten Sachbilanzdaten angewendet. Diese müssen insbesondere für die signifikanten Parameter eine hohe Genauigkeit besitzen, da sie sich dementsprechend groß im Endergebnis widerspiegeln. Insgesamt soll für die umgesetzte LCA aller Flugzeugmodelle überprüft werden, ob eine hinreichend genaue Abbildung der realen Verhältnisse besteht und sich die Ergebnisse somit sinnvoll für einen Vergleich oder ein Benchmarking anhand von Zielwerten nutzen lassen.

Für die entwickelten Flugzeugmodelle zeigt sich aus (Hanesch, 2024b), dass in den drei Flugzeugmodellen im Referenzzustand die Prozesse für das Lebensende sowie die Prozesse Antriebssystem Transport und Flugzeug Montage der ersten Lebensphase die größte Unsicherheit der Daten aufweisen. Valide Daten zeigen die Prozesse der Nutzenphase, wobei diese als die relevantesten für die Produktsysteme aufgrund des größten Beitrags zum Gesamtergebnis der jeweiligen Umweltwirkungen gelten. An dieser Stelle muss bezüglich Unsicherheiten im Gesamtergebnis angemerkt werden, dass nicht alle Prozesse von CA, HEA und FCEA berücksichtigt wurden, die über den Lebensweg der Flugzeuge vorhanden sind. Beispielsweise wird der Bau des An- und Abflughafens vernachlässigt, zudem sind keine Verladungsprozesse und Energieverbräuche von Bodenmaschinen und Bodenfahrzeugen integriert. Da diese Prozesse für alle Flugzeugalternativen anfallen, sind diese zu vernachlässigen. Weiterhin ist die zusätzliche Infrastruktur für die Energieträger Strom und Wasserstoff zur Versorgung der Flughäfen nicht berücksichtigt, da der Bedarf an Stromtrassen bzw. an Flüssigwasserstoffpipelines aufgrund fehlender Informationen nicht als zusätzlicher Prozess in die eLCI integriert werden kann. Aufgrund der Betrachtung der industriellen Reife mit der erfolgten Marktetablierung in der pLCI sollte der Bedarf an Infrastruktur, heruntergerechnet auf die Anzahl an nutzenden Flugzeugen, zu insgesamt keinem nennenswerten Beitrag an den Gesamtergebnissen führen.



---

Abschließend muss auf die vernachlässigte zusätzliche Klimawirkung von Flugzeugen in der Wirkungsabschätzung aufgrund höhenabhängiger Effekte über 3.000 Fuß eingegangen werden. Dies entspricht 914,4 m und stellt üblicherweise den Beginn des Reiseflugs von Flugzeugen dar, der mehr als Zweidrittel des Kraftstoffverbrauchs im Vergleich zum LTO-Zyklus verursacht. Die zusätzlichen Klimaeffekte entstehen erstens durch einen langsameren Abbau von Treibhausgasen in größeren Höhen, zweitens durch aus Verbrennungsprozessen ausgestoßenen NO<sub>x</sub>-Emissionen, die in der Höhe zwecks Reaktion unter Sonneneinwirkung zu Ozon ebenfalls eine starke THG-Wirkung entwickeln und drittens durch Aerosole wie Rußpartikel, woraus sich Kondensstreifen bilden, die sog. Cirruswolkenbildung (Johanning, 2017). Letztere sind wiederum dafür verantwortlich, dass weniger solare Strahlung auf die Erde gelangt, allerdings gleichzeitig ein deutlich höherer Anteil an Wärmeabstrahlung die Erdatmosphäre nicht mehr verlassen kann, sodass die Cirruswolken den Treibhausgaseffekt ebenfalls erhöhen. Diese zusätzliche Klimawirkung wurde aufgrund fehlender anwendbarer Wirkungsabschätzungsmethoden jedoch in der LCA ebenfalls nicht weiter betrachtet.

Zwischen den neun Flugzeugmodellen ergibt sich, dass die Daten-Zuverlässigkeit insgesamt von dem CA zu den TTS bis hin zu den zukunftsveränderten Flugzeugen sukzessive abnimmt, da der Anteil an verfügbaren Realdaten stetig sinkt. Durch Datengenerierungstechniken und Datenmodifikationstechniken können die fehlenden Primärdaten jedoch mit Sekundärdaten ergänzt werden, sodass vollständige Modelle für alle Flugzeugalternativen und Zeithorizonte entstehen, in denen alle Parameter quantifizierbar sind. Der geringen Zuverlässigkeit der Daten in den Zukunftsveränderungsmodellen zwecks ungesicherter Zukunftsentwicklungen konnte mit zweifach umgesetzten Datenmodifikationstechniken begegnet werden, indem ein Parameterwert durch eine Partizipationstechnik meist in einer Expertenurfrage validiert und teilweise, bei identifiziertem Bedarf, angepasst werden konnte.

Die Auswertung von Unsicherheiten in allen Flugzeugmodellen durch die berücksichtigten Daten kann abschließend anhand einer Datenqualitätsbewertung für fünf Qualitätsfaktoren in fünf Qualitätsstufen nach dem Schema von Ciroth et al. umgesetzt werden, in der mittels Berechnung der geometrischen Standardabweichung und dem geometrischen Mittel für die Faktoren quantifizierte Indikatoren zur Berechnung eines Unsicherheitswertes nutzbar sind (2012). Die Datenqualität wird zunächst anhand von der Pedigree-Matrix für angewendetes Vorgehen und erzeugte Ergebnisse in Tabelle 36 pro Flugzeugmodell insgesamt eingeordnet.

Diese Datenqualitätsbewertung für die neun Flugzeugmodelle lässt sich folgendermaßen beurteilen. Für das Transportmodell wurde eine Vielzahl von Realdaten verwendet, die eine hohe Zuverlässigkeit haben. Dennoch entstammt das Flugzeug aus dem Jahr 2002, welches das letzte Fertigungsjahr darstellt, sodass viele Informationen und Daten zum aktuellen Stand von 2023 veraltet sind. Aufgrund des Fertigungsstandortes in den Vereinigten Staaten wurden zudem Daten aus einem anderen geographischen Raum auf den europäischen Raum mit dem Fokus auf Deutschland verändert, sodass auch für den Qualitätsfaktor Geographisch korrekte Daten eine geringe Datenqualität des CA besteht. Für die Transformationsmodelle ist die Daten-Zuverlässigkeit der HEA größer als für die FCEA, da das Flugzeug weitgehend auf Komponenten des CA basiert und weniger Änderungen insbesondere an der Tragstruktur als für die FCEA vorgenommen wurden. Auch zeitlich kann für die HEA gegenüber der FCEA die Datenqualität als höher eingestuft werden, da das Marktetablierungsjahr nur zwei anstatt 27 Jahre vom Modellierungszeitpunkt abweicht. Dennoch handelt es sich für beide Modelle im Referenzzustand noch nicht um technologisch korrekte Daten, da keine Hochskalierung



auf TRL 9 und keine industrielle Verbreitung erfolgt ist. Dies bewirkt eine große Differenz zum Transportmodell, da die unterste Qualitätsstufe 5 für den Qualitätsfaktor Technologisch korrekte Daten hohen Einfluss auf die Gesamtbewertung der Datenqualität hat, woraus sich Unvergleichbarkeit zwischen den Modellen ergibt. In den Zukunftsveränderungsmodellen der zwei zeitlichen Zustände 2025 und 2050 kann dieser hinreichend verbessert werden. Zwecks Unsicherheit der zukünftigen Entwicklung reduziert sich zwar der Qualitätsfaktor Daten-Zuverlässigkeit in den sechs Zukunftsveränderungsmodellen, jedoch resultiert aus der Parameter-Modifizierung mittels Sekundärdaten eine größere Spannweite an Möglichkeiten für die ungesicherten Zukunftsannahmen, um dieser Unsicherheit zu begegnen. Insgesamt kann sich die Datenqualität signifikant erhöhen, da durch die zeitlich korrekteren Daten im Hintergrundsystem der Datensätze aller Produktsysteme aufgrund der Overall-Parameter eine höhere Qualität erreicht wird. Zudem handelt es sich bei der HEA und FCEA nun auch um technologisch korrekte Daten, da mit den veränderten Upscaling-Parametern die nötige Hochskalierung der in Entwicklung befindlichen Vordergrundsysteme vorgenommen wurde.

Tabelle 36 Datenqualitätsbewertung der Sachbilanz-Modelle anhand der unsicherheitsfaktorenbasierten Pedigree-Matrix (in Anlehnung an Ciroth et al., 2016).

Sachbilanz-Modell von Produktsystem	Daten-Zuverlässigkeit	Daten-Vollständigkeit	Zeitlich korrekte Daten	Geographisch korrekte Daten	Technologisch korrekte Daten
Transportmodell REF CA-2002	2	1	5	4	1
Transformationsmodell REF HEA-2025	3	1	2	1	5
Transformationsmodell REF FCEA-2050	4	1	5	1	5
Zukunftsveränderungsmodell FUT CA-2025A (KMF)	3	1	1	1	1
Zukunftsveränderungsmodell FUT HEA-2025A (KMF)	4	1	1	1	1
Zukunftsveränderungsmodell FUT CA-2050B (WOC)	4	1	2	1	1
Zukunftsveränderungsmodell FUT FCEA-2050B (WOC)	4	1	2	1	1
Zukunftsveränderungsmodell FUT CA-2050C (FP)	4	1	2	1	1
Zukunftsveränderungsmodell FUT FCEA-2050C (FP)	4	1	2	1	1

Datenqualität Bewertungsskala: 1 = hohe Datenqualität, 5 = geringe Datenqualität

Die Unsicherheit der Sachbilanz-Daten der Flugzeugalternativen kann abschließend anhand der semi-quantitativen Berechnung der geometrischen Standardabweichung systematisch bewertet werden. Die Werte der Qualitätsfaktoren entstammen (Ciroth et al., 2012) und der Basis-Unsicherheitsfaktor wird aus der Datenbank ecoinvent 2.0 für den Transportservice mit dem Wert 2,00 für alle Produktsysteme zugeordnet, sodass dieser als erwarteter Mittelwert fungiert. Je näher die verrechneten fünf Qualitätsfaktoren pro Produktsystem in ihrem Gesamtwert an dem Erwartungswert von 2,00 liegen, desto geringer ist die semi-quantitative Unsicherheit der LCA-Ergebnisse. Die daraus ermittelte Fehleranfälligkeit der

Sachbilanz-Daten zeigt mit einem hohen Wert eine große Unsicherheit wie bei der FCEA im Referenzzustand und mit einer geringen Abweichung vom erwarteten Mittelwert eine niedrige Unsicherheit wie im Zukunftsveränderungsmodell des CA für das KMF Szenario. Die Ergebnisse auf Basis der verrechneten Pedigree-Matrix aus den fünf Qualitätsfaktoren und dem Basis-Unsicherheitsfaktor sind für die Flugzeugmodelle in Tabelle 37 abgebildet.

Tabelle 37 Unsicherheitsberechnung der Sachbilanz-Daten für die retrospektive und prospektive LCA.

Semi-quantitative Unsicherheit der LCA-Ergebnisse	
LCI	$GSD_{REF\ CA-2002} = \sigma^2 = e^{\sqrt{\ln(1,54)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,29)^2 + \ln(1,11)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(2,00)^2}} = 2,37$
eLCI	$GSD_{REF\ HEA-2025} = \sigma^2 = e^{\sqrt{\ln(1,61)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,03)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(2,80)^2 + \ln(2,00)^2}} = 3,78$
	$GSD_{REF\ FCEA-2050} = \sigma^2 = e^{\sqrt{\ln(1,69)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,29)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(2,80)^2 + \ln(2,00)^2}} = 3,94$
pLCI	$GSD_{FUT\ CA-2025A} = \sigma^2 = e^{\sqrt{\ln(1,61)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(2,00)^2}} = 2,32$
	$GSD_{FUT\ HEA-2025A} = \sigma^2 = e^{\sqrt{\ln(1,69)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(2,00)^2}} = 2,39$
	$GSD_{FUT\ CA-2050B/C} = \sigma^2 = e^{\sqrt{\ln(1,69)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,03)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(2,00)^2}} = 2,39$
	$GSD_{FUT\ FCEA-2050B/C} = \sigma^2 = e^{\sqrt{\ln(1,69)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,03)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(1,00)^2 + \ln(2,00)^2}} = 2,39$
GSD = geometrische Standardabweichung als Maß quadratischer Abweichung vom Mittelwert	

Zum Abschluss der Validierung zeigt sich auch aus der semi-quantitativen Berechnung der Unsicherheit, dass die Ergebnisse der zwei Transformationsmodelle nicht geeignet sind, um mit dem Transportmodell verglichen zu werden. Für die Daten der ex-ante Sachbilanz existiert eine größere Unsicherheit, die sich gegenüber dem erwarteten Mittelwert fast verdoppelt. Insbesondere die technologisch unsicherheitsbehafteten Daten der Flugzeuge aufgrund von TRL 3 tragen mit einem Beitrag von 2,80 zum berechneten Unsicherheitswert verstärkt bei, mit welchem das Umweltwirkungsergebnis der retrospektiven LCA vom Erwartungswert abweichen kann. Dagegen lässt sich in der prospektiven LCA für die elektrifizierten Flugzeuge sowie für das konventionelle Flugzeug mit den Zukunftsszenarien die Datenqualität insgesamt meist signifikant verbessern, woraus eine geringere Fehleranfälligkeit der erzeugten Wirkungsabschätzungsprofile resultiert, sodass diese besser zum Vergleich geeignet sind. Daher lässt sich mit der Anwendung des Frameworks in drei Methodenteilen die technologische und zeitliche Repräsentativität der Sachbilanz-Daten für die prospektiven Ergebnisse der LCA im Zukunftszustand nachweislich verbessern.

## 7.5.2 Einordnung der Ergebnisse in die nationalen Sektorenzielsetzungen

Die nachgebildeten und validierten Flugzeugmodelle in den drei Szenarien Keep moving forward, Wind of change und Fast progress der beiden Transport-Transformationslösungen des regionalen 19-Sitzer Flugzeugs ermöglichen eine abschließende Auswertung der Ergebnisse für elektrisches Fliegen gegenüber verschiedenen Zielsetzungen. Im Rahmen der

Methodenanwendung konnte in der vorangegangenen Fallstudie bereits ein Benchmarking zu den europäischen Zielsetzungen für den Flugsektor durchgeführt werden. Dieses wurde anhand einem Vergleich der Zukunftszustände von HEA und FCEA mit dem Referenzzustand von der im Markt befindlichen realen Beechcraft 1900D für eine potenzielle Substitution im betrachteten Distanzsegment von Kurzstreckenflügen umgesetzt. Nun wird in gleicher Weise ein Benchmarking zu den sektoralen Klimazielen und den nationalen Nachhaltigkeitszielen vorgenommen, indem die Übereinkunft mittels ausgewählter Zielwerte aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz und der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie überprüft wird.

In Tabelle 38 sind die Klimaziele des Bundes-Klimaschutzgesetzes für den Verkehrssektor in fünf Jahres Minderungsschritten den Ergebnissen der Kategorie Klimawandel zwischen HEA-2025A und CA-2002 sowie FCEA-2050B/C und CA-2002 gegenübergestellt, wobei die THG-Emissionen ausschließlich im Prozess Energieträger Nutzung verglichen werden. Da für die FCEA aufgrund des rein elektrischen Betriebs keine direkten TtW-Emissionen aus einer Kraftstoffverbrennung während der Flugmission auftreten, sondern diese lediglich auf den Prozess Energieträger Bereitstellung als WtT-Vorketten zurückzuführen sind, erreicht die FCEA eine hundertprozentige Verbesserung gegenüber der Vergleichstechnologie. Die Minderungsziele sind zwar im Vergleich zum Jahr 1990 angegeben, da die Beechcraft 1900D in den Jahren 1982 und 2002 gebaut wurde, wird angenommen, dass die 695 gefertigten Exemplare aus Wichita sich nicht wesentlich geändert haben und die Umweltwirkungen des CA bereits im Jahr 1990 auf die gleiche Weise aufgetreten sind.

Tabelle 38 Einordnung in sektorale Klimaziele (§ 4 Anlage 1-3, KSG, 2019) und Benchmarking zur Klimawirkung.

Quell-Kat. [Fallstudie Prozess]	Sektor (mit Quell-Kategorie Beschreibung)	Minderungsziel im Vergleich zu 1990	Benchmarking in der Fallstudie HEA-2025A und FCEA-2050B/C [+ Zielerreichen, -Zielverfehlen]
1.A.3.a [B2]	Verkehr (Transport: Ziviler inländischer Luftverkehr)	-25% in 2025 (123.000.000 t CO <sub>2</sub> -eq)	-29% HEA [+], -100% FCEA [+] CO <sub>2</sub> -eq im Prozess Energieträger Nutzung (TtW) gegenüber 2002
1.A.3.a [B2]	Verkehr (Transport: Ziviler inländischer Luftverkehr)	-48% in 2030 (85.000.000 t CO <sub>2</sub> -eq)	-29% HEA [-], -100% FCEA [+] CO <sub>2</sub> -eq im Prozess Energieträger Nutzung (TtW) gegenüber 2002
1.A.3.a [B2]	Verkehr (Transport: Ziviler inländischer Luftverkehr)	-77% in 2035 (38.000.000 t CO <sub>2</sub> -eq)	-29% HEA [-], -100% FCEA [+] CO <sub>2</sub> -eq im Prozess Energieträger Nutzung (TtW) gegenüber 2002
1.A.3.a [B2]	Verkehr (Transport: Ziviler inländischer Luftverkehr)	-88% in 2040 (20.000.000 t CO <sub>2</sub> -eq)	-29% HEA [-], -100% FCEA [+] CO <sub>2</sub> -eq im Prozess Energieträger Nutzung (TtW) gegenüber 2002

Es zeigt sich, dass nach einem erfolgreichen Markthochlauf der HEA und FCEA unter den zugrunde gelegten Zukunftsentwicklungen in den Szenarien KMF, WOC und FP sich die Ziele in 2025 erfüllen lassen. Bereits ab fünf Jahren nach der Marktetablierung der HEA können die Zielwerte von 48%, 77% und 88% THG-Emissionsreduktionen nicht mehr eingehalten werden. Demzufolge trägt die HEA langfristig zu keiner Erfüllung der Klimaziele für den Verkehrssektor bei. Für die FCEA, bei welcher für alle Zielwerte bereits eine frühzeitige Marktetablierung vorausgesetzt wurde, wären alle Zielwerte erreichbar. Allerdings muss angemerkt werden, dass im Bundes-Klimaschutzgesetz für den Verkehrssektor nur die Quellkategorie der TtW-Kraftstoffverbrennungsaktivitäten laut (IPCC, 2019) berücksichtigt

---

werden. Der Prozess der WtT-Energieträgervorketten ist im Bereich Energiewirtschaft verortet, die acht Prozesse der ersten Lebensphase Flugzeug Herstellung im Bereich Industrie sowie die vier Prozesse der letzten Lebensphase Flugzeug Lebensende im Bereich Abfallwirtschaft und Sonstiges (§ 4 Anlage 1-3, KSG, 2019). Über den gesamten Lebensweg betrachtet, würde die FCEA nur in 2025 und 2030 die Ziele erfüllen, in 2035 nur für WOC und in 2040 für WOC und FP nur mittels 100% Windstrom zur Herstellung von Strom und grünem Wasserstoff, welches weiterführend in der Sensitivitätsprüfung des GNOSIS Ökobilanz-Berichts untersucht wurde und 88% THG-Emissionsreduktionen gegenüber dem CA-2002 erreichen würde. Daher ließen sich für die FCEA mit einer Best Case Entwicklung der beiden Parameter Regenerative Energien Anteilserhöhung im Strommix und Herstellungspfadverbesserung von LH<sub>2</sub> alle Minderungsziele des nationalen Gesetzes in Bezug auf den Verkehrssektor für diesen Teilbereich auch über den Lebensweg erfüllen. Der signifikante Parameter Strommix zeigt für alle drei Wirkungskategorien in der Nutzenphase eine große Veränderungsspanne der Umweltwirkungsergebnisse zwischen Netzstrom bis zu einem hohen Einsatz an regenerativen Energien, woraus sich eine große Relevanz der Zukunftsentwicklung im Energiesektor für einen erfolgreichen Transformationsprozess im Flugsektor bzw. im Verkehrssektor hinsichtlich einer nachhaltigen Mobilität ergibt.

Auch eine ausschließliche Berücksichtigung von 100% Windstrom im Herstellungspfad von Strom und Flüssigwasserstoff ohne alle weiteren modifizierten Inventar-Parameter von WOC bzw. FP würde für die FCEA noch eine Reduktion um 86% THG-Emissionen gegenüber dem CA-2002 erzeugen, wodurch das langfristige Klimaziel aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz von 88% in 2040 fast erreicht werden kann. Hieraus ergibt sich für die bestmögliche Zukunftsentwicklung, dass eine Modifizierung der zwei Overall-Parameter Regenerative Energien Anteilserhöhung und Herstellungspfadverbesserung bereits ohne alle weiteren Parameteränderungen von größter Relevanz zur Verbesserung von elektrifizierten Flugzeugen und somit elektrischem Fliegen ist. Dies zeigt, dass eine alleinige Verbesserung der zwei Parameter als Best Case Szenario für die TTS ausreichen kann, um weitgehend alle Klimazielwerte für den Verkehrssektor sogar über den gesamten Lebensweg in Zukunft zu erfüllen. Jedoch ist das letzte Klimaziel nur erreichbar unter der Voraussetzung, dass sowohl am Startflughafen als auch am Zielflughafen eine vollständig auf Windstrom basierende Stromversorgung inklusive einer daraus bereitgestellten Flüssigwasserstoffherstellung zum Laden der Batterie bzw. zum Auffüllen des Flüssigwasserstofftanks für das Flugzeug zur Verfügung steht. Die Untersuchung in dieser Arbeit zeigt darüber hinaus auf, dass zur Klimazielerreichung ein großer Aufwand für den Verkehrssektor notwendig ist. Denn nur, wenn für jeden Mobilitätstyp, d.h. für jedes Verkehrsmittel, welches im Bundes-Klimaschutzgesetz übergeordnet berücksichtigt ist, sowie für jeden Mobilitätszweck, d.h. für jede Transportdistanz und insbesondere auch für die Langstrecke, das vorgeschriebene Minderungsziel von 88% THG-Emissionsreduktionen in der Nutzenphase sowie dieselben Minderungsziele in den anderen Wirtschaftssektoren für die restlichen Prozesse jedes Verkehrsmittels über den Lebensweg erreicht werden können, sind noch die übergeordneten Zielsetzungen von einer Erderwärmung unter 2°C mit dem Ziel von 1,5°C aus dem Abkommen von Paris einhaltbar.

In Tabelle 39 sind weiterhin die aktuellen Nachhaltigkeitsziele aus der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie dargestellt, die für ein Benchmarking der Fallstudie am geeignetsten erscheinen. Diese sind den Ergebnissen der Wirkungskategorien Klimawandel,

Photochemische Ozonbildung und Mineralischer Ressourcenverbrauch zwischen HEA-2025A und CA-2002 sowie FCEA-2050B/C und CA-2002 gegenübergestellt. In SDG 3, SDG 12 sowie SDG 13 werden die Umweltwirkungen über den Lebensweg verglichen, während in SDG 11 „Städte und Siedlungen inklusiv, sicher, widerstandsfähig und nachhaltig gestalten“ (Die Bundesregierung, 2021) als spezifisches Ziel des Verkehrssektors in Bezug auf Inlandsflüge nur die Nutzenphase gegenübergestellt wird.

Tabelle 39 Einordnung in nationale Nachhaltigkeitsziele (Die Bundesregierung, 2021) und Benchmarking zu den Umweltwirkungen.

Ziel-Nr. [Lebensphase]	Indikatoren- bereich mit Indikator	Nationales Ziel als deutscher Beitrag zur SDG-Erreichung	Benchmarking in der Fallstudie HEA-2025A und FCEA-2050B/C [+ Zielerreichen, -Zielverfehlen]
SDG 3, 3.2.a [A-C]	Luftbelastung: Emissionen von Luftschadstoffen	Reduktion Emissionen von Jahr 2005 auf <u>55%</u> (ungewichtetes Mittel der fünf Schadstoffe) bis 2030	-26% HEA [-], -72%/-71% FCEA [+] NO <sub>x</sub> -eq über den gesamten Lebensweg gegenüber 2002
SDG 11, 11.2.b [B]	Mobilität: Endenergieverbrauch im Personenverkehr	Senkung um 15% bis <u>20%</u> <zu 2005> bis 2030	-29% HEA [+], -100% FCEA [+] Kerosineinsatz in der Nutzenphase (Flugzeug Betrieb) gegenüber 2002
SDG 12, 12.1.ba [A-C]	Nachhaltiger Konsum: Globale Umweltinanspruchnahme durch den Konsum privater Haushalte – Rohstoffeinsatz	Kontinuierliche Reduzierung <bis 2030>	-12% HEA [+], +1149%/+1092% FCEA [-] Cu-eq über den gesamten Lebensweg gegenüber 2002
SDG 13, 13.1.a [A-C]	Klimaschutz: Treibhausgasemissionen	Minderung mind. <u>40%</u> bis 2020 (zu 1990), mind. <u>55%</u> bis 2030 (zu 1990), Erreichung von <u>Treibhausgasneutralität</u> bis 2050	-29% HEA [-], -77%/-74% FCEA [+] CO <sub>2</sub> -eq über den gesamten Lebensweg gegenüber 2002

Die Ziele beziehen sich grundsätzlich auf das Jahr 2030, in welchem die Agenda 2030 für nachhaltige Entwicklung der UN erfüllt werden soll. Unberücksichtigt von abweichenden Marktetablierungsjahren der beiden TTS und Fertigungsjahr der realen Beechcraft 1900D zeigt sich für die Zielsetzungen, dass in SDG 3 die Reduktion der NO<sub>x</sub>-Emissionen nur für die FCEA erreichbar ist. Mit berücksichtigten Zielen des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, das zum Vergleich der Auswirkung auf die Humangesundheit in dieser Arbeit noch besser geeignet ist, da spezifische Zielwerte ausschließlich für NO<sub>x</sub> bereitgestellt werden, ließen sich für die HEA die Ziele von 39% NO<sub>x</sub>-Emissionsreduktionen bis 2030 und 65% NO<sub>x</sub>-Emissionsreduktionen ab 2030 (§ 2 Absatz 1, Absatz 2, 43. BImSchV, 2018) nur erreichen, wenn die Emissionen während dem LTO-Zyklus, jedoch nicht während dem Reiseflug wie gefordert einbezogen werden. Hierbei würde, wie bereits in der Sensitivitätsprüfung des



---

GNOSIS Ökobilanz-Berichts untersucht, die HEA 75% NO<sub>x</sub>-Emissionsreduktionen erreichen, woraus alle Zielwerte einhaltbar wären. Weiterhin kann eine Senkung des Kerosineinsatzes um 20% in SDG 11 für beide Technologiekonzepte gleichermaßen erfüllt werden. Zur Rohstoffnutzung, für die kein quantitativer Zielwert beschafft werden konnte, lässt sich in SDG 12 eine kontinuierliche Reduzierung nur für die HEA feststellen, die FCEA weicht von diesem Ziel signifikant ab. Dagegen ist in SDG 13 wiederum nur ein Erreichen der Zielwerte in 2020 und 2030 für die FCEA möglich. Zwar kann das Ziel der Treibhausgasneutralität auch für das Wasserstoffflugzeug nicht erreicht werden, demgegenüber kann die HEA keines der nationalen Nachhaltigkeitszielwerte im Bereich Klimawirkung erfüllen.

Demnach zeigt die FCEA mit Ausnahme der Rohstoffnutzung ein deutlich größeres Potenzial zum Erreichen der Klima- und Nachhaltigkeitsziele auf und sollte als technologisches Konzept aus dem Flugzeugvorentwurf von TRL 3 im Markthochlauf weiter erforscht und daraufhin als Wasserstoffflugzeug im regionalen Personenflugverkehr statt konventioneller Kleinflugzeuge möglichst zeitnah eingesetzt werden. Dies würde nicht nur dem Flugsektor wie im Flightpath 2050 zu einer größeren Anzahl an erfüllten Teilzielen verhelfen (EU COM, 2011), sondern auch dem Verkehrssektor und der gesamten Bundesrepublik Deutschland im Transformationsprozess zu mehr Nachhaltigkeit dienlich sein. Der Zielzustand einer nachhaltigen Mobilität für die drei Wirkungsbereiche dieser Arbeit lässt sich daher unter Berücksichtigung der sektoralen und nationalen Zielsetzungen für das Wasserstoffflugzeug FCEA weitgehend erreichen. Dies kann jedoch nur unter der Voraussetzung dekarbonisierter Herstellungspfade der Energieträgerbereitstellung und weiteren modifizierten Upscaling-Parametern und Overall-Parametern aus den entwickelten Zukunftsszenarien der pLCl ermöglicht werden. Zu diesem Zweck ergibt sich die Notwendigkeit einer systematischen und nachvollziehbaren Methodenanwendung wie dem in dieser Arbeit entwickelten Framework für das anschließende Benchmarking zu verschiedenen Sektorenzielsetzungen.

Diese abschließende Einordnung der Fallstudienresultate zu den gesetzten Zielen konnte die erzeugten Resultate aus der Methodenanwendung in den größeren Kontext des nationalen Zielerreichens für die Klima- bzw. Nachhaltigkeitsziele setzen. Hieraus lässt sich anhand der Entwicklungspfade bereits darlegen, dass Maßnahmen wie die technologische Weiterentwicklung der Flugzeuge oder ein umfassender Aufbau einer dekarbonisierten Wasserstoffversorgung in den kommenden Jahren benötigt werden, um den Personentransport in einem Flugzeug für einen Transformationspfad in Richtung des Zielzustands einer vollends nachhaltigen Mobilität signifikant zu verbessern.

Als nicht-intendierter Nebeneffekt bleibt für das Wasserstoffflugzeug lediglich die sehr hohe Rohstoffinanspruchnahme und eine schlechtere Rezyklierbarkeit hervorzuheben. Dieser konnte mit der Forschungsarbeit nicht vollständig im Rahmen von Szenarien gelöst werden und steht dem Zielzustand entgegen. Kritisch zu würdigen am Flugzeugvorentwurf der FCEA ist das sehr hohe Abfluggewicht aufgrund des elektrischen Antriebs, welcher bei steigender volumetrischer bzw. gravimetrischer Energiedichte der Batterien positive Effekte auf den Rohstoffbedarf und aufgrund des verringerten Gewichts auf den Energieträgereinsatz im Betrieb hat, woraus wiederum die benötigte Menge an Batterien für den Austausch reduziert wird. Weiterhin ist die Rezyklierbarkeit der FCEA in ausgewählten Komponenten während dem Betrieb und zum Lebensende problematisch. Dies ist einerseits auf den hohen Anteil des schwer trennbaren Verbundwerkstoffs CFK in der Tragstruktur zurückzuführen, dessen Fasern im Brandfall unter Verdacht stehen, Krebs zu erzeugen. Andererseits treten aufgrund



---

des häufigen Komponentenaustauschs mit einem resultierenden hohen Materialeinsatz von kritischen Rohstoffen wie Lithium im elektrischen Antrieb weitere Herausforderungen zur Umsetzung des Recyclings auf. Der Komponentenaustausch erfolgt bereits während den 20 Jahren Betrieb und nicht erst am Lebensende, woraus zusätzliche Sicherheitsrisiken durch eine mögliche Beschädigung des Flugzeugs entstehen können. Zudem wurde im Flugzeugkonzept bezüglich der Komponentenanzahl kein Fokus auf die Rezyklierbarkeit gelegt, sodass der Austausch von Komponenten wie Batterien erschwert wird. Die problematische Rezyklierbarkeit des elektrifizierten Flugzeugs FCEA hat weiterhin Auswirkungen auf die Versorgungssicherheit von Rohstoffen. Da aufgrund einer hohen Nachfrage an kritischen Rohstoffen in Zukunft Versorgungsengpässe auftreten und daraus Preissteigerungen resultieren können, sind ohne eine signifikante Lebensdauererhöhung der Komponenten im elektrischen Antrieb für den Komponentenaustausch zusätzliche ökonomische Effekte möglich. Dieser nicht-intendierte Nebeneffekt wird anhand der Untersuchung der Kategorie Mineralischer Ressourcenverbrauch mit dem nachgelagerten Wirkungsendpunkt der Ressourcenknappheit ersichtlich, sodass in Bezug auf eine holistische Betrachtung der neuartigen Technologie auch bei einem nur unzureichenden Benchmarking zu bestehenden Sektorenzielen empfohlen wird, alle für die Entscheidungsunterstützung relevanten Bereiche der Umweltwirkungen wie in dieser Forschungsarbeit Auswirkungen auf Klimawandel, Humangesundheit und Rohstoffnutzung zu untersuchen.

Die Zuordnung der Forschungsergebnisse zu den übergeordneten Nachhaltigkeitszielen, die nicht nur national, sondern auch global in ähnlicher Weise zu erreichen sind, verdeutlicht die Relevanz, sich mit den Möglichkeiten einer Zielerreichung von Transformationslösungen frühzeitig auseinanderzusetzen. Besonders Transport-Transformationslösungen lassen sich nicht unmittelbar entwickeln und direkt großflächig einsetzen, sodass deren komplexer Markthochlauf nicht nur für die Forschung eine große Hürde darstellt. Vielfältige Herausforderungen für den Verkehrssektor konnten mit dieser Arbeit zwar adressiert, jedoch nicht vollständig auf Forschungsebene bewältigt werden. Die entwickelte Methodik für Verkehrsmittel und die Anwendung auf zwei elektrifizierte regionale Kleinflugzeuge kann dennoch bereits jetzt eine erste Einschätzung geben, ob die Klima- und Nachhaltigkeitsziele in Zukunft erreicht werden können und vielmehr noch, welche vorausgesetzten Maßnahmen hierfür notwendig sind. Anhand der Anwendung des systematischen Frameworks und der transparenten Ergebniserzeugung konnten für beide spezifische TTS des Flugsektors unter einer Veränderung der signifikantesten Parameter Regenerative Energien Anteilserhöhung und Herstellungspfadverbesserung für die Nutzenphase der Flugzeuge aufgezeigt werden, dass u.a. die ehrgeizigen nationalen Klimaziele in den kommenden Jahren erreichbar sind.

Dies erfordert jedoch schon jetzt ein konsequentes Handeln auf vielfältigen Ebenen, da für die TTS in einigen Ergebnissen noch eine Distanz zum Zielzustand verdeutlicht wurde, in denen die Anforderungen bezüglich einer nachhaltigen Mobilität für die beiden neuartigen Flugzeuge HEA und FCEA teilweise erst nach umgesetzten Maßnahmen erfüllt sind. Mit dem großen Beitrag der Forschungsergebnisse zum Erreichen der Klima- und Nachhaltigkeitsziele können klimaresiliente Entwicklungspfade einerseits zur Begrenzung der Erderwärmung auf 1,5°C und andererseits zum Erreichen einer nachhaltigen Entwicklung anhand ausgewählter SDG bestätigt werden. Im Anschluss wird auf die Resultate der Forschungsarbeit in Bezug auf die Methodenentwicklung, die Methodenanwendung sowie auf die erzeugten Forschungsergebnisse kritisch eingegangen, um diese weiterführend zu diskutieren.

### **8.1 Einordnung der Forschungsarbeit in den Kontext der Literatur**

Wie bereits im Stand der Wissenschaft dargelegt und in Kapitel 3.1.1 definiert wurde, besteht eine Forschungslücke für eine allumfassende und systematisch anwendbare Methode zur Nachbildung neuartiger und zukunftsgerichteter Verkehrsmittel, die mit dem Framework in drei Methodenteilen geschlossen werden sollte. Auch wenn keine vergleichbare Methodik wie in dieser Arbeit existiert, lässt sich das entwickelte und angewendete Vorgehen dennoch Forschungsarbeiten mit ähnlichen Vorgehensweisen gegenüberstellen. Zu diesem Zweck wird ein abschließender Vergleich mit anderen Forschungsstudien gezogen, die ähnliche Forschungsmethoden entwickelt und für Transporttechnologien angewendet haben.

#### **8.1.1 Literaturvergleich zur Entwicklung des Frameworks**

Für eine Bewertung des methodischen Neuwerts soll das entwickelte Framework in den einzelnen Bestandteilen gegenüber bekannter Literatur abgegrenzt werden. Ein Vorgehen als erste Erweiterung der Sachbilanz zur Nachbildung neuartiger Technologien konnte nicht gefunden werden, jedoch existieren für die zweite Erweiterung der Sachbilanz zur Nachbildung zukünftiger Technologien Überschneidungen zu anderen Vorgehensweisen.

Im Detail bestehen die wissenschaftliche Integrität und Einzigartigkeit des Frameworks aus verschiedenen Aspekten. Die zweigeteilte Modellierung für retrospektive und prospektive LCA-Ergebnisse ermöglicht eine unterschiedliche Verwendung einerseits zur Bestimmung von Optimierungspotenzial und andererseits für einen Vergleich bezüglich der ökologischen Vorteilhaftigkeit. Die Stufen der Sachbilanz-Erweiterungen gründen sich auf dem Vorgehen der LCI von erstens einer qualitativen Nachbildung in Form einer Parameter Identifizierung, zweitens einer Quantifizierung in Form einer Parameter Erarbeitung und drittens einer Modellverrechnung in Form einer Bestimmung von verrechneten Prozessen, Parametern und Flüssen zur Zuordnung des abschließenden Sachbilanz-Ergebnisses und der Weiternutzung in der Wirkungsabschätzung.

In der ex-ante Sachbilanz wird das Modell eines neuartigen Produktsystems systematisch ausgebildet. Für dieses werden zunächst physische Änderungen qualitativ klassifiziert und Transformations-Parameter vorgestellt. Daraufhin werden vorhandene Daten nutzbar gemacht und für unterschiedliche TRL mit Datengenerierungstechniken vervollständigt. Abschließend sind alle Änderungen zu verrechnen und in drei Level ersichtlich zu machen. Ein solches Vorgehen konnte noch in keiner anderen Studie festgestellt werden, sodass in der Gegenüberstellung zu dieser Methodenentwicklung ex-ante Produktsysteme üblicherweise ohne eine entsprechende eLCI umweltbewertet werden. Eine Möglichkeit stellt die ausschließliche Nachbildung in einer standardisierten LCI dar, jedoch werden aufgrund teilweiser Vernachlässigung von identifizierten Herausforderungen der TTS diese ohne eine nachgelagerte pLCI mit Zukunftsänderungen wie einem verbesserten Strommix modelliert, wie in der Metastudie von Dillman et al. aufgezeigt wurde (2020). Weiterhin können aufgrund dem Fehlen eines systematischen Vorgehens für neuartige Technologien diese zunächst in der standardisierten LCI für retrospektive LCA-Ergebnisse und im

---

Anschluss daran in einer pLCI erneut modifiziert nachgebildet werden, um zu abschließenden prospektiven LCA-Ergebnissen zu gelangen wie u.a. in der Studie von Villares et al. umgesetzt wurde (2016). Viele Studien wenden allerdings keine zweigeteilte Modellierung an oder zeigen dieses Vorgehen nicht hinreichend auf, sodass Daten und Ergebnisse dieser pLCA-Studien nur modifiziert an Entscheidungsträger übermittelt werden wie u.a. in (Pizzol et al., 2021). Darüber hinaus erzeugen vereinzelt Studien zu TTS, jedoch besonders im Flugsektor, nicht einmal pLCA-Ergebnisse in den vier Phasen einer Ökobilanz unter Anwendung der ISO Norm, sodass zwar prospektive Umweltwirkungsergebnisse, allerdings keine robuste Datengrundlage über die ex-ante Produktsysteme übermittelt werden wie in (Strathoff et al., 2022). Insbesondere eine fokussierte Daten-Vollständigkeit für TTS in der Methodenentwicklung, die in dem separaten Vorgehen der eLCI dieser Arbeit übergeordnet zur Vergleichbarkeit der funktionellen Einheit adressiert und mit der Fallstudienanwendung bestätigt werden konnte, ließ sich noch in keiner bekannten Studie identifizieren. Demnach weist die schrittweise Vorgehensanleitung zur systematischen und kompletten Nachbildung neuartiger Technologiealternativen wie elektrifizierter Fahrzeuge in der eLCI einen vollständigen Neuwert auf.

In der prospektiven Sachbilanz können Gemeinsamkeiten in der systematischen Entwicklung von Zukunftsszenarien für Modelle zukunftsgerichteter Produktsysteme zu anderen Studien festgestellt werden, da in dieser Arbeit auf vorhandenem Wissen aufgebaut werden sollte. Besonders eine strukturierte Vorgehensweise unter Aufzeigen des Entwicklungsprozesses zur Parameter-Modifizierung in der zweiten Stufe zunächst mit einer Einordnung der Inventar-Parameter in die Veränderungslevel, darauf die Nutzung von Datenmodifikationstechniken für konkrete Zukunftsannahmen und schließlich die Sammlung der Änderungen in einer systematischen Auflistung, die sich in ein bereitgestelltes Parametermodifikationsverzeichnis zur Dokumentation überführen lässt, ist in dieser Tiefe bislang noch nicht behandelt worden. Die größten methodischen Gemeinsamkeiten zum entwickelten mehrstufigen Vorgehen der pLCI existieren in den vier Studien, welche die Methode der Szenarioanalyse auch in die Sachbilanzphase integrieren (Cucurachi et al., 2022; Langkau et al., 2023; Mendoza Beltran et al., 2020; Spielmann et al., 2005). Bei diesen finden sich die meisten Schritte der vorliegenden Arbeit trotz unterschiedlichem Namen und Reihenfolge wieder, obwohl sich das Vorgehen im Detail unterscheidet. Insgesamt ist die Vorgehensweise einer prospektiven Sachbilanz in zwei Stufen bei Spielmann et al. und Mendoza Beltran et al., in drei Stufen bei Langkau et al. und dieser Forschungsarbeit sowie in vier Stufen bei Cucurachi et al. vorhanden. Die komplette erste Stufe der pLCI zeigt mit qualitativ identifizierten Parametern hohe Überschneidungen zu den beiden letzten Studien auf, die zweite Stufe mit den quantitativen Zukunftsannahmen orientiert sich an der akribischen offengelegten Modifizierung des Strommix-Parameters von Mendoza Beltran et al. und die dritte Stufe ist mit der Erzeugung von einer Konsistenzmatrix sowie einem Parameterverzeichnis für pLCA ebenfalls bei Spielmann et al. und Cucurachi et al. zu finden, wobei es das Bestreben dieser Arbeit war, alle Potenziale in einem Framework zu vereinen.

Die spezifischen Schritte dieser Arbeit basieren auf den kombinierten pLCI-Studien. Bis auf Schritt vier sind alle Schritte in mindestens einer von diesen enthalten und nur Schritt fünf wird in allen verglichenen Studien integriert. Den wichtigsten Neuwert stellen Schritt vier und Schritt neun dar, wobei auch andere Schritte in dem systematischen Vorgehen verbessert, stark erweitert oder reduziert wurden, um eine bessere Anwendbarkeit zu

---

ermöglichen. Gewählt wurde die vorgestellte Reihenfolge, da die erste Stufe von Spielmann et al., Cucurachi et al. und Langkau et al. bereits als valide bestätigt wurde. Die zweite Stufe wird ausgebaut um einen vorgelagerten Bestandteil in Schritt vier und einen nachgelagerten Bestandteil in Schritt sechs, welche den Haupt-Schritt des pLCI-Vorgehens der Parameter-Veränderung in Schritt fünf umrahmen und für eine valide Modifizierung aufgrund der großen Zukunftsunsicherheit für notwendig befunden wurden. Die dritte Stufe differenziert wieder stärker zu den untersuchten Studien, da in Schritt sieben zunächst Zukunftsszenarien kombiniert, in Schritt acht daraufhin die Szenarien ins Modell integriert und in Schritt neun abschließend die Szenarien mit einer Narrative kommuniziert werden sollen.

Eine verdeutlichte Konformität mit den Prinzipien der Szenarioanalyse von der Vorausschau Gemeinschaft und eine ausführliche schrittweise Anleitung für den Entwicklungsprozess der Zukunftsszenarien in LCA zeigen Langkau et al. mit dem SIMPL Ansatz auf, für welchen ein ausführlicherer Vergleich erfolgt (2023). In der direkten Gegenüberstellung des Vorgehens besitzt SIMPL acht Schritte im Vergleich zu neun Schritten der pLCI und die Schritte vier, sechs, acht sowie neun fehlen in diesem. In der pLCI-Methode ist die SIMPL Stufe zwei in Schritt fünf und die SIMPL Stufe drei in Schritt sieben zusammengefasst. In Erweiterung des SIMPL Ansatzes arbeitet diese Forschungsarbeit noch stärker mit den drei Kernstufen der Szenarioanalyse und weiteren Erkenntnissen aus der Literatur, welche die Prinzipien der Szenarioanalyse anwenden. Wichtigste Festlegungen zum Ablauf dieser Arbeit basieren auf den drei Kernstufen der Vorausschau Forschungsgemeinschaft und umfassen die Identifizierung von Schlüsselfaktoren und deren Validierung in Stufe eins, die Erarbeitung quantitativer Werte mit Analysen von Ursache, Umsetzung und Folgen der Modifizierung in Stufe zwei sowie die Bestimmung von Framework-Resultaten zunächst mit dem Abschluss des Szenarioentwicklungsprozesses, daraufhin mit dem Abschluss des ökobilanziellen Nachbildungsprozesses und schließlich mit dem Abschluss des Framework-Prozesses für das Methodenergebnis in Stufe drei.

Der SIMPL Ansatz als neueste Forschungsmethode zeigt zwar kein Vorgehen für die eLCI auf, besitzt jedoch für die pLCI große Gemeinsamkeiten mit dieser Arbeit, da dieser ebenfalls auf Kosow und Gaßner basiert, von denen viele Vorgehensweisen als Grundlage verwendet wurden. Es existieren Überschneidungen in der ersten Stufe bei der Identifizierung von Schlüsselfaktoren, in der zweiten Stufe bei der Erarbeitung von Zukunftsannahmen und in der dritten Stufe bei der Festlegung von Zukunftsszenarien mit ähnlichem oder identischem Vorgehen. Sollte die Vorgehensweise des SIMPL Ansatzes gewählt werden, wird empfohlen, davor zusätzlich die eLCI zu kombinieren, da diese in dem Ansatz nicht berücksichtigt ist, jedoch in vielfältigen Übernahmen und Übertragungsschritten die prospektive Untersuchung zur Nachbildung der neuartigen Technologie hinsichtlich einer Zukunftsentwicklung für Ökobilanzierer vereinfachen kann. Es wird lediglich auf Datengenerierungstechniken für neuartige Technologien in der pLCI von Cucurachi et al. als Vorgängerstudie eingegangen (2022). Jedoch ist es zur besseren Unterscheidung von neuartigen und zukunftsgerichteten Technologien ratsam, die Parameter-Generierung wie in diesem Framework auf die eLCI auszulagern, um in einem ersten Zwischenergebnis nicht-modifizierte Sachbilanz-Daten zu erhalten. Erst dann sollten sich Ökobilanzierer in der pLCI auf die reine Parameter-Modifizierung fokussieren und für unterschiedliche Modifikationszwecke auf die nicht-modifizierten Daten aus der Nachbildung der TTS zurückgreifen.

---

Die Erweiterung der Ökobilanzierung anhand des Frameworks im dritten Methodenteil ist für die pLCI etwa zur Hälfte auf den SIMPL Ansatz zurückzuführen, der als neueste Methode an vorhandenem vorherigem Wissen einige, jedoch nicht alle relevanten Aspekte vereint. Der erste Schritt wird reduziert auf die Inventar-Parameter Untersuchung, da bereits alle signifikanten Parameter zum Ende der eLCI im Rahmen der LCA im Referenzzustand bestimmt wurden. Der zweite und dritte Schritt, welche größtenteils auf Kosow und Gaßner zurückzuführen sind (2008), werden komplett übernommen, woraus sich zum SIMPL Ansatz 95% Übereinstimmung in der ersten Stufe ergeben. Dagegen ist der vierte Schritt komplett neu, der fünfte Schritt stark erweitert und der sechste Schritt ebenfalls neu hinzugekommen, woraus sich zum SIMPL Ansatz 22% Übereinstimmung in der zweiten Stufe ergeben. Der siebte Schritt wird wiederum komplett übernommen, der ebenfalls auf Kosow und Gaßner basiert und um ein Parametermodifikationsverzeichnis als Datensteckbrief erweitert wird, dagegen sind der achte und neunte Schritt neu integriert worden, woraus sich zum SIMPL Ansatz 33% Übereinstimmung in der dritten Stufe ergeben. Jedoch kann der gut elaborierte SIMPL Ansatz noch nicht auf eine vollumfänglich methodisch ausgearbeitete Erarbeitung von Zukunftsannahmen in der zweiten Stufe zurückgreifen, sodass das neu entwickelte Framework dieser Arbeit auch hier einen Fortschritt in der pLCA-Methodenentwicklung mit einem systematischen Vorgehen aufweist. Auch wenn die in dieser Forschungsarbeit entwickelte prospektive Sachbilanz mit dem methodischen Verbund aus Sachbilanz und Szenarioanalyse in einigen Schritten auf den gut elaborierten SIMPL Ansatz zurückgreift, ist insbesondere die zweite Stufe der quantitativen Modifizierung von Parametern mit abschließend erzeugten Zukunftsannahmen darin nicht vollumfänglich methodisch dargelegt, weshalb in der pLCI ein Fokus auf die Methodenentwicklung in dieser Stufe gelegt wurde.

Die methodischen Überschneidungen für die einzelnen Schritte im mehrstufigen Vorgehen der pLCI sind von der entwickelten Vorgehensweise des Szenarioentwicklungsprozesses der vier geeignetsten Studien und, falls vorhanden, von der Anwendung der erzeugten Resultate im Vergleich zu dieser Forschungsarbeit in Anhang B24 und B25 dargestellt. Zur besseren Verdeutlichung der Gemeinsamkeiten, welche als Fundament dieser Arbeit gedient haben, wurden die Stufen und Schritte der pLCI in die Stufen und Schritte der anderen Studien integriert sowie die gleiche Nummerierung verwendet. Obwohl sich das explizite Vorgehen der neun Schritte der pLCI mit keinem schrittweisen Vorgehen der anderen Studien deckt und in ihrer Anwendbarkeit eines systematischen Vorgehens diese weitaus übertreffen, können die einzelnen Schritte und Stufen dieser Arbeit insgesamt als ein repräsentatives Vorgehen zur Entwicklung von Zukunftsszenarien bestätigt werden. Folglich kann mit dieser Arbeit eine holistische Vorgehensweise präsentiert werden, die bestehendes Wissen vereint und um neue sowie tiefergehende Perspektiven zur verbesserten Anwendung erweitert.

### **8.1.2 Literaturvergleich zur Anwendung des Frameworks**

Das Framework wurde durch eine kritische Durchsicht und Analyse der bisherigen Literatur definiert. Weiterhin basiert es auf Erfahrungen und Anpassungen, die u.a. im Rahmen der Fallstudienanwendung des GNOSIS Projekts aus der Erprobung von CA, HEA und FCEA in drei verschiedenen Methodendurchführungen erhalten wurden. Zusätzlich sind in das Framework weitere Erkenntnisse von verschiedenen Akteuren aus der Expertenbefragung für



---

die Methodenanwendung in der GNOSIS Fallstudie sowie aus der Teilnahme an einem pLCA Workshop von den Autoren des SIMPL Ansatzes zum Aufbau der Methodenkompetenz für die Entwicklung des Frameworks im dritten Methodenteil der pLCI geflossen.

Insgesamt ergeben die Vergleichsstudien zur Anwendung des Vorgehens auf eine Fallstudie wie in Kapitel 7 eine hohe Veränderungsspannweite der Umweltwirkungsergebnisse unter der angewendeten Szenarioanalyse. In der exemplarischen Anwendung des Vorgehens auf Verkehrsmittel zeigen beide Studien, die quantitative Umweltwirkungsergebnisse ermittelt haben, einerseits für strombasierten Bahntransport gegenüber Bus und Pkw (Spielmann et al., 2005) sowie andererseits für elektrische Pkw gegenüber konventionellen Pkw (Mendoza Beltran et al., 2020), dass eine ähnlich große Veränderungsintensität (siehe Anhang B24) wie für die Ergebnisse dieser Forschungsarbeit (siehe Anhang B25) durch die Integration von Zukunftsszenarien existiert.

Die Umweltwirkungsergebnisse zu Klimawandel, Humangesundheit und Rohstoffnutzung von elektrischen Pkw werden denen von elektrifizierten Kleinflugzeugen dieser Arbeit genauer gegenübergestellt, wobei bei Mendoza Beltran et al. die prospektiven Ergebnisse lediglich auf den Strommix als einzigen modifizierten Parameter zurückführbar sind (2020). Im Vergleich zeigt sich anhand der Zukunftsannahmen ebenfalls im entfernten Zeithorizont, dass zur Klimawirkung große Verbesserungsvarianz für das elektrische Fahrzeug existiert, jedoch ohne Strommixverbesserungen die TTS keine Vorteilhaftigkeit gegenüber dem CT aufweist. Weiterhin zeigen Mendoza Beltran et al. genau wie diese Arbeit die Relevanz der Modifizierung des konventionellen Transports für einen aussagekräftigen Vergleich auf, die allerdings aufgrund der geringen Pfadabhängigkeit vom Strommix deutlich geringer in den Ausprägungsänderungen ausfällt. Zudem ist keine technologische Zukunftsentwicklung der beiden Fahrzeuge als Advance-Parameter und Upscaling-Parameter berücksichtigt worden. Durch die hohe Abhängigkeit der Luftschadstoffergebnisse von der Kraftstoffverbrennung werden trotz zukünftigem Strommix nur geringe Änderungen für das CT aufgezeigt, diese sind für die TTS deutlich größer, jedoch nicht so signifikant wie für THG. Zur Bewertung der Ressourcenknappheit zeigt sich bei Mendoza Beltran et al. das gleiche Ergebnis einer vielfach schlechteren Umweltleistung für das elektrische Fahrzeug gegenüber dem CT. Allerdings führt in dieser Arbeit das um Zweidrittel höhere Abfluggewicht der FCEA gegenüber dem CA im Jahr 2050 sowie der weiterhin häufige Komponentenaustausch im elektrischen Antrieb zu weitaus größeren Verschlechterungen. Hinzu kommt, wie in der Einleitung dieser Arbeit dargelegt, dass das konventionelle Flugzeug gegenüber allen Verkehrsmitteln den geringsten Rohstoffeinsatz pro funktionelle Einheit besitzt. Die Studie bestätigt die Ergebnisauswertung dieser Arbeit, dass besonders wegen dem Strommix große Notwendigkeit zur Entwicklung und Nutzung von Zukunftsszenarien besteht, wenn Transport-Transformationslösungen auf Basis einer strombasierten Energienutzungsveränderung zur Entscheidungsunterstützung in Bezug auf ökologische Vorteilhaftigkeit mit konventionellem Transport verglichen werden.

In dieser Forschungsarbeit werden jedoch die Auswirkungen vielfältiger Inventar-Parameter untersucht, die nicht nur den Strommix, sondern besonders materialbasierte Veränderungen in Vordergrund- und Hintergrundsystem berücksichtigen. Diese Untersuchung bezüglich Umweltauswirkungen von elektrifizierten Kleinflugzeugen, die u.a. einen nicht-intendierten Nebeneffekt für die Rohstoffnutzung aufgrund der Fahrzeugelektrifizierung und infolge dessen Knappheitsrisiken und mögliche Versorgungsgpässe aufzeigt, ist noch in keiner bekannten Studie in einem so erheblichen Ausmaß verdeutlicht worden. Es kann jedoch auch



---

mit den Flugzeugresultaten die größte Signifikanz für den Strommix ermittelt werden, der sich in den zwei Overall-Parametern Regenerative Energien Anteilserhöhung zur direkten Stromnutzung und Herstellungspfadverbesserung zur Wasserstoffherstellung sowie weiteren modifizierten Inventar-Parametern widerspiegelt. Die Anwendung von pLCI für die Transportfallstudie von Mendoza Beltran et al. verdeutlicht, wie auch in dieser Arbeit, den Einfluss des modifizierten Strommix auf vielfältige Bereiche im Produktsystem. Dies zeigt, dass ein Parameter nicht nur zu mehreren Flussmodifikationen führen, sondern auch andere Parameter in den Ergebnissen verändern kann. Die erhöhte Komplexität für Produktsysteme von Fahrzeugtransporten macht eine transparente Auflistung von Daten wie im Parametermodifikationsverzeichnis oder den Zukunftsveränderungsmodellen notwendig, um keine Veränderungen zu vernachlässigen. In keiner bekannten Studie wurden bislang Vorlagen für eine so stringente und adaptierbare Vorgehensweise wie in (Hanesch, 2024a) zur Veranschaulichung des Szenarioentwicklungsprozesses übersichtlich aufgelistet und für komplette sowie passgenaue Sachbilanz-Modelle von Fahrzeugtransporten wie in (Hanesch, 2024b) zur unterstützenden Nachbildung komplexer Produktsysteme in der Sachbilanz bereitgestellt, sodass dies einen weiteren Neuwert der Arbeit darstellt.

Im direkten Vergleich von Ergebnissen für die Klimawirkung im Flugsektor, die jedoch ohne eine fundierte Szenarioanalyse wie in den zuvor aufgezeigten pLCI-Methoden erfolgt ist, ergibt sich für die im Stand der Wissenschaft identifizierten Studien eine Korrelation der prospektiven Ergebnisse. Ploetner et al. ermitteln in drei Zukunftsszenarien BAU, BETTER und BEST Verbesserungen von 41%, 60% und 89% THG-Emissionsreduktionen gegenüber einem konventionellen Flugzeug, allerdings ohne eine datenbasierte Dokumentation der Zukunftsverbesserungen, die nur für das hybridelektrische Flugzeug bis 2035 angenommen wurden, sowie ohne die Umsetzung einer LCA nach ISO Norm (2016). Im BEST Szenario von 100% regenerativen Energien werden von Barke et al. für ein generisches elektrisches Flugzeug unter Berücksichtigung von WtT- und TtW-Emissionen sowie elektrischem Antrieb bis 2050 Zukunftsverbesserungen von 92% THG-Emissionsreduktionen im Vergleich zum CA im Referenzzustand erzeugt, jedoch zwecks Fokus auf Energieträger ohne die Durchführung einer vollständigen Lebenswegbetrachtung und ohne die Berücksichtigung eines technisch machbaren Flugzeugs auf mindestens TRL 3 (2022a). In beiden Untersuchungen reichen die pLCA-Resultate an den Umfang der Methodik und die Detailtiefe der Flugzeugresultate dieser Fallstudie nicht heran zwecks fehlendem transparenten Szenarioentwicklungsprozess der Parameter-Modifizierung. Die aus dem Framework erzeugten Umweltwirkungsergebnisse der GNOSIS Fallstudie zeigen dennoch ähnliche Größenordnungen wie Ploetner et al. mit THG-Emissionsreduktionen von 29% im KMF Szenario von 2025, 77% bzw. 74% im WOC bzw. FP Szenario bis 2050 sowie 88% in einer Best Case Entwicklung. Aufgrund der dargelegten Ursachen und Unsicherheiten in den prospektiven Daten aus der Anwendung von LCI, eLCI und pLCI dieser Arbeit sind die Methodenresultate folglich zur fundierten Entscheidungsunterstützung besser geeignet. Insgesamt zeigt der Vergleich für den Untersuchungsgegenstand dieser Forschungsarbeit eine Übereinstimmung hinsichtlich des großen Zukunftspotenzials für das elektrische Fliegen auf, wenn der Strommix bestmöglich dekarbonisiert wird. Eine ausführlichere Diskussion der Flugtransportergebnisse aus der GNOSIS Fallstudie mit einer Ergebnisvalidierung gegenüber den erzeugten Ergebnissen anderer Studien ist dem Ökobilanz-Bericht in Kapitel 5.2.4 zu entnehmen (Hanesch & Schebek, 2023).

---

Weitere Verbesserungspotenziale, mit denen sich Resultate aus dem Framework gegenüber anderen LCA-Studien abheben, liegen in einer handhabbaren Erweiterung der Sachbilanz mit der separaten eLCI und der schrittweise umgesetzten pLCI. Einerseits können zwischen den Sachbilanz-Modellen somit effizient Daten übertragen werden, andererseits werden die Daten zwecks unterschiedlicher Qualität nicht vermischt, da die Methodenteile separiert angewendet werden. Gleichzeitig ermöglicht dies, die pLCI auch ausschließlich für das CA umzusetzen, um das konventionelle Fahrzeug auf Basis der vorgelagerten standardisierten LCI modifiziert nachzubilden. Ein aussagekräftiger Vergleich wird erzeugt, wenn zumindest im entfernten Zeithorizont für alle Technologien Zukunftsveränderungen umgesetzt werden. Die Anwendung des Frameworks auf die drei 19-Sitzer Flugzeuge hat zudem eine Symbiose vielfältiger Parameter zueinander verdeutlicht, welche die Komplexität zur Berechnung des Produktsystems erhöhen. Den Herausforderungen für das Produktsystem Fahrzeugtransport konnte auf Basis der separaten Nachbildung in LCI, eLCI und pLCI sowie dem Aufzeigen des Entwicklungsprozesses der Sachbilanz anhand des editierbaren Parameterverzeichnisses begegnet werden, sodass die Resultate systematisch erzeugt und nachvollziehbar aufbereitet zur Entscheidungsunterstützung genutzt werden können. Die Methodenanwendung in der GNOSIS Fallstudie zeigt in einem umfassenden Spektrum modifizierter Inventar-Parameter vielfältige weitere Aspekte wie die zukünftige Materialperspektive auf, adressiert u.a. durch höhere Lebensdauern und Recyclingquoten. Dies erweitert die Parameter-Modifizierung, die zum Vergleich eines konventionellen und elektrischen Pkw bei Mendoza Beltran et al. mittels Variation des Strommix lediglich als ein ausgewählter Overall-Parameter umgesetzt wurde.

Das Alleinstellungsmerkmal des dritten Methodenteils dieser Arbeit insbesondere in Stufe zwei kann mit der systematischen Erarbeitung von Zukunftsannahmen für die drei 19-Sitzer Flugzeuge unter Beweis gestellt werden, da ein nachvollziehbares Aufzeigen von Ursachen und Folgen für die einzelnen Parameter ausführlich und adaptierbar ausgearbeitet wurde. Dies soll Ökobilanzierern die Modifizierung für unsicherheitsbehaftete Zukunftsannahmen vereinfachen, um Veränderungen von Daten nach stringentem Vorgehen umzusetzen und nachvollziehbar sowie reproduzierbar für Nutzer der LCA-Ergebnisse aufzubereiten. Die vorgestellte pLCI in Kombination mit der eLCI und auf Basis der LCI bietet somit ein akribisch genaues, durchführbares Vorgehen für Ökobilanzierer sowie einen Mehrwert bezüglich der Ergebnisqualität für Entscheidungen zu neuartigen und zukünftigen Transporttechnologien.

## **8.2 Kritische Würdigung des Frameworks**

Das übergeordnete Ziel der Forschungsarbeit war die Schließung der Forschungslücke mit einer holistischen Methodik. Zu diesem Zweck wurde ein detailliertes Vorgehen in einem neuen Framework zur Anwendung für Ökobilanzierer entwickelt, die erstens neuartige Verkehrsmittel nachbilden und zweitens Zukunftsentwicklungen inkludieren möchten. Nachdem in Kapitel 7 die Anwendbarkeit des Frameworks mit der Fallstudie gezeigt, die Forschungsergebnisse validiert und ausgewertet wurden sowie in Kapitel 8.1 ein Vergleich hinsichtlich Gemeinsamkeiten und Unterschieden zu anderen Studien dargelegt wurde, kann nun die kritische Würdigung der entwickelten und angewendeten Forschungsmethode erfolgen, indem Potenziale und Limitationen diskutiert werden.

---

### 8.2.1 Diskussion der Potenziale von der Forschungsmethode

Das Ziel der Methodenentwicklung war ein allumfassendes und anwendbares Vorgehen, welches die Veränderungen eines Verkehrsmittels in einer ökobilanziellen Nachbildung holistisch betrachtet. Für dieses Ziel wurde eine klare umsetzbare Vorgehensweise mit symbiotischen Vorgehensschritten im vorgestellten Framework entwickelt, in welchem bestehendes Wissen kombiniert und um neue Aspekte ergänzt wurde. Das Ergebnis des Frameworks ist in seiner Detailtiefe herausragend und von revolutionärem Charakter für die LCA-Methodik, da drei Veränderungslevel systematisch und in aufeinander aufbauenden Schritten behandelt wurden, die noch keine bekannte Forschungsmethode separiert und vollständig berücksichtigt hat. Im ersten Level erfolgt der Wechsel von konventioneller zu neuartiger Transporttechnologie in der eLCI und im zweiten bzw. dritten Level wird der Technologieentwicklungsprozess des Produktsystems berücksichtigt bzw. die sich darauf beziehenden Sektorenveränderungen im umgebenden System in der pLCI differenziert betrachtet. Zudem wurde aufgezeigt, warum das Framework als notwendige Unterscheidung im zweigeteilten Vorgehen der retrospektiven LCA bzw. prospektiven LCA angewendet werden sollte. Eine Erweiterung der ex-post Sachbilanz mit einer ex-ante Sachbilanz wird zur Bereitstellung nicht-modifizierter Daten im aktuellen Zustand für die weitere Verwendung durch Ökobilanzierer benötigt. Demgegenüber ist eine Erweiterung der ex-post Sachbilanz mit einer prospektiven Sachbilanz zur Bereitstellung vergleichbarer Daten für die abschließende Verwendung der Ergebnisse von politischen und wirtschaftlichen Akteuren notwendig. Diese Zweiteilung innerhalb einer ökobilanziellen Untersuchung ist hochrelevant, wird jedoch bis auf Ausnahmen von anderen Studien bislang vernachlässigt.

Nach der Validierung des Vorgehens im Framework auf Basis der bestehenden Literatur soll in Abgrenzung zu dieser hervorgehoben werden, welches die Vorteile einer Anwendung der vorgestellten pLCI darstellen. Im Vergleich zu früheren pLCI-Methoden zeichnet sich das Framework durch die Vollständigkeit aller identifizierten Schritte inklusive eines fehlenden Schrittes in Bezug auf den auszuwählenden Modifikationszweck aus. Der Mehrwert gegenüber früheren pLCI-Methoden ist einerseits die verbesserte Schrittabfolge für einen fließenden Nachbildungsablauf und die verständlichere Vorgehensweise mit umfangreichen Erläuterungen jeder Stufe sowie andererseits die Einhaltung aller Gütekriterien der Vorausschau Forschungsgemeinschaft für ein genügend fundiertes Zukunftsszenario, die zusammengefasst in der Veröffentlichung von Kosow und Gaßner zu finden sind. Die starke Ähnlichkeit zu anderen pLCI-Methodenbestandteilen ist notwendig, damit im Framework bekanntes Wissen der Szenarioanalyse nicht fehlt, welches in der Vorausschau Gemeinschaft breit anerkannt ist. Ebenso hat auch die Ökobilanzierung feste Vorgehensbestandteile, die nicht aus der Vorgehensweise der Sachbilanz extrahiert werden dürfen. Daher werden keine sinnvollen Bestandteile vernachlässigt, die in mindestens zwei Studien integriert sind, sondern diese unter der Möglichkeit einer neuen Anordnung beibehalten und um weniger übliche bzw. neue Bestandteile wie die Szenario-Narrative, die von Cucurachi et al. lediglich erwähnt wurde, mit einer anwendbaren Vorgehenserläuterung ergänzt. Die reale Fallstudie trägt in erster Hinsicht zum Verständnis der Methodenanwendung für Flugzeuge bei und kann weiterhin verallgemeinert auch für andere Transporttechnologien im Verkehrssektor in ähnlicher Weise angewendet werden. Folglich muss festgehalten werden, dass das entwickelte Framework funktioniert, da dieses in einem iterativen und klar verständlichen Vorgehen zu Zukunftsszenarien führt, die zwar von großer Unsicherheit behaftet sind,

---

allerdings sind gerade deshalb notwendigerweise die prospektiven Werte für diese nicht ohne einen transparenten Entwicklungsprozess anzunehmen.

Demnach sollte das Framework anstelle von anderen pLCI-Methoden verwendet werden, da dieses alle Qualitätskriterien von Kosow und Gaßner vereint, die mit anderen Vorgehen aufgrund fehlender oder unzureichender Methodenschritte nicht hinreichend abgedeckt sind. Zudem wird eine verbesserte Anwendung als ohne dieses gefördert, da erstens die Datenqualität erhöht werden kann, zweitens die Daten und Ergebnisse zur Weiternutzung geeignet sind und drittens die Entscheidungsunterstützung verbessert werden kann. In dieser Arbeit soll ein besseres Verständnis zu Details des Frameworks in der Vorgehensweise erreicht werden, indem diese in allen umzusetzenden Schritten erläutert und am Ende jedes Methodenkapitels zusammengefasst wird sowie zusammen mit den Übersichtsgrafiken zu Beginn jedes Kapitels im Ablauf der Stufen und wichtigsten Schritte dargestellt ist. Neben dem Verständnis über den methodischen Gesamtzusammenhang sind die zahlreichen Schritte notwendig, um die Relevanz des Vorgehens in vielfältigen Einzelbestandteilen und den daraus resultierenden Verbesserungen aufzuzeigen. Auch wenn es erscheinen mag, dass einige Schritte im Framework hinreichend den logischen Verstand adressieren, ist es für das Endprodukt von genügend fundierten Zukunftsszenarien notwendig, jeden dieser Schritte umzusetzen. Andernfalls könnten ohne das Vorgehen in der pLCI die Ergebnisse aus nicht hinreichend passgenauen Daten aufgrund niedrigerer Datenqualität fehlerbehaftet sein. Oder es entsteht ohne das Vorgehen in der eLCI keine Möglichkeit, unter Zukunftsunsicherheit erzeugte Daten hinsichtlich anderer Annahmen zu modifizieren, woraus die Weiternutzbarkeit aufwändig erhobener, im Entwicklungsprozess befindlicher Daten von TTS gefährdet wird. Schließlich kann auch lediglich eine unzureichende Entscheidungsunterstützung bereitgestellt werden, wenn beispielsweise nur die Ergebnisse eines 100% Windstrom-basierten Zukunftsszenarios ohne Einblicke in die zugrunde gelegten Annahmen, ohne weitere Ergebnismöglichkeiten bzw. ohne übermittelte Erläuterungen der Unsicherheiten dokumentiert sind. Dies könnte an Entscheidungsträger und Praktiker über die mögliche Umweltleistung und den zu tätigen Aufwand, um dieses in Zukunft zu erreichen, ein verzerrtes Bild vermitteln. Zum Erreichen des Zielzustands einer nachhaltigen Mobilität sind Empfehlungen notwendig, die anhand dieses methodischen Fundaments im Framework zu tätigen sind, um für den Transformationsprozess umsetzbare Handlungspfade zu zeigen, die in einem methodisch robusten sowie nachvollziehbaren Entwicklungsprozess entstanden sind und auf den Zielzustand mit geeigneten Maßnahmen hinarbeiten.

Abschließend wird diskutiert, welche Aspekte den praktisch umgesetzten pLCA-Studien fehlen könnten, die dieses Framework nicht anwenden. Ohne die Dokumentation der systematischen Schrittabfolge im Kompletten für den Ökobilanzierer und in relevanten Ausschnitten in der veröffentlichten LCA-Studie ist z.B. für die Sachbilanz-Ergebnisse eine korrekte Zuordnung der modifizierten Parameter nicht hinreichend gewährleistet, da eine fehlerhafte Einordnung in die Parameter-Bündel bzw. die pLCI-Modelle nicht ausgeschlossen werden kann. Auch werden nicht geeignete Parameter bzw. Parameterwerte möglicherweise nicht bzw. nicht frühzeitig aus dem entsprechenden Zukunftsszenario entfernt wie dies mit Schritt eins, Schritt drei und Schritt sieben der pLCI erreicht werden soll. Dies verursacht vermeidbaren Mehraufwand, woraus im schlimmsten Fall keine geeigneten Ergebnisse zur Entscheidungsunterstützung aufgrund von nicht genügend fundierten Zukunftsszenarien bereitgestellt werden können.

---

Weiterhin stellt sich die Frage, wie Schlussfolgerungen einer pLCA-Studie aussehen könnten, die dieses Framework nicht berücksichtigt hat. Resultate wären möglicherweise eine falsche Entscheidungsunterstützung, da Entscheidungsträger die Grundlage der Ergebnisse wie 100% Windstrom überhaupt nicht aufgezeigt bekommen, nicht richtig einordnen oder nicht richtig interpretieren könnten. Mehrfacharbeit resultiert, wenn nicht-modifizierte Daten gar nicht zur Verfügung gestellt werden und andere Ökobilanzierer diese erneut für einen Untersuchungsgegenstand aufsetzen müssen bzw. nicht für andere Szenarien weitenutzen können und somit nur für einen singulären Zweck erhoben und nachgebildet wurden, welches nicht im Verhältnis zu den eingesetzten personellen, finanziellen und zeitlichen Ressourcen der Ersterforschung steht. Dies verursacht einen erneuten Aufwand im Bearbeitungsprozess von Ökobilanzierern, der zu unnötigen Schleifen führt, sodass nur zeitlich verzögerte oder nicht hinreichend fundierte Schlussfolgerungen von diesen bereitgestellt werden können. Hieraus entsteht zudem die mögliche Problematik, besonders zum entfernten Betrachtungszeitpunkt nicht genügend unterschiedliche Schlussfolgerungen beispielsweise aufgrund mehrerer unterschiedlicher Szenarioausprägungsergebnisse bereitzustellen und somit ein Aufzeigen der großen Zukunftsunsicherheit zu verhindern. Auch kann der Fehler entstehen, eine verfrühte Entscheidungsunterstützung bereits nach der eLCI zu geben, obwohl das Ergebnis aufgrund eines Nachteils für die neuartige Technologie durch ein niedriges TRL noch nicht zum Vergleich geeignet ist und stets eine nachgelagerte pLCI für alle Technologien benötigt, da möglicherweise erst im Anschluss die Potenziale der TTS ersichtlich werden. Dies kann im schlimmsten Fall dazu führen, dass der Markthochlauf einer unter Umweltaspekten nicht geeigneten Technologie gefördert wird, die keinen angemessenen Beitrag zum Zielzustand einer nachhaltigen Mobilität ermöglicht. In dem vorgestellten Framework wird dies durch den umzusetzenden Szenarioentwicklungsprozess und ein Benchmarking zu Sektorenzielen unterbunden. Weiterhin kann im Umkehrschluss das verfrühte Ausscheiden einer geeigneten Technologie resultieren, die noch nicht hinreichend in ihrem Zukunftspotenzial untersucht wurde und folglich eine andere Technologie aufgrund von verschleierte Ergebnissen unter fehlender Transparenz gefördert werden, die nicht mit anderen LCA-Ergebnissen unter einem nachvollziehbaren Entwicklungsprozess gleichgesetzt werden sollte.

Demgegenüber zeigt die GNOSIS Fallstudie auf, wie Schlussfolgerungen einer pLCA-Studie aussehen können, die dieses Framework hinreichend berücksichtigt hat. Hieraus können Handlungsalternativen für unterschiedliche Technologien, Szenariotypen und zeitlichen Zustände dargestellt werden. Diese sind fundiert und begründet anhand der neun Gütekriterien Verständlichkeit, Transparenz, Grad der Integration für Wechselwirkungen, Nachvollziehbarkeit, Plausibilität, Grad der Inklusion für Beteiligte, Trennschärfe, Konsistenz und Rezeptionsqualität. Aus diesen notwendigen Qualitätsbedingungen wurden drei Zukunftsszenarien ausgebildet, die zwar diversifiziert, jedoch in der Menge auswertbar für Entscheidungsträger sind. Die Daten, Szenarien sowie Ergebnisse der Fallstudie sind insgesamt reproduzierbar und basieren auf kompletten und passgenauen Produktsystemen, die für den abschließenden Vergleich geeignet sind. Zudem wird unter Anwendung des Frameworks und erzeugten Methodenoutputs wie der Szenario-Narrative auf Unsicherheiten im Technologieentwicklungsprozess und Zukunftsentwicklungsprozess hingewiesen bzw. diese transparent aufgezeigt. Aus den Schlussfolgerungen der LCA-Ergebnisse, die weitaus diversifizierter sind als ein einzelnes Ergebnis zu nennen, können politische Entscheidungen und ein praktischer Markthochlauf hinsichtlich der untersuchten Technologien getätigt



---

werden. Es werden Vorteile und Nachteile für das jeweilige Ergebnis bereitgestellt, die auf unterschiedliche Zukunftsannahmen zurückführbar sind und folglich ein umfangreiches Entscheidungsspektrum der Technologien aufzeigen. Somit ergibt sich, dass eine Studie, die dieses Framework anwendet, zu LCA-Resultaten führt, die zur Entscheidungsunterstützung priorisiert zurate gezogen werden sollten. Eine transparente Vorgehensweise kann zudem Entscheidungsträgern helfen, Defizite in anderen Studien zu identifizieren und diese bewusst nicht zur Entscheidungsunterstützung heranzuziehen.

Zum Abschluss wird zusammengefasst, worin in der Forschungsarbeit der eindeutige Neuwert liegt. Das innovative Element im entwickelten Framework besteht in einer separaten Modellnachbildung einer neuartigen Technologie in der eLCI, die ohne einen Vergleich nur das erste Veränderungslevel gegenüber konventionellen Fahrzeugen zeigt. Die Nachbildung der TTS sollte stets in enger Abstimmung mit Fahrzeugentwicklern erfolgen, weshalb auf eine gemeinsame Terminologie in der Modellausbildung von Fahrzeugen geachtet wurde. In Kombination mit der bereits umgesetzten Sachbilanz folgt nachgelagert die Modelländerung einer zukünftigen Technologie in der pLCI, die mit dem abschließenden Vergleich das zweite und dritte Veränderungslevel berücksichtigt. Die Zukunftsentwicklung der Fahrzeuge weist eine Konformität mit den methodischen Ansätzen und notwendigen Bestandteilen von der Szenarioanalyse der Vorausschau Gemeinschaft auf. Diese systematische Modifizierung unter Rückgriff auf vielfältige bereitgestellte prospektive Techniken für Zukunftsannahmen wie Partizipation anhand einer Expertenumfrage besitzt ebenfalls einen Neuwert.

In dieser Arbeit wird ein komplett neues Vorgehen für eine ex-ante Sachbilanz vorgestellt, in welcher neue methodische Maßnahmen gegenüber der ex-post Sachbilanz als ISO Norm Erweiterung formuliert werden. In Stufe eins sind neue Maßnahmen ein graphisch verändertes Systemfließbild, die Auflistung neuer Transformations-Parameter sowie geänderter Standard-Parameter und die qualitative Beschreibung der Technologieänderung. In Stufe zwei sind die Neuerungen eine angepasste Datensatz-Fluss-Liste, neue Datenerhebungsblätter pro TTS sowie eine Datengenerierungsliste für veränderte, übernommene und neue Daten. In Stufe drei erfolgt eine Quantifizierung der veränderten und gleichgebliebenen Flüsse im Transformationsmodell als Modellerweiterung sowie die Auflistung der Transformationstyp-Spezifizierungsmöglichkeiten zur Kennzeichnung der drei Veränderungslevel.

Das Neue im systematischen Vorgehen der einzelnen Schritte in der prospektiven Sachbilanz wird zusammengefasst in die neu erarbeitete Reihenfolge auf Basis der analysierten Literatur zu Szenarioanalyse für einen fließenden Ablauf, einen komplett neuen Schritt vier für eine vereinfachte Modifizierung, die Aufnahme und Festlegung der von Cucurachi et al. erwähnten Szenario-Narrative in Schritt neun als Meilenstein und notwendiger Abschluss der Kombination von Szenarioanalyse und LCA im Vorgehen der pLCI. Es folgt die Erweiterung der bekannten Methodenschritte um vielfältige neue Bestandteile wie das Parameterverzeichnis für pLCA in Schritt drei oder Datenmodifikationstechniken in Schritt fünf zur Unterstützung von Ökobilanzierern im Anwendungsprozess und verschiedenen Nutzern der LCA-Resultate im Entscheidungsprozess. Der größte Beitrag an Verbesserungen der entwickelten pLCI liegt insgesamt in der Stufe zwei mit der größeren Praktikabilität und Nachvollziehbarkeit der Erarbeitung zielgerichteter Zukunftsannahmen, die als transparente Handlungsanleitung noch in keiner methodenorientierten pLCI-Veröffentlichung gefunden werden konnte.



---

## 8.2.2 Diskussion der Limitationen von der Forschungsmethode

Neben den dargelegten Vorteilen sind auch Beschränkungen in der entwickelten und angewendeten Forschungsmethode vorhanden. Diese Limitationen werden nachfolgend diskutiert und mögliche Lösungsvorschläge bereitgestellt.

Einschränkungen des Frameworks liegen in einer hohen Menge an Umsetzungsschritten unter beschränkten zeitlichen, personellen bzw. finanziellen Ressourcen. Jedoch bietet das Framework mit bereitgestellten Handlungsanleitungen, Tabellen und weiterer methodischer Unterstützung wie den Vergleichs-Parametern und dem Übertrag von Standard-Parametern von CT zu TTS sowie deren Weiternutzung für die Modifizierung von Inventar-Parametern hinreichend Möglichkeiten für Ökobilanzierer, um je nach Unterstützungsbedarf trotz beschränkter Ressourcen den Entwicklungsprozess effizient sowie vollständig umzusetzen und zu qualitativ hochwertigen Ergebnissen zu gelangen.

Zudem ist die Offenlegung aller Modellierungsentscheidungen problematisch, da Defizite ersichtlich werden können. Mit einer strukturierten schrittweisen Umsetzung und dem Rückgriff auf das editierbare Parameterverzeichnis können jedoch Verbesserungspotenziale der eigenen Umsetzung identifiziert und aufgedeckte Fehler bereits im Entwicklungsprozess eliminiert werden. Zumal die transparente Vorgehensweise eine präzisere Vergleichbarkeit und eine verbesserte Datenübernahme im Gegensatz zu LCA-Studien fördert, welche keinen Einblick in den Entwicklungsprozess gewähren.

Weiterhin sinkt in der eLCI-Nachbildung die Modellgenauigkeit umso mehr, je größer die Menge an übernommenen Parameterwerten wird. Allerdings erzeugt eine Vermeidung von Datenübernahmen der Vergleichstechnologie insbesondere bei geringem TRL wiederum nur eine mangelnde Vollständigkeit, sodass der Bedarf resultiert, für den späteren Vergleich die gleichen Prozess-Vernachlässigungen für das Produktsystem des CT umzusetzen, bis mit höherem TRL der TTS im Entwicklungsprozess neue Primärdaten integrierbar sind.

Zusätzlich sinkt als einziger Qualitätsfaktor die Daten-Zuverlässigkeit sukzessive von CT zur TTS und von diesen zu den zukunftsveränderten Technologien mit einer steigenden Unsicherheit von den Datenwerten in Transportmodell, Transformationsmodell und Zukunftsveränderungsmodell, da der Anteil an gesicherten Realdaten abnimmt. Eine Integration vielfältiger Experten kann qualifizierte Rückmeldungen zu den erzeugten Werten ermöglichen und eine Ausarbeitung von alternativen Zukunftsszenarien kann wiederum Entscheidungsträgern besser differenziert die Möglichkeitsspannweite insbesondere bei entfernteren Zukunftsentwicklungen aufzeigen.

Abschließend behindern zu ausführliche Untersuchungen die Sichtbarmachung relevanter Erkenntnisse. Daher gilt es, die Aufmerksamkeit von Entscheidungsträgern gezielt auf die Kernpunkte in den Ergebnissen und in der Vorgehensweise zu lenken, worauf jeweils in der dritten Methodenstufe von eLCI und pLCI der Fokus gelegt wird, um einen Erfolg der Entscheidungsunterstützung im Transformationsprozess zu einer nachhaltigen Mobilität zu erhöhen.

Auch ist anzumerken, dass weitere Methoden existieren oder sich noch entwickeln können. Daher soll für dieses Framework nicht der Anspruch erhoben werden, alleinig neuartige bzw. zukunftsgerichtete Technologien nachzubilden, sodass die vorgestellte Vorgehensweise von anderen Forschungsarbeiten aufgegriffen und erweitert werden kann.

---

Weitere Limitationen der Methodenanwendung im Rahmen der GNOSIS Fallstudie betreffen die Generierung von Daten der neuartigen Flugzeuge sowie die Modifizierung von Daten für die Zukunftsbetrachtung aller Flugzeuge. In vielen Prozessen der elektrifizierten Flugzeuge sind Informationen direkt von der Beechcraft 1900D in Parametern und Stellvertreterdaten übernommen worden, beispielsweise für Daten zu vorhandenen Transportprozessen des Antriebssystems. Diese sollten im Markthochlauf mit realen Daten ersetzt werden. Weiterhin wurden die Zukunftsannahmen zwar durch Experten validiert, jedoch sind die nahen und entfernten Zukunftszustände unsicherheitsbehaftet. Da der Strommix eine hohe Bedeutung einerseits als direkte Nutzung und andererseits als Inputfluss für die Wasserstoffherstellung hat, wurden prospektive Daten aus zwei verschiedenen Forschungsstudien integriert, um die Fehleranfälligkeit der pLCA aufgrund von nur einem Technologiemix mit einem bestimmten Marktanteil in 2050 zu minimieren. Dennoch kann die Entwicklung abweichen und es wird mit den Zukunftsszenarien nur die Gültigkeit auf den Raum Deutschland festgelegt. Weitere Einschränkungen können dem Ökobilanz-Bericht im Detail aus Kapitel 5.2.6 entnommen werden (Hanesch & Schebek, 2023).

### **8.3 Beantwortung der detaillierten Forschungsfragen**

Ob das Forschungsbestreben in dieser Arbeit hinreichend umgesetzt werden konnte, soll zum Abschluss des Kapitels mit der Überprüfung der detaillierten Forschungsfragen beantwortet werden.

Das Bestreben der Forschungsarbeit war, die drei Veränderungslevel des Produktsystems von technologischer Veränderung, technologischem Fortschritt und zeitlichem Fortschritt separat in eine ganzheitliche Methodik zu integrieren, um ein allgemeingültiges Vorgehen für mittel-skalierte Technologie- und Systementwicklungen von Transportsystemen anhand des Entwicklungsprozesses von Technologien und Szenarien sowie deren Anwendung auf den Flugsektor und deren TTS vorzustellen. Mit dieser Vorgehensweise sollte den identifizierten Herausforderungen von fehlenden Daten, Vergleichbarkeit der funktionellen Einheit, Hochskalierung des Vordergrundsystems, Veränderung des Hintergrundsystems, Vergleichbarkeit der Systemgrenzen und Unsicherheitskommunikation begegnet werden.

Diese Herausforderungen wurden mit zugehörigen Framework-Zielen adressiert, einerseits mit der eLCI-Umsetzung zur Nachbildung technologischer Veränderungen sowie dem eLCI-Ergebnis für die Modellierung des kompletten Produktsystems und andererseits mit der pLCI-Umsetzung zur Nachbildung von technologischem und zeitlichem Fortschritt sowie dem pLCI-Ergebnis für die Modellierung passgenauer Produktsysteme. Als übergeordnetes Framework-Ziel sollte aus dem Framework-Ergebnis insgesamt ein geeigneter Vergleich aller Produktsysteme erreicht werden. Mit diesem systematischen Vorgehen in der Sachbilanz galt es, am Beispiel der Fallstudie von Kleinflugzeugvarianten vollständiger sowie technologisch und zeitlich passgenauere Ergebnisse für eine verbesserte Entscheidungsunterstützung umzusetzen.

Zum Abschluss der Methodenentwicklung und Methodenanwendung soll auf die aufgestellten drei detaillierten Forschungsfragen näher eingegangen werden, um zu diesen jeweils Stellung zu beziehen.

---

*1. Wie kann ein geeignetes Vorgehen zur Nachbildung neuartiger Verkehrsmittelalternativen in der Sachbilanz umgesetzt werden?*

Die erste Frage zur geeigneten Nachbildung von TTS im Technologieentwicklungsprozess lässt sich mit dem erarbeiteten Framework in drei Methodenteilen beantworten. Eine Transport-Transformationslösung kann mit dem vorgestellten Framework vollständig und passgenau nachgebildet werden, wobei gegenüber dem konventionellen Transport nach der Ausbildung des Transportmodells in der ex-post Sachbilanz von Kapitel 4 die Veränderung in der ex-ante Sachbilanz von Kapitel 5 herausgearbeitet wird und pro TTS in einem spezifischen Transformationsmodell resultiert. Die Umsetzung der zu modellierenden TTS erfolgt auf Basis des konventionellen Fahrzeugs, welches zum Abschluss des Frameworks hinsichtlich den Umweltwirkungen gegenübergestellt werden soll. In dieser ersten Iteration der Sachbilanz lassen sich von der Vergleichstechnologie vielfältige Bestandteile in Form von Prozessen, Parametern und Flüssen übernehmen, zudem sind neue Daten für die TTS im jeweiligen technologischen Reifegrad zu generieren. Aus dieser Kombination von nicht-modifizierten Daten endet die Nachbildung der TTS für den Referenzzustand im Status Quo, für den noch keine technologischen und zeitlichen Zukunftsveränderungen berücksichtigt sind. In der zweiten Iteration der Sachbilanz wird dieser Fortschritt im zweiten und dritten Veränderungslevel in der prospektiven Sachbilanz von Kapitel 6 nachgebildet, da eine Zukunftsbetrachtung für TTS immer notwendig ist, jedoch diese unter Flexibilität von weiteren Anpassungen am Produktsystem nur separat betrachtet werden sollte. Hieraus ergibt sich für jedes geeignete Zukunftsszenario ein Zukunftsveränderungsmodell pro TTS zur Bewertung von potenziellen Umweltwirkungen im Zukunftszustand. Die Aufspaltung der Sachbilanz und nachgelagerten Wirkungsabschätzung in zwei Umweltbewertungsebenen mit retrospektiven und prospektiven Wirkungsabschätzungsprofilen adressiert einerseits den Bedarf nach einem transparenten Vorgehen zur Erzeugung von weiteren Modellen für die Zukunftsbetrachtung, andererseits wird zu diesem Zweck für jede Technologie ein nicht-modifiziertes Modell mit noch veränderbaren Datensätzen als Ausgangsbasis für verschiedene unsicherheitsbehaftete Zukunftsentwicklungen bereitgestellt.

*2. Wie können Transport-Transformationslösungen unter Berücksichtigung von Fortschritt zukunftsgerichtet modifiziert und hinsichtlich potenzieller Umweltwirkungen bewertet werden, um einen passgenauen Vergleich mit konventionellen Transportsystemen zu ermöglichen?*

Die zweite Frage nach der Modifizierung von TTS zur Berücksichtigung von Fortschritt im Szenarioentwicklungsprozess für einen passgenauen Vergleich mit dem CT lässt sich mit dem Framework im dritten Methodenteil beantworten. TTS und CT können mit dem Vorgehen in der prospektiven Sachbilanz hinsichtlich einer Erhöhung der technologischen und zeitlichen Repräsentativität der Daten passgenau für einen Vergleich untereinander nachgebildet werden. Auf Basis des ersten und zweiten Methodenteils kann in neun iterativen Schritten der pLCI in Kapitel 6 die korrekte Gegenüberstellung der Technologien mit der Nachbildung in einem Zukunftsveränderungsmodell pro Szenario und Fahrzeug ermöglicht werden. Aufgrund der unsicheren Entwicklungspfade ist eine systematische Vorgehensabfolge zu berücksichtigen, um die Zukunftsszenarien nach den neun Gütekriterien von Kosow und Gaßner zu entwickeln. Dies geschieht beispielsweise, indem die zu verändernden Parameter in ihren Modifikationszweck von Advance-Parameter, Upscaling-Parameter oder Overall-Parameter unterteilt werden und für die TTS der Markthochlauf bis zur Marktetablierung

---

anhand einer Hochskalierung in Form von einem Upscaling der in Entwicklung befindlichen Bestandteile des Produktsystems umgesetzt wird. Des Weiteren wird der technologische Fortschritt des CT einbezogen sowie der zeitliche Fortschritt aller Produktsysteme im Hintergrundsystem berücksichtigt mit Entwicklungspfaden der Parameter bis zu einem spezifischen Betrachtungszeitpunkt wie dem Marktetablierungsjahr der TTS für diese und die Vergleichstechnologie. Mit den systematisch ausgebildeten Zukunftsszenarien in den drei Methodenstufen Selektive Parameter Identifizierung, Zukünftige Parameter Erarbeitung und Zukunftsszenario Bestimmung können alle Technologien zukunftsgerichtet modifiziert und daraufhin in Bezug auf deren potenzielle Umweltwirkungen bewertet werden, um im Anschluss untereinander verglichen bzw. übergeordneten Zielsetzungen gegenübergestellt zu werden.

*3. Welche Spezifizierungen ergeben sich für Transformationslösungen im Flugsektor und welche Ergebnisse können mit der Elektrifizierung eines Kleinflugzeugs für den Transformationsprozess erzeugt werden?*

Die dritte Frage nach der Spezifizierung für TTS im Flugsektor zur Erzeugung von Ergebnissen aus der Elektrifizierung eines Kleinflugzeugs lässt sich mit der Anwendung des Frameworks in drei Methodenteilen beantworten. Demonstriert wird das entwickelte Framework in der Fallstudie von Kapitel 7 anhand der praktischen Umsetzung der erweiterten Sachbilanz für die drei GNOSIS 19-Sitzer Flugzeugalternativen konventionelles Flugzeug, hybridelektrisches Flugzeug und brennstoffzellenelektrisches Flugzeug in den Marktetablierungsjahren 2025 und 2050. Die Spezifizierungen für die HEA mit elektrischem Rollvorgang während einer Mission und für die FCEA mit einer vollelektrischen Flugmission zeigen auf, welche verschiedenen Bestandteile wie Batterien und Elektromotoren in die Flugzeugmodelle gegenüber dem CA zu integrieren sind, um den Technologieentwürfen von TRL 3 zu entsprechen. Als große Transformationsintensität beider Flugzeuge beinhaltet beispielsweise die FCEA eine Tragstrukturveränderung, die neuen Energieträger Strom und Flüssigwasserstoff sowie vielfältige weitere neue Komponenten im elektrischen Antrieb. Nachdem sich für diese aus den Umweltwirkungsergebnissen der eLCI noch keine hinreichende ökologische Vorteilhaftigkeit gegenüber dem CA ergeben würde, zeigen sich aus den Ergebnissen der pLCI von allen Flugzeugen die größten Verbesserungen für die FCEA, sodass diese in den beiden betrachteten emissionsbasierten Wirkungskategorien die beste Umweltleistung unter den entwickelten Zukunftsszenarien aufweist. Auch in Bezug auf die Erreichung von übergeordneten Zielsetzungen im Flugsektor bzw. im Verkehrssektor sowie für die Klima- und Nachhaltigkeitsziele nicht nur in Deutschland sollte die Technologie im Markthochlauf weiter erforscht werden und mit höheren Komponentenlebensdauern und Recyclingquoten, jedoch insbesondere unter einer dekarbonisierten Strom- und Wasserstoffherstellung möglichst zeitnah als Ersatz für die kerosinbasierten Kleinflugzeuge im Kurzstreckensegment wie die etablierte Beechcraft 1900D großflächig eingesetzt werden. Abschließende Schlussfolgerungen und ein Ausblick über das weitere Vorgehen werden im nachfolgenden letzten Kapitel dieser Arbeit gegeben.

### **9.1 Fazit der Forschungsarbeit**

Zum Abschluss soll nun im Rahmen der Synthese auf die wichtigsten Bestandteile in den vorangegangenen Kapiteln als Beitrag dieser Forschungsarbeit eingegangen werden, um mit diesen die übergeordnete Forschungsfrage zu beantworten.

#### **9.1.1 Synthese**

Die vorliegende Arbeit hat sich mit der ökobilanziellen Nachbildung von neuartigen und zukunftsgerichteten Fahrzeugen zur Erweiterung der Sachbilanz befasst, um zu einem neuen Framework zu gelangen, mit dem sich in einem systematischen Vorgehen ein komplettes und passgenaues Modell eines in Entwicklung befindlichen Produktsystems umsetzen lässt, das zum Vergleich der ökologischen Vorteilhaftigkeit geeignet ist, woraus in der Anwendung umfassende Umweltauswirkungen von elektrifizierten Kleinflugzeugen dargestellt werden. Die Forschungsarbeit dient Entscheidungen zu erfolgreichen Transformationsprozessen mit Fokus auf die Wirkungsbereiche Klimawandel, Humangesundheit und Rohstoffnutzung, für die auf nationaler Ebene Klima- und Nachhaltigkeitsziele für den Verkehrssektor adressiert werden. Da ein hoher Bedarf zur Verbesserung der Umweltleistung insbesondere für die Klimawirkung von konventionellen Flugzeugen zu Beginn der Arbeit identifiziert werden konnte, erfolgt die Festlegung der Forschung im Bereich der Transporttechnologien auf den Untersuchungsgegenstand von Flugzeugtransporten. In diesem Kontext ist es das Ziel der Arbeit, die Entwicklung einer Methodik zur ökobilanziellen Nachbildung in der Schnittstelle von Technologieentwicklung und Zukunftsentwicklung darzustellen, mit der ein Einhalten von Sektorenzielsetzungen überprüfbar ist. Daraus wurde die übergeordnete Zielsetzung abgeleitet, ein systematisches Vorgehen für Ökobilanzierer zur Entscheidungsunterstützung für erfolgreiche Transformationsprozesse des Verkehrssektors zu entwickeln. Zur Umsetzung dieses Bestrebens wurde die Sachbilanz erweitert, um die Nachbildung zunächst neuartiger Technologien und daraufhin zukunftsgerichteter Technologien durchzuführen. Es konnte festgestellt werden, dass mit der Bewertung in zwei differenzierten zeitlichen Zuständen sich die Vollständigkeit sowie technologische und zeitliche Repräsentativität der LCA verbessert, um mit geeigneten Schlussfolgerungen den Transformationsprozess für die kommenden Jahrzehnte bereits jetzt einzuleiten. Die entwickelte Methodik führt zur Bewertung künftiger Umweltauswirkungen im Bereich Klima, Gesundheit und Ressourcen, welche mit dem Zielzustand einer nachhaltigen Mobilität gegenübergestellt werden, um die Potenziale einer konkreten TTS zur Zielerreichung für bestimmte Wirkungen aufzuzeigen. Insgesamt hat die Arbeit mit dem systematischen und holistischen Ansatz Transport-Transformationslösungen ab der frühen Produktentwicklungsphase modellierbar gemacht unter der Berücksichtigung von allen identifizierten Herausforderungen für neuartige Technologien, indem erst technologische Veränderungen und daraufhin technologischer und zeitlicher Fortschritt im Rahmen von Zukunftsszenarien transparent umgesetzt werden.

Um dies zu erreichen, wird eine neue Methode mit der ex-ante Sachbilanz entwickelt, in der für Verkehrsmittel die technologische Änderung zu neuartigen Verkehrsmitteln nachgebildet werden kann. Weiterhin wird mit der prospektiven Sachbilanz die modifizierte Nachbildung



---

von Zukunftsveränderungen aller Produktsysteme berücksichtigt, mit welcher die Ermittlung zukünftiger Umweltauswirkungen und eine Vergleichbarkeit der Modelle von CT und TTS untereinander möglich ist. Zu diesem Zweck werden zunächst konventionelle Verkehrsmittel in der standardisierten ex-post Sachbilanz der ISO Norm nachgebildet, anschließend wird als erste Erweiterung das Vorgehen auf neuartige Verkehrsmittel angepasst, um als zweite Erweiterung die Szenarioanalyse in den mittleren drei Kernstufen zu integrieren. Im Rahmen der Methodenentwicklung konnten daraufhin für ein Kleinflugzeug zwei TTS auf Basis einer Elektrifizierung zur Umweltbewertung nachgebildet werden.

Die Forschungsarbeit wurde zur hinreichenden Untersuchung der dargelegten Thematik strukturell gegliedert, indem in Kapitel 1-2 der Sachverhalt zum geplanten Vorgehen in der Arbeit in den aktuellen klimapolitischen und wissenschaftlichen Kontext gesetzt wurde.

Die Analyse des Stands der Wissenschaft konnte demonstrieren, dass der Flugsektor den geringsten Entwicklungsstatus zur Transformation aufweist, sodass in Kapitel 2.1.4 in einer ersten Metastudie der Untersuchungsgegenstand auf Flugzeuge in Kombination mit LCA eingegrenzt wurde. Aus dieser konnte festgestellt werden, dass für neuartige Flugzeuge über den Lebensweg vollständige Daten, Modelle bzw. Ergebnisse fehlen, die unter Anwendung der ISO Norm entstanden sind. Zumal die Studien prospektive LCA-Ergebnisse anhand eines Szenarioentwicklungsprozesses nur unzureichend aufzeigen und für TTS nicht hinreichend bestimmte Wirkungskategorien abdecken. Weiterhin wurde erkannt, dass zur Anleitung von Ökobilanzierern noch keine Forschungsmethode alle Einzelerkenntnisse vereint, wobei der SIMPL Ansatz eine gute Grundlage für das prospektive Vorgehen bereitstellt. In Kapitel 2.1.7 wurde daraufhin in einer zweiten Metastudie die Umsetzung von Szenarioanalyse in LCA von Verkehrsmitteln überprüft und ein Fehlen der Methodik zur transparenten, mehrstufigen Szenarioentwicklung für TTS im Technologieentwicklungsprozess unter der separaten Berücksichtigung von drei Veränderungslevel bestätigt. Aufgrund des geringen Reifegrads der sich meist im Vorentwurf befindenden TTS von Flugzeugen wurde hierzu konkreter Forschungsbedarf zur Methodenentwicklung abgeleitet.

Nachdem in Kapitel 3 die Grundlagen zur Herangehensweise an das Forschungsvorhaben bereitgestellt wurden, folgt daraufhin die Methodenentwicklung im Rahmen der LCI, eLCI und pLCI in den Kapiteln 4-6.

Der erste Methodenteil aus Kapitel 4 stellt die ex-post Sachbilanz in der Spezifizierung zur Nachbildung konventioneller Verkehrsmittel dar. Als Ergebnis entstand ein vollständiges Transportmodell zur Ermittlung von Umweltwirkungen im abgebildeten Referenzzustand sowie zur Weiternutzung für neuartige und zukunftsgerichtete Modelle in der erweiterten Sachbilanz. Der zweite Methodenteil aus Kapitel 5 stellt die erweiterte ex-ante Sachbilanz zur Nachbildung neuartiger Verkehrsmittel dar. Als Ergebnis entstand aus dem vorherigen Modell und allen veränderten Modellbausteinen von Prozessen, Parametern und Flüssen ein Transformationsmodell mit einem quantifizierten Gesamtflussinventar, welches pro TTS ein vollständiges Sachbilanz-Modell mit den jeweiligen Technologieveränderungen im noch nicht abgeschlossenen Technologieentwicklungsprozess abbildet und sich zur Modifizierung von technologischem und zeitlichem Fortschritt eignet. Eine separate eLCI war notwendig, um im Nachgang Zukunftsentwicklungen als interner Vergleich den mit diesem Modell erzeugten retrospektiven Umweltwirkungen gegenüberzustellen. Der dritte Methodenteil aus Kapitel 6 stellt die erweiterte prospektive Sachbilanz zur Nachbildung zukünftiger Verkehrsmittel dar. Als Ergebnis sind aus den vorherigen LCI- bzw. eLCI-Modellen und allen



---

zukunftsveränderten Bestandteilen Zukunftsveränderungsmodelle mit quantifizierten prospektiven Gesamtflussinventaren pro Zukunftsszenario und Technologie entstanden. Aus diesen konnte zwischen Verkehrsmitteln im gleichen Zukunftsszenario der externe Vergleich und ein abschließendes Benchmarking zu Sektorenzielsetzungen aufgezeigt werden.

Aus dieser Methodenentwicklung entstanden neue Stufen und Schritte zur Integration in die Ökobilanzierung. Die Dokumentation der eLCI gibt in der ersten Stufe einen Überblick über das komplette Produktsystem der TTS, das qualitativ ausgebildet wird, zudem unterstützt die Unterteilung in Standard-Parameter und Transformations-Parameter den quantitativen Datenerhebungsprozess und setzt den Fokus auf die Generierung von neuen Parametern des Transformationstyps. Die zweite Stufe ermöglicht das Aufzeigen verschiedener Datenwerte gegenüber dem CT und neuer Datenwerte zusätzlicher Parameter sowie die Ermittlung der Datengrundlage als Zuverlässigkeitsmaß zwecks geringem TRL für Anpassungspotenziale in der pLCI oder im realen Markthochlauf der TTS. In der dritten Stufe folgt die Verrechnung zu neuen Sachbilanz-Modellen mit Kennzeichnung der Spezifikationen, woraus hervorgeht, dass diese noch nicht zum Vergleich bereitstehen. Die Dokumentation der pLCI basiert auf den neun Gütekriterien für eine erfolgreiche Szenarioanalyse und zeigt im ersten Schritt die Wahl und qualitative Veränderungstendenz geeigneter Parameter. Im zweiten Schritt erfolgt die Hinzunahme externer Faktoren, welche das Produktsystem übergeordnet beeinflussen, und der dritte Schritt ermöglicht die Einordnung der Schlüsselfaktoren in die qualitative Produktsystemstruktur mit dem Überblick über Relevanz der Schlüsselfaktoren zueinander und zu einzelnen Lebensphasen. Der vierte Schritt bereitet die Parameter zur Modifizierung vor, um diese ihrem Zweck gemäß zu verändern, im fünften Schritt erfolgt die konkrete Wertänderung mit vielfältigen Datenmodifikationstechniken anhand eines systematischen Vorgehens, während im sechsten Schritt die unterscheidbare Zuordnung der veränderten Parameter zu dem jeweiligen Szenariotyp ermöglicht wird. Der siebte Schritt zeigt, dass die Entwicklungspfade der modifizierten Parameter Konsistenz zueinander aufweisen und die erzeugten Zukunftsszenarien auf robusten Annahmen eines systematischen Vorgehens basieren. Im achten Schritt erfolgt die Einarbeitung aller Zukunftsveränderungen in die vorhandenen Modelle für die erneute Modellberechnung der Produktsysteme. Der neunte Schritt ermöglicht mit der Szenario-Narrative einen schnellen Ergebnisüberblick zwischen verschiedenen Szenarioausprägungsergebnissen und zeigt zugrundeliegende Treiber für die zu erzeugenden pLCA-Ergebnisse auf. Mit diesem Vorgehen lassen sich vollständige sowie technologisch und zeitlich passgenaue Sachbilanz-Daten erzeugen, mit denen neuartige sowie zukunftsgerichtete Transporttechnologien ökobilanziell korrekt bewertbar werden.

Zur Überprüfung der erarbeiteten Methode wurde in Kapitel 7 eine Fallstudie durchgeführt. Hierbei konnte festgestellt werden, dass für die elektrifizierte Flugzeuge HEA und FCEA auf TRL 3 der Transformationstyp einer großen Transformationsintensität existiert und für die Marktetablierungsjahre 2025 und 2050 Zukunftsszenarien erzeugt werden müssen.

Zunächst wurde die LCI in drei Stufen für das konventionelle Flugzeug umgesetzt, welches dem 19-Sitzer Kleinflugzeug Beechcraft 1900D aus dem Fertigungsjahr 2002 entspricht und als technologisches Antriebskonzept zwei Gasturbinen, zwei Propeller und den Einsatz von Kerosin umfasst. In der ersten Stufe der eLCI wurden u.a. geänderte Dimensionierung und Hochdecker-Flügel als dritten Wechsel, für die HEA zwei Gasturbinen, zwei Elektromotoren und vier Propeller sowie für die FCEA zwei Brennstoffzellen, eine Batterie, vier Elektromotoren und vier Propeller als zweiten Wechsel und für die HEA Strom und Kerosin

---

sowie für die FCEA Strom und Flüssigwasserstoff als ersten Wechsel vorgestellt, für die neu hinzugekommene Prozesse wie Elektrischer Antrieb Herstellung bzw. weggelassene Prozesse wie Energieträger Nutzung resultieren. In der zweiten Stufe der eLCI konnten zum Großteil Datengenerierungstechniken wie Simulation und Datenübernahme Vergleichstechnologie verwendet sowie u.a. zu den Prozessen Elektrischer Antrieb Herstellung und Energieträger Bereitstellung neue Daten bzw. zur Materialzusammensetzung der Tragstruktur geänderte Daten erzeugt werden. In der dritten Stufe wurden die Transformationsmodelle aufgesetzt und physische Veränderungen des Transformationstyps in den drei Wechseln abschließend visuell aufgezeigt. In der ersten Stufe der pLCI lassen sich für die HEA acht und für die FCEA zehn verschiedene Inventar-Parameter identifizieren und im Kausalschleifendiagramm acht externe Faktoren auf die Haupt-Faktoren Klimapolitik, Innovation und Kreislauffähigkeit reduzieren. In der zweiten Stufe der pLCI folgen für den prädiktiven Szenariotyp einfache Wertänderungen von CA, HEA oder beiden sowie für den explorativen Szenariotyp ein- oder zweifache Wertänderungen von CA, FCEA oder beiden durch größere Zukunftsunsicherheit. Es ergeben sich u.a. Änderungen für Advance-Parameter des CA zu CFK-Substitutionen, für Upscaling-Parameter der TTS zu Nutzungsdauererhöhungen und Overall-Parameter aller Flugzeuge zu Strommix-Zusammensetzungen, woraus als maximale Ausprägungsmenge drei neue Werte resultieren. In der dritten Stufe der pLCI entstehen drei Zukunftsszenarien, die für CA, HEA bzw. FCEA zu drei, ein bzw. zwei Zukunftsveränderungsmodellen überführt werden konnten. Die daraus erhaltenen prospektiven Gesamtflussinventare zeigen u.a. hohe quantitative Änderungen des CA im Kerosineinsatz, für die HEA hauptsächlich veränderte Flüsse in der letzten Lebensphase und für die FCEA durch längere Lebensdauern und Recycling signifikante Rohstoffeinsparungen. Für die abschließende Kommunikation des unsicherheitsbehafteten Wegs zur spezifischen Zukunftssituation im Marktetablierungsjahr wurden drei Szenario-Narrativen erstellt, die große Verbesserungen der Entwicklungspfade von den Schlüsselfaktoren über die langfristige Perspektive demonstrieren.

Die Resultate aus der Anwendung des Frameworks zeigen für den Referenzzustand, dass aufgrund des Umweltwirkungsbeitrags die größte Stellschraube der Energieträgereinsatz ist, der sich zu mindestens Zweidritteln aus den Prozessen Energieträger Bereitstellung sowie Energieträger Nutzung zusammensetzt und auf die Einsatzmenge an Kerosin, Strom und LH<sub>2</sub> als höchste Umweltwirkungen zurückführbar ist. Zudem existieren für Prozesse u.a. zwecks steigendem Einsatz kritischer Rohstoffe und Verbundwerkstoffe höhere Umweltwirkungen in Antriebssystem und Tragstruktur sowie große Unsicherheiten zum Lebensende, sodass sich Potenziale zur Erhöhung der Komponentenlebensdauern und Recyclingquote ergeben. Die kritischen bzw. unsicherheitsbehafteten Parameter von CA, HEA und FCEA aus der eLCI dienen dem Übertrag in die pLCI. Zudem zeigen die Resultate aus der Methodenanwendung für den Zukunftszustand, nachdem die Wirkungsabschätzungsprofile besonders der FCEA im Referenzzustand hohe Umweltwirkungen aufdeckten, dass u.a. aufgrund Verbesserungen im Strommix und dekarbonisierten Wasserstoff die Wirkungen zumindest für emissionsbasierte Kategorien signifikant reduzierbar sind. Auch die pLCA-Resultate heben die überragende Rolle dekarbonisierter Energieträger als Optimierungspotenzial für den Flugzeugtransport hervor. Zudem können Umweltwirkungen der FCEA u.a. durch Lebensdauererweiterungen und Recycling in der ersten und letzten Lebensphase meist um mehr als die Hälfte reduziert werden. Mit dem angewendeten Framework und dem Übertrag zwischen Bestandteilen von LCI, eLCI und pLCI waren relevante Stellschrauben zur ökologischen Verbesserung frühzeitig feststellbar, die mit den Inventar-Parametern Regenerative Energien Anteilserhöhung im

---

Strommix, Herstellungspfadverbesserung von Flüssigwasserstoff, Lebensdauererhöhung von Komponenten und Recyclinginputrateerhöhung zum Lebensende sowie deren Modifizierung als Potenziale zum Transformationsprozess im Flugsektor bestätigt wurden. Die transparente Umsetzung des Frameworks unter den klimaresilienten Maßnahmen der FCEA ermöglichte mit dem Benchmarking zu den übergeordneten Zielsetzungen des Flugsektors, das Gelingen der sektorenspezifischen Transformation für den untersuchten Teilbereich aufzuzeigen. Zum Abschluss der Fallstudienanwendung wurden die aus den neun Flugzeugmodellen erzeugten Umweltwirkungsergebnisse der retrospektiven LCA und prospektiven LCA validiert und ausgewertet. Zur Darlegung des Verbesserungspotenzials der Sachbilanz-Modelle aus der Methodenanwendung wurde eine Datenqualitätsbewertung durchgeführt, die eine Eignung der prospektiven Daten unter geringerer Fehleranfälligkeit bestätigte und für pLCA-Resultate eine nachweisliche Verbesserung der technologischen und zeitlichen Repräsentativität der Daten durch die Anwendung des Frameworks in drei Methodenteilen zeigte. Für signifikante Verbesserungen der Umweltauswirkungen des Personentransports in einem Flugzeug wird der Bedarf von Maßnahmen wie die technologische Weiterentwicklung der Flugzeuge bzw. eine dekarbonisierte Wasserstoffversorgung für die Entscheidungsträger hervorgehoben. Abschließend kann mit der Anwendung des Frameworks nicht nur der Vergleich von in Entwicklung befindlichen Technologien verbessert werden, sondern auch mit dem Benchmarking zu vielfältigen Sektorenzielsetzungen eine Entscheidungsunterstützung hinsichtlich der Vorteilhaftigkeit des brennstoffzellenelektrischen Flugzeugs noch vor dem hybridelektrischen Flugzeug als hinreichend geeignete TTS für die Zielerreichung im Transformationsprozess zum Zielzustand einer nachhaltigen Mobilität ermöglicht werden.

In Kapitel 8 wurde das Framework in den Kontext der Forschung eingeordnet und das Vorgehen und die Forschungsergebnisse in Bezug auf den erzeugten Mehrwert diskutiert.

Die Methodenentwicklung und Methodenanwendung wurde kritisch gewürdigt und zeigt in der Gegenüberstellung zu anderen Methoden und Forschungsergebnissen durch die zweigeteilte Modellierungsanstrengung das Erreichen von Resultaten für eine differenzierte Verwendung auf. Einerseits stellt die eLCI einen absoluten Neuwert zur vollständigen TTS Nachbildung mit weiterverwendbaren Daten und Ergebnissen dar. Andererseits schafft die pLCI mit einem relativen Neuwert, das vorhandene Wissen schlüssig zusammenzuführen und gewinnbringend zu einem optimal anwendbaren Ablauf für Ökobilanzierer zu erweitern. Die Erzeugung separater Modelle für TTS unter besonderen Anforderungen und die optimierte Integration von Szenarioanalyse in die Ökobilanzierung ermöglicht in der Berücksichtigung von Technologieentwicklung und Zukunftsentwicklung ein umfassendes Framework, mit dem schrittweise die Herausforderungen von in Entwicklung befindlichen Technologien bewältigt werden können. Zudem wurde aufgezeigt, dass die spezifischen Stufen aus dem Vorgehen der LCI abgeleitet und die qualitative Nachbildung mit einer Parameter Identifizierung, die Quantifizierung mit einer Parameter Erarbeitung und die Modellverrechnung mit einer Bestimmung verrechneter Prozesse, Parameter und Flüsse in mehreren zeitlichen Zuständen umgesetzt werden können. Der Mehrwert der ex-ante Sachbilanz liegt in der systematischen Betrachtung eines neuartigen Produktsystems, indem physische Veränderungen klassifiziert und Transformations-Parameter vorgestellt, vorhandene Daten nutzbar gemacht und mit Datengenerierungstechniken vervollständigt sowie Änderungen ersichtlich gemacht werden. Die Potenziale der prospektiven Sachbilanz, die in Anlehnung an die Vorausschau Gemeinschaft in drei Kernstufen für neun Gütekriterien

---

erzeugt ist, umfassen die Integration der etablierten Identifizierung von Schlüsselfaktoren und deren Validierung, die erweiterte Erarbeitung quantitativer Werte mit Analysen von Ursache, Umsetzung und Folgen der Modifizierung sowie die umfassende Bestimmung von Framework-Resultaten im je dokumentierten Abschluss des Szenarioentwicklungsprozesses, des ökobilanziellen Nachbildungsprozesses und des gesamten Framework-Prozesses. Für die systematische Entwicklung von Zukunftsszenarien wurden Gemeinsamkeiten zu anderen Studien festgestellt, das Aufzeigen des Entwicklungsprozesses zur schrittweisen Parameter-Modifizierung mit differenzierter Einordnung der Inventar-Parameter in Veränderungslevel, Nutzbarmachung von Datenmodifikationstechniken für Zukunftsannahmen und Sammlung der Änderungen zur Dokumentation im bereitgestellten Parametermodifikationsverzeichnis ist bislang nicht in der Literatur behandelt worden. Die Methodenanwendung auf die drei 19-Sitzer Flugzeuge zeigt eine Symbiose vielfältiger Parameter zueinander, weshalb eine separate Nachbildung in LCI, eLCI und pLCI mit einem Aufzeigen des Entwicklungsprozesses der Sachbilanz unter Anwendung des editierbaren Parameterverzeichnisses abschließend systematisch gut aufbereitete und nutzbare Ergebnisse erzeugen konnte.

Zum Abschluss der Forschungsarbeit stehen in (Hanesch, 2024b) ein Transportmodell, zwei Transformationsmodelle und sechs Zukunftsveränderungsmodelle in drei Flugzeugvarianten zur Verfügung. Sie dienen mit den erzeugten Umweltwirkungsergebnissen einerseits für die Transformation des Flugsektors zur Entscheidungsunterstützung und können andererseits weitergenutzt werden, um weitere TTS beispielsweise auf Basis von alternativen Kraftstoffen daraus zu generieren oder mittels Modifizierung weitere Zukunftsszenarien zum Vergleich zu erzeugen. Auf Grundlage des editierbaren Parameterverzeichnisses in (Hanesch, 2024a) wird ein nachvollziehbarer Entwicklungsprozess für Ökobilanzierer möglich. Bereitgestellte Daten erreichen einerseits die Umsetzung vielfältiger neuer ökobilanzieller Untersuchungen und andererseits die Offenlegung von Zukunftsänderungen wie mit Szenario-Narrativen der Zukunftsszenarien Keep moving forward, Wind of change und Fast progress, um erzeugte Ergebnisse in Bezug auf mögliche Unsicherheiten in der Untersuchung und dem zugrunde gelegten Entwicklungsprozess an Nutzer der LCA-Ergebnisse transparent zu kommunizieren.

### 9.1.2 Beantwortung der Forschungsfrage

Aus der Zusammensetzung der vielfältigen Einzelbestandteile lässt sich für das zu einem einheitlichen Ganzen zusammengefasste Vorgehen der Arbeit zur zentralen Fragestellung der Arbeit Position beziehen. Die Forschungsfrage lässt sich somit nachfolgend beantworten.

*Wie können in Entwicklung befindliche Transformationslösungen von Verkehrsmitteln zukunftsgerichtet für eine Umweltbewertung nachgebildet werden, um für den Verkehrssektor bereits jetzt einen Transformationsprozess zum Erreichen der Klima- und Nachhaltigkeitsziele aufzuzeigen?*

Die in dieser Forschungsarbeit entwickelte neue Methode in den umzusetzenden drei Stufen der eLCI und pLCI, die in ihrer Anwendbarkeit mit der GNOSIS Fallstudie und den erreichten Ergebnissen elektrifizierter Kleinflugzeuge unter Beweis gestellt wurde, stellt eine geeignete Herangehensweise dar, um im dynamischen Forschungsfeld der in Entwicklung befindlichen Flugzeuge als Untersuchungsgegenstand und der prospektiven Ökobilanzierung als Methode dem Bedarf nach einem geeigneten Vorgehen für vergleichbare Ökobilanz-Ergebnisse von

---

neuartigen und zukünftigen Fahrzeugen gerecht zu werden. Eine systematische dreigeteilte Vorgehensweise und eine darauf basierende Umsetzung zur Transformation des Flugsektors ließ sich im Verlauf der Arbeit aufzeigen. Mit dieser stringenten Anwendung des Frameworks entstehen aus der Nachbildung von zwei Transport-Transformationslösungen prospektive Forschungsergebnisse, aus denen neue Erkenntnisse zu Auswirkungen auf Klimawandel, Humangesundheit und Rohstoffnutzung von elektrischem Fliegen geliefert werden können. Im internen Vergleich werden Optimierungspotenziale der TTS im Markthochlauf mittels Zukunftsannahmen demonstriert und im externen Vergleich der Erfolg der Maßnahmen überprüft, indem zunächst die Vorteilhaftigkeit zur ökologischen Nachhaltigkeit gegenüber dem CT im gleichen Zukunftsszenario verglichen und daraufhin ausgewählte relevante Ziele mit einer Prüfung auf klimaresiliente Entwicklungspfade diesen gegenübergestellt werden.

Die prospektiven Umweltwirkungen von HEA und FCEA demonstrieren für den Flugsektor im Transformationsprozess unter allen zugrundeliegenden Veränderungen wie u.a. der Anstieg der regenerativen Energien sowie der Reduktion des Materialeinsatzes in den Zukunftsveränderungsmodellen das Vorhandensein von klimaresilienten Maßnahmen. Mit den pLCA-Ergebnissen der TTS lässt sich nach Marktetablierung der Flugzeuge ein Potenzial für das Erreichen der Klima- und Nachhaltigkeitsziele im Bereich Emissionen und Energie besonders für das Wasserstoffflugzeug FCEA feststellen, sodass dieses möglichst zeitnah statt konventioneller Kleinflugzeuge eingesetzt werden sollte, um im Transformationsprozess zu mehr Nachhaltigkeit dienlich zu sein. Für die FCEA lassen sich die Ziele zur Reduktion von Treibhausgasen und Luftschadstoffen in dem Benchmarking mit der Beechcraft 1900D in der mittelfristigen Perspektive unter den explorativen Zukunftsszenarien erreichen. Ehrgeizige Zielwerte wie 88% THG-Reduktionen bis 2040 aus dem Bundes-Klimaschutzgesetz oder der Erreichung von Treibhausgasneutralität bis 2050 aus der Deutschen Nachhaltigkeitsstrategie benötigen allerdings darüber hinaus größere Anstrengungen, allen voran im Energiesektor wie mit 100% Windstrom zur LH<sub>2</sub>-Bereitstellung, um die Klimaziele langfristig zu erreichen.

Die in dieser Forschungsarbeit abschließend eingeordneten Fallstudienresultate, in denen die Anforderungen bezüglich einer nachhaltigen Mobilität für die TTS mit den prospektiven Parametern aus der Methodenanwendung zumindest für die FCEA weitestgehend erfüllt sind, zeigen umzusetzende Maßnahmen, die bereits jetzt angegangen werden müssen, um den Personentransport in einem Flugzeug für einen Transformationspfad in Richtung des Zielzustands einer vollends nachhaltigen Mobilität signifikant zu verbessern. Darüber hinaus identifiziert die Arbeit bislang unberücksichtigte Tradeoffs wie den hohen Ressourcenbedarf von elektrifizierten Flugzeugen über den Lebensweg, wonach zukünftige Versorgungsrisiken einem erfolgreichen Transformationsprozess entgegenstehen können.

## **9.2 Empfehlungen und Maßnahmen für eine nachhaltige Mobilität**

Diese Forschungsarbeit hat mit der entwickelten Methode, deren Umsetzung und den daraus erzeugten Ergebnissen die Notwendigkeit demonstriert, klimaresiliente Entwicklungspfade frühzeitig für eine rasche und effektive Transformation des Verkehrssektors mit den für eine nachhaltige Mobilität als geeignet befundenen Lösungen aufzuzeigen. Aus den Mehrwerten des angewendeten Frameworks sind für praktische Akteure als Technologieentwickler und politische Akteure als Gesetzgeber zur Entscheidungsunterstützung sowie für anwendende Ökobilanzierer zur Etablierung der Methode verschiedene Empfehlungen zu formulieren.



---

### 9.2.1 Entscheidungsunterstützung für Technologieentwickler

Die Forschungsergebnisse zeigen einen großen Beitrag zum Erreichen der Klima- und Nachhaltigkeitsziele auf und bestätigen mit der Anwendung des Frameworks in drei Methodenteilen das Vorhandensein von klimaresilienten Entwicklungspfaden für die zwei untersuchten Technologiealternativen HEA und FCEA für verschiedene Zeithorizonte.

Im Speziellen können für die Fallstudie die folgenden Aussagen und Empfehlungen zu klimaresilienten Maßnahmen für Technologieentwickler aufgezeigt werden:

1. Reduktion des Energieverbrauchs für den Transport als größter Umweltwirkungsbeitrag durch eine Verringerung der transportierten Masse bzw. des Fahrzeuggewichts.
2. Größtmögliche Dekarbonisierung des Strommix und der Wasserstoffherstellung.
3. Verlängerung der Komponentenlebensdauern und Erhöhung der Recyclingquote mit der besseren Trennbarkeit der Materialien zur qualitativ hochwertigen Wiederaufbereitung.
4. Verringerung des Einsatzes von kritischen Rohstoffen in Schlüsseltechnologien des Vordergrundsystems wie Batterien und des Hintergrundsystems wie Photovoltaik.

Auf diese Maßnahmen haben die Fahrzeugentwickler mehr oder weniger direkten Einfluss, im Vorentwurf besonders auf das Fahrzeuggewicht, die berücksichtigte Rezyklierbarkeit der Fahrzeugbestandteile und die Wahl von weniger ressourcenkritischen Schlüsseltechnologien im Antriebssystem sowie ab dem Pilotbetrieb auf die gewählte Wasserstoffherstellung.

Zudem müssen sie zu folgenden Maßnahmen in Abstimmung mit anderen Akteuren treten:

5. Rasches Ausscheiden von fossilen Kraftstoffen wie Kerosin als genutzte Energieträger zur Mobilität, um den Markthochlauf von alternativen Kraftstoffen zu fördern.
6. Kontinuierliche Erforschung und stetige Umweltbewertung der TTS im Markthochlauf.
7. Reduktion der Mobilität insgesamt, um den Mehrbedarf an regenerativem Strom und Rohstoffen als Zielkonflikt mit anderen Bereichen im Wettbewerb zu vermeiden.

Die fünfte Empfehlung gilt es in Abstimmung mit Gesetzgebern umzusetzen, da nur sie die notwendige Verfügungsgewalt über Verbote und Subventionen von Produkten im Markt haben. Die sechste Empfehlung benötigt die fundierte Expertise von Ökobilanzierern, um nach ISO Norm und den Erweiterungen eine effiziente sowie zugleich stetige Durchführung von LCA der TTS während dem Produktentwicklungsprozess zu ermöglichen. Für die siebte Empfehlung wird die Kommunikation mit Nutzergruppen bzw. Deklaration des Fahrzeugs vorausgesetzt, um auf Folgen der Mobilität bezüglich Klimawirkung oder Rohstoffnutzung hinzuweisen und zum mäßigen Gebrauch zu mahnen. Zur Gewährleistung wirtschaftlichen Fortbestehens sind die Technologieentwickler in der Verantwortung, mit allen Akteuren zu agieren, wobei sie auf die Umsetzung der Maßnahmen nur indirekt Einfluss ausüben können.

Im Allgemeinen sind viele dieser Aussagen auch auf andere Technologien im Flugsektor und im Verkehrssektor sowie auf andere Sektoren übertragbar. Die Methodenanwendung für Kleinflugzeuge ist unter vorausgesetzten Zukunftsänderungen eindeutig in dem Resultat, dass trotz technologischem und zeitlichem Fortschritt des konventionellen Flugzeugs jeweils die Transport-Transformationslösung im Markt etablierungsjahr das vorteilhaftere Flugzeug darstellt. Dem Problem der unsicheren Zukunftsfähigkeit der betrachteten TTS kann mit dem frühen Aufzeigen von Herausforderungen wie für CFK in der Tragstruktur bzw. kritischen Rohstoffen im Antriebssystem bezüglich hohen Umweltwirkungen, Rezyklierbarkeit und



---

Versorgungsrisiken entgegnet werden. Veränderungen im Technologieentwurf lassen sich somit noch unter geringerem Aufwand realisieren.

Die Klimawirkung ist für die Entwicklung von TTS essentiell. Die transparente, systematische und umfassende Ermittlung der ökologischen Vorteilhaftigkeit im Vergleich zu etablierten Verkehrsmitteln ebnet ab der frühen Produktentwicklungsphase die Wege für den Einstieg von Investoren. Das Aufzeigen der möglichen Konformität zu übergeordneten Zielsetzungen kann die Förderfähigkeit aus Investorensicht zusätzlich verbessern, denn klimaresiliente Entwicklungspfade von TTS sind das Kapital der Produkte von morgen.

Langwierige Iterationen vieler neuartiger Technologien im realen Markthochlauf, die zu keinem oder nicht dem gewünschten Output führen, lassen sich mit der Anwendung des Frameworks im Technologieentwicklungsprozess vermeiden, da bereits vollumfänglich prospektive Resultate dargelegt werden können. Diese pLCA-Ergebnisse sind mit höheren TRL-Stufen des Fahrzeugs und dem zeitlichen Voranschreiten der umgebenden Märkte zu prüfen bzw. mit neuen Realdaten zu ergänzen, wobei sich auf einer guten und transparenten Vorarbeit mit vielen weaternutzbaren Bestandteilen und Daten besser aufbauen lässt.

Aus den Vorteilen des in vielfältigen Schritten umgesetzten und darauf leicht anknüpfbaren Frameworks entsteht für begleitende Forschungsaktivitäten und Entwicklungsaktivitäten eine Straffung mit deutlicher Tendenz zu Technologievarianten mit dem größten Potenzial. Effektivere Forschung und Entwicklung sowie mehr Innovationen können die Folge sein und tragen nicht nur zum globalen Ziel der Treibhausgasneutralität bei, sondern haben auch positiven Einfluss auf die volkswirtschaftliche Leistungsfähigkeit und die Standortsicherung.

## 9.2.2 Entscheidungsunterstützung für Gesetzgeber

Der Mehrwert der Forschungsarbeit in Bezug auf das neue Framework kann für Gesetzgeber wie folgt formuliert werden:

1. Das frühe Erkennen lohnenswerter Transporttechnologien hinsichtlich der ökologischen Vorteilhaftigkeit gegenüber Alternativen unter möglichen Maßnahmen zur Verbesserung kann Entscheidungsträgern für den angesetzten Transformationsprozess mit Ergebnissen aus der systematisch angeleiteten Variation von Parametern der neuartigen Technologie trotz fehlenden Primärdaten ermöglicht werden.
2. Ein gutes Verständnis von Vorteilen und Beschränkungen innerhalb des umweltbezogen bewerteten Entwurfsmodells bzw. Pilotfahrzeugs wird für alle am Entwicklungsprozess beteiligten Akteure erzeugt, da mit dem eLCI-Ergebnis separat auf noch zu lösendes Optimierungspotenzial im Technologieentwicklungsprozess hingewiesen wird und nicht ausschließlich pLCI-Ergebnisse mit verbesserten Zukunftsszenarien übermittelt werden.
3. Eine beschleunigte Lösungsfindung in allen Sektoren und besonders im Verkehrssektor zur Einhaltung langfristiger Klimaziele kann mit einer Verhinderung ergebnisgerechter Datenbeeinflussung durch größtmögliche Transparenz prospektiver Daten und deren Entwicklungsprozess erreicht werden, wie die systematische Methodenanwendung zeigt.

Aus diesen Vorteilen ergeben sich weitere Empfehlungen für umzusetzende Maßnahmen.

Da die Wirkungskategorie Klimawandel die größte wissenschaftliche Fundiertheit aufweist, sollten Entscheidungen bevorzugt hinsichtlich der Klimawirkung von Fahrzeugtransporten

---

getroffen werden. Priorisierte Maßnahmen für die Klimaziele sind im Betrieb der Fahrzeuge eine Energieträgereffizienz und dekarbonisierter Strom bzw. Wasserstoff mit der Förderung weiterer Forschung zu elektrischen Antrieben unter Integration von Energieingenieuren und Materialwissenschaftlern. Einerseits gilt für regenerative Energieerzeugungsanlagen ein effektiver Ausbau mit dem Fokus auf Windkraft sowie Förderanreize zur Implementierung von Photovoltaik, während andererseits zeitnah der Aufbau einer Wasserstoffversorgung mit priorisiertem grünen Wasserstoff in flüssigem und gasförmigem Zustand benötigt wird. Eine beschleunigte Erforschung und der Markthochlauf alternativer Kraftstoffe mit Schwerpunkt auf Wasserstoff kann mit spezialisierten Forschungszentren zu Wasserstoff und weiteren alternativen Kraftstoffen wie auf Basis von Power-to-Liquid oder Biomasse gefördert werden.

Nicht-intendierte Nebeneffekte wie erhöhter Rohstoffbedarf elektrifizierter Flugzeuge sind in die Entscheidungen aufzunehmen, um im Produktentwicklungsprozess und spätestens mit Einsetzen des realen Transformationsprozesses mögliche Gegenmaßnahmen von staatlicher Seite umzusetzen. Für die Ressourcenschonung sind mögliche klimaresiliente Maßnahmen die Verpflichtung der Fahrzeughersteller zur Rücknahme des Produkts als Kreislaufführung, die Forschungsförderung zu Recyclingmöglichkeiten von Verbundwerkstoffen und kritischen Rohstoffen und dem Aufbau spezialisierter Recyclingunternehmen zu Schlüsseltechnologien im elektrischen Antrieb. Weiterhin sind u.a. Batterien für elektrisches Fliegen mit niedrigem Gewicht und hoher Leistung für geringere Energieeinsätze bzw. weitere Transportdistanzen zeitnah in möglichst räumlicher Nähe von Fahrzeugherstellern zur Marktreife zu bringen. Zudem kann der Einsatz weniger kritischer Rohstoffe Preise senken, Abhängigkeiten von Förderländern sowie Umweltwirkungen reduzieren.

Problematisch zum Benchmarking von Zielwerten sind generell fehlende quantitative Werte für materialbasierte Umweltwirkungen. Auch könnten Klimagesetze von Bund und Ländern unter Berücksichtigung von CO<sub>2</sub>-eq pro funktionelle Einheit die Vergleichbarkeit mit LCA-Resultaten verbessern. Für den lebenswegbezogenen Fahrzeugtransport fließen die Bereiche Energiewirtschaft, Industrie und Abfallwirtschaft mit in die ökobilanzielle Betrachtung ein, wodurch die Zuordnung vielfältige Einzelrechnungen benötigt. Folglich besteht ein Potenzial zur Straffung und Harmonisierung von Ökobilanzen und Gesetzen. Je mehr Elektrifizierung in allen Sektoren auftritt, desto mehr verlagert sich auf die Vorketten von Energieträgern des zugeordneten Energiesektors. Daher wird für Fahrzeugtransporte eine Zuordnung von Umweltwirkungen statt ausschließlich auf TtW zumindest auf WtT und TtW als vollständige Betrachtung der Nutzenphase empfohlen. Hieraus werden keine relevanten THG-Emissionen für das langfristige Ziel von Treibhausgasneutralität vernachlässigt und die Problematik der Klimazielerreichung nicht nur auf wenige Akteure in der Energiewirtschaft verlagert.

Gesetzgeber müssen die gesetzten Klimaziele in nationale Strategien übersetzen und in der Umsetzung kontrollieren. Für eine effizientere Klimapolitik kann das vorgestellte Framework zur frühzeitigen Entscheidungsunterstützung neuartiger Technologien ein Benchmark von Förderrichtlinien werden, um den Markthochlauf und die Förderfähigkeit mit den geltenden Klimagesetzen zu koppeln. Zugleich sollten Gesetzgeber in übermittelten Ökobilanzen auf einen transparenten Umsetzungsprozess besonders für prospektive Ergebnisse achten, um die Beeinflussung von Daten zu einem gewünschten Ergebnis und mögliche Manipulationen zu vermeiden. In Anbetracht des mittlerweile sehr knappen Zeithorizonts ermöglicht diese Arbeit mit der Anwendung des Frameworks auf wenig entwickelte Transporttechnologien wie elektrischem Fliegen die frühzeitige Einordnung in ihre Förderfähigkeit.

---

Zur staatlichen Förderung im Distanzsegment der Kurzstrecke wird die Fokussierung auf das umweltleistungsstärkere Wasserstoffflugzeug empfohlen, da für die reinelektrische Variante eine ökologische Vorteilhaftigkeit gezeigt werden kann, mit denen anvisierte Zielwerte fast aller untersuchter Zielvorgaben weitgehend erreichbar sind. Als alarmierendes Resultat wird ein deutliches Verfehlen der Zielvorgaben im Referenzzustand für elektrisches Fliegen ohne Maßnahmen wie Dekarbonisierung offenbar, daher sind klimaresiliente Maßnahmen bereits jetzt anzugehen. Gleichzeitig ist schon früh die notwendige Infrastruktur zu berücksichtigen, um sich mit Flughafenbetreibern, Flugzeugentwicklern und Airlines über Möglichkeiten der staatlichen Unterstützung für den schnellen Umstieg auf klimaschonendere Alternativen wie dem Aufbau einer grünen Wasserstoffversorgung auf internationaler Ebene auszutauschen.

Das Framework dient mit den integrierten Qualitätskriterien einem zielgerichteten Fördern potenziell wirksamer TTS und lässt sich in einer Umwandlung von Prozessen, Parametern und Flüssen ebenso auf andere Sektoren wie beispielsweise den Gebäudesektor übertragen. Abschließend kann das entwickelte Framework in den vielen Bestandteilen dazu verwendet werden, um verbindliche Vorgaben für Ökobilanzierer bezüglich dem zu dokumentierenden Ökobilanz-Bericht, wie ihn der Standard der ISO Norm vorgibt, oder zumindest bezüglich den an Entscheidungsträger zu übermittelnden Ökobilanz-Ergebnissen festzulegen.

### 9.2.3 Empfehlungen für Ökobilanzierer

Der Mehrwert dieser Forschungsarbeit zur Anwendung des neuen Frameworks kann für Ökobilanzierer wie folgt formuliert werden:

1. Die Datenqualität von in Entwicklung befindlichen Technologien lässt sich nachweislich in den drei Qualitätsfaktoren Daten-Vollständigkeit durch die eLCI sowie Technologisch korrekte Daten und Zeitlich korrekte Daten durch die pLCI verbessern, woraus die Unsicherheit der Sachbilanz-Resultate trotz epistemologischer Zukunftsunsicherheit für TTS bereits zu einer frühen Technologiereifestufe verringert werden kann.
2. Eine vereinfachte Replikation und Nutzung von Synergieeffekten für weitere Transport-Transformationslösungen sowie Zukunftsszenarien kann mit nur einem parametrisierten Transportmodell in der LCI, der Austauschbarkeit und Übertragbarkeit von Prozessen, Parametern und Flüssen in der eLCI für vielfältig abgewandelte Transformationsmodelle sowie in der pLCI für gewählte weitere Zukunftsveränderungsmodelle erreicht werden.
3. Für das Erreichen nachhaltiger Mobilität als Zielanforderung der Methodenentwicklung wird ein Ausschlussverfahren von weniger für den Transformationsprozess geeigneten Technologien ab dem frühen Technologieentwicklungsprozess unter verhältnismäßig geringem Aufwand möglich, indem mit dem im Framework erzeugten pLCI-Ergebnis und dem Benchmarking zu Sektorenzielsetzungen für alle Entscheidungsträger die weitere Forschung und Entwicklung direkt auf vielversprechende TTS gelenkt wird.

Aus diesen Vorteilen ergeben sich weitere Empfehlungen für eine optimale Anwendung.

Die Bewältigung der Herausforderungen zur Nachbildung von in Entwicklung befindlichen Technologien wurde mit dem gezeigten Framework in einer schrittweisen Anleitung gelöst und ermöglicht ab der frühen Produktentwicklungsphase vereinfachte sowie vollständige Nachbildungen von TTS unter reduzierter Datengenerierungsmenge. Potenziell wirksame TTS sind in der weiteren Entwicklung mit der stetigen Hinzunahme neuer Primärdaten im

---

Markthochlauf über höhere TRL-Stufen unter Umsetzung des Frameworks evaluierend zu begleiten.

In drei Veränderungslevel berücksichtigte Parameter erhöhen Transparenz und Qualität im Nachbildungsprozess für wissenschaftlich fundierte und vergleichbare pLCA-Resultate. Die Abfolge der ex-ante Sachbilanz und prospektiven Sachbilanz ermöglicht in Kombination die passgenaue Nachbildung mit Zukunftsszenarien zum Erhalt von Umweltwirkungsergebnissen für unterschiedliche Zeithorizonte, Veränderungsintensitäten und Anwendungszwecke. Da die Ergebnisse von eLCI und pLCI der zweigeteilten Umweltbewertung ein verschiedenes Aussagepotenzial haben, ist eine differenzierte Dokumentation im Parameterverzeichnis relevant.

Im Prozess der Entscheidungsunterstützung ist das eLCI-Ergebnis ein wichtiger Bestandteil, da das Wirkungsabschätzungsprofil den aktuellen Entwicklungsstand darstellt und wichtige Hinweise liefert, was noch getan werden muss, um ein nachfolgendes prospektives Ergebnis zu erreichen. Gleichzeitig wird gezeigt, was geschieht, wenn sich die Technologie und das umgebende System nicht wie in den Zukunftsszenarien angenommen ändern. Demnach ist die LCA im Referenzzustand ein notwendiges Teilergebnis des Frameworks, das in der eLCI separat nachgebildet und direkt modelliert werden sollte. Erst durch dieses in Kombination mit den pLCI-Ergebnissen erhalten Entscheidungsträger ein vollumfängliches Bild über die untersuchte Technologie im Entwicklungsprozess. Zur korrekten Kommunikation des eLCI-Resultats ist allerdings stets zu verdeutlichen, dass dieses nur dem internen Vergleich dient.

Durch die gute Weiternutzbarkeit von eLCI-Resultaten lassen sich personelle, finanzielle und zeitliche Ressourcen im erneuten Umsetzungsprozess einsparen, sodass zumindest die nicht-modifizierten Fahrzeugmodelle bestenfalls nach sog. FAIR-Prinzipien als Forschungsdaten öffentlich zugänglich gemacht werden sollten. Ökobilanzierer, die eine ex-ante Sachbilanz mit dem separaten eLCI-Resultat pro TTS umsetzen, ermöglichen komplette, transparente und noch nicht zukunftsgeänderte Abbilder für Entscheidungsträger. Aus den Resultaten sollten die Akteure zum Abschluss die Entscheidung treffen können, ob der Aufwand zum Erreichen der diesen gegenübergestellten Zukunftsszenarien im Rahmen des Machbaren liegt bzw. ob weitere Hemmnisse im Markthochlauf existieren wie eine künftig notwendige Nutzeranzahl für die umzusetzende Flüssigwasserstoffversorgung, welche dem Eintreten des Zukunftsszenarios entgegenstehen können.

Für vergleichende Aussagen zur Entscheidungsunterstützung zwischen Verkehrsmitteln sind ausschließlich pLCI-Resultate mit technologisch und zeitlich repräsentativen Daten geeignet. Besonders für den entfernten Zeithorizont sind differenzierte und vielschichtige Ergebnisse darzustellen, um Vorteile und Nachteile der zeitlichen Zustände in Bezug auf Ökologie sowie am Ziel der nachhaltigen Mobilität abzuwägen und die raschere, effektivere Förderung oder Verwerfung spezifischer TTS zu ermöglichen. Für umfassende Entscheidungsprozesse ist es zweckmäßig, bereits ein Benchmarking zu Sektorenzielsetzungen zum Entwicklungsbeginn umzusetzen und frühzeitig die Vergleichstechnologie für die Zielvorgaben zu ermitteln.

Folglich gilt es, eLCI-Ergebnis und alle pLCI-Ergebnisse anzugeben und Entscheidungsträger über beide Ergebnisarten und deren Verwendbarkeit in Kenntnis zu setzen. Für diese Zwecke sind bereitgestellte Tools aus der dritten Stufe von eLCI bzw. pLCI in dieser Arbeit dienlich. Es wird daher empfohlen, das Framework nach dem vorgestellten dreigeteilten Vorgehen jeweils in drei Stufen und in den individuellen Arbeitsschritten durchzuführen.

### 9.3 Ausblick der Forschungsarbeit

Zum Abschluss dieser Forschungsarbeit wird ein weiterführender Ausblick über die erreichte Anwendbarkeit, die mögliche Weiternutzbarkeit und den zusätzlichen Forschungsbedarf sowie den übergeordneten Handlungsbedarf gegeben.

#### 9.3.1 Anwendbarkeit des Forschungsbestrebens

Obwohl die aktuelle Methodenforschung auf prospektive Ökobilanzierung fokussiert, zeigt diese Forschungsarbeit, dass eine separate Integration der frühen Produktentwicklungsphase als ex-ante Sachbilanz die Nachbildung präzisieren und hinsichtlich einer Abgrenzung von Ausgangslage und Zukunftsbetrachtung verbessern kann. Das entwickelte und umgesetzte Framework für elektrifizierte Kleinflugzeuge wird, eingebettet in den Gesamtkontext von Produktentwicklungsprozess, Szenarioentwicklungsprozess und Transformationsprozess, in Abbildung 42 übergeordnet dargestellt und in Relation zu Zielsetzungen wie dem Flightpath 2050 gestellt, aus denen sich für neuartige und zukunftsgerichtete Transporttechnologien weiterführende Aussagen für den Zielzustand einer nachhaltigen Mobilität ableiten lassen.

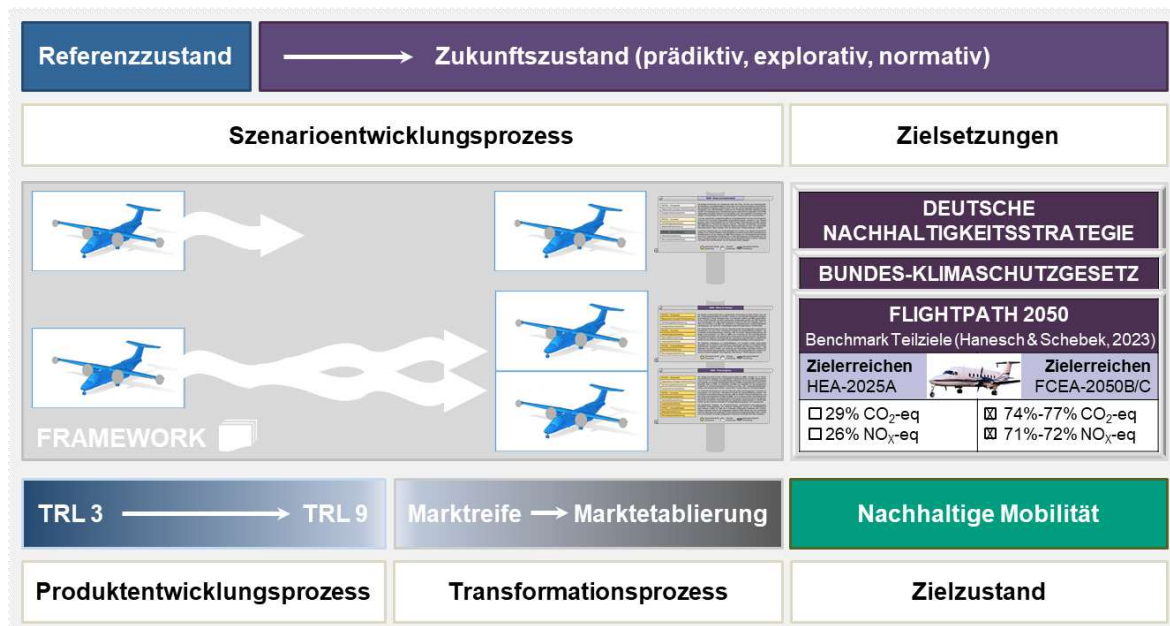


Abbildung 42 Einfassung des neu entwickelten und angewendeten Frameworks in den übergeordneten Kontext.

Aus den Erkenntnissen der Forschung lassen sich die folgenden weiterführenden Aussagen formulieren:

1. Die Arbeit führt zu einem neuen Framework in der Schnittstelle Technologieentwicklung und Zukunftsentwicklung nach einem systematischen Vorgehen für den Erhalt von einem kompletten und passgenauen Modell eines in Entwicklung befindlichen Produktsystems.
2. Die Arbeit berücksichtigt Herausforderungen neuartiger Technologien in der Erweiterung der Sachbilanz mit zwei Bestandteilen für Modelle von erstens höherer Vollständigkeit und zweitens technologischer sowie zeitlicher Repräsentativität zur Gegenüberstellung des Zielzustands einer nachhaltigen Mobilität ab der frühen Produktentwicklungsphase.



- 
3. Da für neuartige Flugzeuge lebenswegbezogene Untersuchungen fehlen und noch keine Forschungsmethode alle Einzelerkenntnisse zur Anleitung von Ökobilanzierern vereint, fokussiert die neue Methode zunächst auf die technologischen Veränderungen und daraufhin auf eine Vergleichbarkeit der Fahrzeugmodelle untereinander.
  4. Die Forschung zeigt Verbesserungen der Umweltleistung von elektrifizierten Flugzeugen gegenüber konventionellen Flugzeugen für einen erfolgreichen Transformationsprozess zu den Klima- und Nachhaltigkeitszielen auf.
  5. Für die Zukunftssituation im Marktetablierungsjahr der strom- und kerosinnutzenden HEA und der strom- und flüssigwasserstoffnutzenden FCEA werden acht bzw. zehn verschiedene Inventar-Parameter wie zu Nutzungsdauererhöhungen und Strommix-Zusammensetzungen modifiziert, woraus sich ein Gelingen der Transformation im Flugsektor demonstrieren lässt.
  6. Die Anwendung des Frameworks in drei Methodenteilen ermöglicht eine nachweisliche Verbesserung der Datenqualität und zeigt als größte Stellschraube den Energieträgereinsatz sowie in der Kombination mit den Parametern Regenerative Energien Anteilserhöhung, Herstellungspfadverbesserung, Lebensdauererhöhung und Recyclinginputrateerhöhung eine ökologische Vorteilhaftigkeit in Zukunft, woraus das brennstoffzellenelektrische Flugzeug als besser geeignet für den Transformationsprozess und die Zielsetzungen hervorgeht.
  7. In der zweigeteilten Modellierungsanstrengung mit berücksichtigten Herausforderungen für die Technologieentwicklung und Zukunftsentwicklung wird durch weiterverwendbare Resultate und dem Aufzeigen von Ursache, Umsetzung und Folgen der Modifizierung unter neun Gütekriterien ein optimal anwendbarer Vorgehensablauf für Ökobilanzierer erreicht.
  8. In der Symbiose von vielfältigen Parametern zueinander erfolgt eine separate Nachbildung der Flugzeuge in einem nachvollziehbaren Entwicklungsprozess und mit in drei Szenario-Narrativen offengelegten Zukunftsveränderungen, woraus gut aufbereitete Ergebnisse zur Entscheidungsunterstützung sowie Weiternutzung für weitere TTS und Zukunftsszenarien entstehen.

Darüber hinaus ergibt sich aus der Methodenentwicklung und Methodenanwendung des Forschungsbestrebens in dieser Arbeit ein zusätzliches Potenzial für die Anpassung, Weiterentwicklung und neue Erforschung. Das entwickelte Framework ist demnach in der weiteren Forschung zu berücksichtigen und kann zur Modellnachbildung ab der frühen Produktentwicklungsphase von neuartigen und zukunftsgerichteten Produktsystemen angepasst, erweitert oder direkt übernommen werden.

### **9.3.2 Weiternutzbarkeit des Frameworks und weiterer Forschungsbedarf**

Die Ergebnisse aus dem entwickelten und umgesetzten Framework ermöglichen eine erste Einschätzung, ob Klima- und Nachhaltigkeitsziele in Zukunft erreicht werden können und darüber hinaus, unter welchen Voraussetzungen sie erreichbar wären. Wichtig ist im Kontext der Mobilitätswende, die Methode an noch mehr Fallstudien zu überprüfen. Für dasselbe Mobilitätsfeld können Daten aus den Flugzeugmodellen der Fallstudie dieser Arbeit genutzt werden, um neue Ergebnisse unter Anwendung des Frameworks diesen gegenüberzustellen oder die bereitgestellten Modelle für neue TTS oder neue Zukunftsszenarien zu erweitern.



---

Als weitere TTS eignen sich beispielsweise Energieträgerwechsel mit einer Substitution von Kerosin in CA und HEA zu biobasierten oder synthetischen Kraftstoffen.

Aufgrund der hohen Detailebene können die neun Modelle der 19-Sitzer Flugzeuge CA, HEA und FCEA in allen inkludierten Parametern und Prozessmodulen auf andere Flugzeuge übertragen werden, beispielsweise auf 9-Sitzer und 50-Sitzer, ohne Veränderungen an der Modellstruktur vorzunehmen. Diese Anpassungsmöglichkeit wurde im Forschungsprojekt GNOSIS bereits umgesetzt, da Daten für die Umweltbewertung von Kleinflugzeugen in zwei anderen Größenklassen bereitstanden. Für den Übertrag wurden die quantifizierten Modelle der Flugzeugvarianten von der abgewandelten Beechcraft 1900D als Vorlage genutzt und mit neuen Daten jeweils neun Modelle für die Cessna 208B und die ATR 42-500 ausgebildet, woraus unter reduziertem Aufwand und verringertem Ressourceneinsatz insgesamt 27 Flugzeugmodelle bereitgestellt werden konnten.

Neben der Untersuchung von Kleinflugzeugen und deren vielfältigen Transformationstypen sind die Forschungsergebnisse der Arbeit für andere Flugzeuggrößen oder Mobilitätstypen, die verschiedene Anforderungen der Mobilität insbesondere im Langstreckensegment erfüllen, weiterzuverwenden und darauf anzupassen. Denn die Zielsetzungen des Verkehrssektors lassen sich langfristig nur vollständig erreichen, wenn für jeden Teilbereich der Mobilität eine ökologischere Alternative identifiziert und in den Markt gebracht wird. Das editierbare Parameterverzeichnis ist darauf ausgelegt, für alle energieträgerbasierten Verkehrsmittel die Nachbildung des Produktsystems zu ermöglichen, indem sich generische Bausteine von Parametern verwenden lassen. Die Übernahme von Prozessstruktur und zusammengestellten Flüssen der Modelle ist ebenfalls möglich.

Weiterer Forschungsbedarf liegt im Markthochlauf der Transport-Transformationslösungen mit der Integration neuer Erkenntnisse wie leistungsverändertes Gewicht und Lebensdauern von Batterien, neuen Komponentenzusammensetzungen oder Recyclingmöglichkeiten bzw. dem Realverbrauch der TTS während dem Pilot- oder Regelbetrieb. Änderungen, die an den bereitgestellten Modellen vorgenommen werden sollten, sind das diversifizierte Einholen von Daten zu den Lebensdauern elektrischer Komponenten, da diese für den Einsatz in elektrischen Flugzeugen zum jetzigen Zeitpunkt noch nicht ausreichend erforscht sind. Mit Beginn des Pilotbetriebs sind ebenfalls prioritär die Energieverbräuche zu messen und mit neuen validen Daten im Modell auszutauschen.

Zudem sind methodisch zur Entwicklung von Zukunftsszenarien nur bestimmte Parameter modifiziert worden, allerdings existieren neben Hintergrundsystemveränderungen in der Energiewirtschaft und der Abfallwirtschaft weitere Bereiche wie eine zukunftsveränderte Industrie hinsichtlich Herstellungsprozessen von Komponenten oder dem Rohstoffabbau, der sich in Zukunft dekarbonisiert oder in Bezug auf den Erzabbau erschwert haben kann. Auch ein zukünftiger Wärmeerzeugungstechnologiemix kann zielführend zur Betrachtung von zukunftsgerichteten Verkehrsmitteln in der Herstellungsphase sein. Die Ergänzung des Parameterverzeichnisses um weitere Inventar-Parameter ist demnach ratsam. Für den Strommix, aber auch für die Wärmeerzeugung spielt der Standort eine große Rolle. Da sich die Umweltbewertung dieser Arbeit auf die nationalen Grenzen Deutschlands bezieht, könnte ein Vergleich der Ergebnisse für andere geographische Bezugsräume interessante Aspekte hinsichtlich Potenzialen und Beschränkungen für die Produktsysteme aufzeigen.

---

Weiterhin sollten sich alle weiteren Ökobilanzen zu TTS im Bereich von Elektromobilität mit Rohstoffen auseinandersetzen, da diese für die Elektrifizierung von Verkehrsmitteln und die regenerative Stromerzeugung in großen Mengen benötigt werden. Die Wirkungskategorie Mineralischer Ressourcenverbrauch der Wirkungsabschätzungsmethode ReCiPe2016 zeigt noch nicht hinreichend wissenschaftliche Fundiertheit der Materialwirkung und ist nicht wie die Kategorie Klimawandel allgemein etabliert, da vielfältige Charakterisierungsmodelle mit unterschiedlichen Indikatoren existieren, die andere Ergebnisse als die Rohstoffknappheit in Kupfer-Äquivalent angeben, sodass weiterer Forschungsbedarf für die Wirkungsabschätzung in Ökobilanzen besteht. Darüber hinaus sind trotz der Relevanz kritischer Rohstoffe auf die Umweltwirkungsergebnisse, welche sich durch den Effekt von kurzen Lebensdauern für Schlüsseltechnologien bei fehlendem Recycling noch weiter steigert, diese in der Methode bislang nicht ausreichend berücksichtigt. Eine Bestimmung von Versorgungsrisiken erreicht die Methode der Kritikalitätsanalyse, welche immer häufiger zur Anwendung kommt. Eine Integration ausgewählter Bestandteile aus der Kritikalitätsanalyse in die Ökobilanzierung in Kombination mit der Szenarioanalyse könnte die Aussagekraft des Frameworks hinsichtlich Knappheitsaspekten für Rohstoffe von neuartigen und zukunftsgerichteten Fahrzeugen weiter erhöhen. Denn eine andauernde Rohstoffknappheit beispielsweise von Neodym kann Auswirkungen auf die Austauschmöglichkeit von Elektromotoren und allgemeine Preissteigerungseffekte verursachen. Zudem stellen mögliche Lieferbeschränkungen von seltenen Erden fördernden Ländern Hindernisse für einen kontinuierlichen Transport mit regenerativem Strom dar, da Neodym meist auch in Windkraftanlagen eingesetzt wird.

Eine Erweiterung des Parameterverzeichnisses auf zusätzliche transportbasierte Parameter oder andere Standard-Parameter sowie Transformations-Parameter z.B. im Gebäudebereich wäre eine gute Ergänzung dieser Arbeit zur Nachbildung neuer Transformationslösungen. Zudem könnten Datengenerierungstechniken über den Verkehrssektor hinaus bereitgestellt und zusätzliche Ergänzungen an den Datenmodifikationstechniken für weitere prospektive Techniken vorgenommen werden. Denn die Datenbeschaffung in der Sachbilanz kann durch ein großes Repertoire an Techniken noch weiter vereinfacht werden.

Da nicht nur die Transformation des Verkehrssektors notwendig ist, können auch mit einer angepassten Methodenentwicklung andere Sektoren abgedeckt werden. Die vorgestellte Vorgehensweise lässt sich auf andere in Entwicklung befindliche Untersuchungsgegenstände ausweiten z.B. auf Energie-Transformationslösungen wie Perowskit-Solarzellen, Gebäude-Transformationslösungen wie Energieplushäuser oder Kreislauf-Transformationslösungen wie KI-gestützte Sensorsortierung. Das Vorgehen des Frameworks ist beispielsweise auf die Umweltbewertung neuartiger Hausbewirtschaftungskonzepte mittels einer technologischen Integration von regenerativen Strom-, Kälte- bzw. Wärmeerzeugungstechnologien als zweiten Wechsel, mittels einer veränderten Gebäudehülle als dritten Wechsel oder mittels einer reinen Energieträgerveränderung wie von Gas auf Wasserstoff bzw. von Netzstrom zu Grünstrom als ersten Wechsel umwandelbar. Hieraus könnte der Gebäudesektor in Theorie und Praxis auf den Transformationspfad in Richtung nachhaltiges Wohnen gebracht werden. Zu diesen methodischen Veränderungen benötigt es noch weitere Forschungsaktivitäten.

Wie die Methodenentwicklung vorangegangener Studien aus dem Bereich der prospektiven Ökobilanzierung gezeigt hat, kann die Methode immer weiter angepasst und verbessert werden, bis möglicherweise eine Vorgehensweise zur Berücksichtigung von Sachbilanz-Nachbildungen im Spannungsfeld von Produktentwicklung und Szenarioentwicklung in

---

einer standardisierten Norm endet, die ein gleichartiges und verpflichtendes Vorgehen für alle Anwender ermöglicht. Für die Dokumentation des angewendeten Frameworks im von der ISO Norm vorgegebenen Ökobilanz-Bericht empfiehlt sich, auf ausgewählte Bereiche zu fokussieren, um die Prägnanz des umgesetzten Vorgehens in Kernbestandteilen wie mit der Übermittlung von Parametermodifikationsverzeichnis und Szenario-Narrative zu erhöhen. Dies unterstreicht den freiwilligen Charakter der eLCI und der pLCI als Ergänzung zur LCI, welche durch die ISO Norm als verpflichtender Bestandteil in den Ökobilanz-Bericht aufgenommen werden muss. Sollte dieser zusammen mit den Modellen öffentlich zugänglich gemacht werden wie der GNOSIS Ökobilanz-Bericht und die Flugzeugmodelle, stehen diese für die Anschlussforschung im Sinne der FAIR-Prinzipien von Forschungsdaten bereit. Daher wird empfohlen, einmal generierte und modifizierte Parameterdaten aus der Anwendung dieses Frameworks stets auch anderen Forschern bereitzustellen, um Synergieeffekte in der Forschung zu erzielen und zu einem raschen und effektiven Transformationsprozess gemeinsam beizutragen.

### **9.3.3 Abschließende Beurteilung für eine nachhaltige Mobilität**

Die Arbeit schließt bezüglich der zu Beginn dargelegten Umweltleistung des Verkehrssektors mit einem Ausblick über THG-Reduktionspotenziale anhand einer Gegenüberstellung der Sektorenentwicklung der letzten Jahre, die teilweise unter Beschränkungen der Regierung während der Corona-Pandemie erfolgte. Eine aktuelle Studie der Agora Energiewende zeigt für die Jahresemissionsmenge im deutschen Verkehrssektor, dass vor der Pandemie 164 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq in 2019 entstanden, welche knapp über dem Ausgangswert der Zielsetzung von 163 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq in 1990 liegt, dagegen konnte diese auf 145 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq in 2020, 147 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq in 2021, 148 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq in 2022 und 145 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq in 2023 reduziert werden, wodurch jährliche THG-Emissionsreduktionen um 9% bis 11% erreicht wurden. Die abschließende Aussage der Studie zur Lage des Verkehrssektors lautet: „Im Verkehrssektor mangelt es weiterhin an einer überzeugenden Gesamtstrategie, um die notwendigen Emissionsminderungen zu erzielen. 2024 sollte der Verkehr mit zielgerichteten Maßnahmen verlässlich auf den Klimaschutzpfad gebracht werden.“ (Agora Energiewende, 2024)

Dies verdeutlicht die Aktualität und Notwendigkeit des Forschungsbestrebens dieser Arbeit, um mit dem vorgestellten Vorgehen zur geeigneten Nachbildung für Ökobilanzierer und klimaresilienten Maßnahmen für die Akteure der Mobilitätswende mit einem Fokus auf den Flugsektor einen Beitrag zu leisten.

Ein detaillierter Einblick in Potenziale zur THG-Emissionsreduktion zu Beginn der Pandemie in 2020, dem einzigen Jahr, in welchem die zulässige Jahresemissionsmenge des Bundes-Klimaschutzgesetzes von 150 Mio. t CO<sub>2</sub>-eq mit der Erfüllung des jährlich sich verringernenden Klimaschutzziels im deutschen Verkehrssektor unterschritten werden konnte, wird in Abbildung 43 auf globaler Ebene gegeben. Ab Mitte März, dem Beginn des sog. Lockdowns, konnten die globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen bis zu ca. 8 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Tag für den bodenbasierten Transport und ca. 3 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Tag für den Flugtransport reduziert werden. Zusammen mit den anderen Sektoren ergab sich eine zeitweilige Verbesserung bis zu 18 Mio. t CO<sub>2</sub> pro Tag. Der Verzicht der persönlichen Mobilität hat folglich einen großen Einfluss auf die Klimazielerreichung und kann aufgrund staatlicher Maßnahmen zur Beschränkung der Mobilität umgehend zu großen Einsparungen führen.

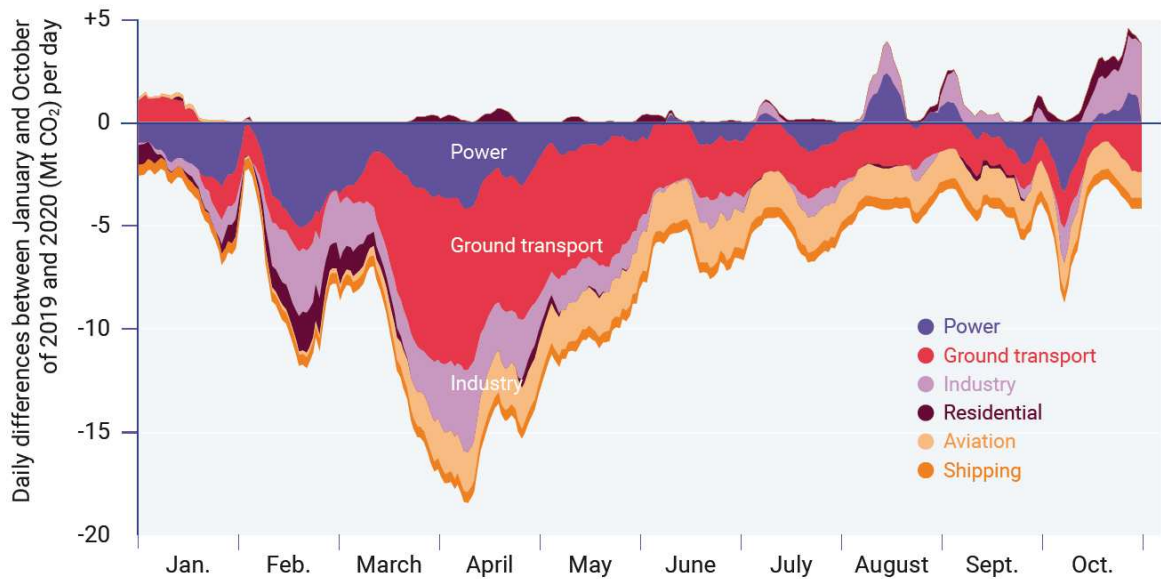


Abbildung 43 Verringerung der globalen CO<sub>2</sub>-Emissionen im Jahr 2020 im Vergleich zu den Werten von 2019 aufgrund des COVID-19-Lockdowns (UNEP, 2020).

Laut der dieser Abbildung zugrundeliegenden Veröffentlichung, in welcher Messungen des Energieverbrauchs mit Abschätzungen der CO<sub>2</sub>-Emissionen kombiniert wurden, ist im ersten Quartal der Coronakrise gegenüberüber dem Quartal des Vorjahres ein globaler Rückgang der CO<sub>2</sub>-Emissionen von fast einem Drittel für den Flugsektor und fast einem Sechstel für den restlichen bodenbasierten Verkehrssektor entstanden, während die anderen Sektoren in dem Zeitraum nur weniger als ein Zwölftel an CO<sub>2</sub>-Emissionen einsparen konnten (Liu et al., 2020). Allerdings wird daraus auch deutlich, dass selbst bei einem nahezu kompletten Mobilitätsverzicht der Bevölkerung eine hohe THG-Emissionsmenge weiterhin entsteht. Dies ist u.a. darauf zurückzuführen, dass Konsumgüter, Produkte und Anlagen sowie Rohstoffe und Abfälle kontinuierlich weltweit transportiert werden. Trotz der großen Stellschraube des Verzichts der Bevölkerung auf die direkte Mobilität existieren demnach vielfältige anthropogene Transportprozesse, die weiterhin indirekt auftreten. Zur Reduktion des Gütertransports stellt eine wichtige Maßnahme für die Bevölkerung dar, den eigenen Verbrauch zu senken und bewusster zu konsumieren, zumal über den halben Erdball transportierte Güter ohne dekarbonisierte Verkehrsmittel die schädlichsten Auswirkungen auf das Klima darstellen.

Ein großes Potenzial für THG-Emissionsreduktionen im Verkehrssektor und spezifisch für den Flugsektor existiert folglich durch einen mobilitätsreduzierten Lebensstil nach dem Konzept der Suffizienz wie weniger berufliches Anreisen bzw. Pendeln aufgrund Homeoffice, weniger Dienstreisen durch virtuelle Meetings und weniger freizeitinduzierte Mobilität wie Sightseeing, Kurztrips und Fernreisen, zusammen mit weniger Beanspruchung von räumlich weit entfernten Lieferketten für Produkte sowie einem gemäßigten Konsumverhalten unter geringer Versandhäufigkeit. Dies fördert ein Umdenken, um Mobilität als ein wertvolles Gut zu betrachten und auf dieses nur in maßvollem Umgang zurückzugreifen. Denn für die verringerte Transportinanspruchnahme gilt, jede durch Verbrennungsprozesse vermiedene Tonne CO<sub>2</sub>-eq kann Klimaauswirkungen und als Prävention Klimaanpassungsmaßnahmen vermindern, in einer Zeit, in welcher die mittlere globale Oberflächentemperatur bereits im

---

Sommer 2023 über eine Woche um 1,5°C über das vorindustrielle Niveau, dem Grenzwert des Pariser Klimaschutzabkommens, gestiegen ist.

Diese Forschungsarbeit hat sich mit der Suche nach geeigneten technologischen Lösungen unter dem Begriff der Transport-Transformationslösung im Detail auseinandergesetzt und konnte erste, teilweise signifikante THG-Verbesserungspotenziale für den Flugsektor im Kurzstreckensegment demonstrieren. Ohne diese Transformationslösungen möglichst in allen Sektoren und einer Abkehr von fossilen Energieträgern wird es langfristig nicht möglich sein, den Klimawandel zu stoppen. Zur Problemlösung kann es dienlich sein, wie diese Arbeit gezeigt hat, die großflächige Implementierung geeigneter TTS als Ersatz für klimaschädliche Verkehrsmittel zur Bereitstellung klima- und nachhaltigkeitskonformerer Transportsysteme zeitnah umzusetzen. Allerdings stellt dies nur einen Teilbereich der Großen Transformation, dem Hinbewegen von Wirtschaft und Gesellschaft in Richtung Nachhaltigkeit, dar und benötigt gleichermaßen wirtschaftliche und gesellschaftliche Veränderungen in Form eines fundamentalen Wandels, um eine Große Transformation global zu erreichen.

Für das Erreichen von Klima- und Nachhaltigkeitszielen im Verkehrssektor liegt es somit auch in der Verantwortung jedes Einzelnen, auf klimaresiliente Verkehrsmittel mit einer bestmöglichen Umweltleistung zurückzugreifen, welche auf größtmöglich dekarbonisierten Energieträgern und einer möglichst hohen Transportgutmenge basieren, oder bei fehlender Notwendigkeit den energieträgerbasierten Transport komplett zu vermeiden.

## Anhang A - Literaturrecherche und Auswertung

Datenbank / Suchmaschine	Datum der Recherche	Schlagwörter / Suchbegriffe	Recherche-Einschränkungen	Treffer, insgesamt
Web of Science Core Collection	31.05.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Aircraft)	keine	339
Web of Science Core Collection	31.05.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Aircraft)	Suchzeitraum: 2000-2023	328
Web of Science Core Collection	31.05.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Aircraft)	Suchzeitraum: 2000-2023 Publikationstyp: Review articles, Articles, Book chapters	230
Web of Science Core Collection	31.05.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Aircraft)	Suchzeitraum: 2000-2023 Publikationstyp: Review articles, Articles, Book chapters Zugang: Open access	73
ScienceDirect	31.05.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Aircraft)	keine	15.668
ScienceDirect	31.05.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Aircraft)	Suchzeitraum: 2000-2023	11.432
ScienceDirect	31.05.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Aircraft)	Suchzeitraum: 2000-2023 Publikationstyp: Review articles, Research articles, Book chapters	10.112
ScienceDirect	31.05.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Aircraft)	Suchzeitraum: 2000-2023 Publikationstyp: Review articles, Research articles, Book chapters Zugang: Open access	1.929

Anhang A1 Dokumentation der Grobanalyse zur Literaturrecherche von LCA und Flugzeugen.



## Erste Metastudie: LCA und Flugzeuge

### Referenzen der Feinanalyse

- [1] Barke, A., Cistjakov, W., Steckermeier, D., Thies, C., Popien, J.-L., Michalowski, P., Pinheiro Melo, S., Cerdas, F., Herrmann, C., Krewer, U., Kwade, A. & Spengler, T. S. (2022b). Green batteries for clean skies: Sustainability assessment of lithium-sulfur all-solid-state batteries for electric aircraft. *Journal of Industrial Ecology*, 27(3), 795–810. <https://doi.org/10.1111/jiec.13345>
- [2] Barke, A., Thies, C., Melo, S. P., Cerdas, F., Herrmann, C. & Spengler, T. S. (2022a). Comparison of conventional and electric passenger aircraft for short-haul flights – A life cycle sustainability assessment. *Procedia CIRP*, 105, 464–469. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.077>
- [3] Melo, S. P., Cerdas, F., Barke, A., Thies, C., Spengler, T. S. & Herrmann, C. (2022). Life Cycle Engineering Modelling Framework for batteries powering electric aircrafts – the contribution of eVTOLs towards a more sustainable urban mobility. *Procedia CIRP*, 105, 368–373. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.061>
- [4] Scholz, A. E., Trifonov, D. & Hornung, M. (2022). Environmental life cycle assessment and operating cost analysis of a conceptual battery hybrid-electric transport aircraft. *CEAS Aeronautical Journal*, 13(1), 215–235. <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00556-0>
- [5] Strathoff, P., Zumegen, C., Stumpf, E., Klumpp, C., Jeschke, P., Warner, K. L., Gelleschus, R., Bocklisch, T., Portner, B., Moser, L. & Hornung, M. (2022). On the Design and Sustainability of Commuter Aircraft with Electrified Propulsion Systems. In *AIAA AVIATION 2022 Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2022-3738>
- [6] Barke, A., Thies, C., Popien, J.-L., Melo, S. P., Cerdas, F., Herrmann, C. & Spengler, T. S. (2021). Life cycle sustainability assessment of potential battery systems for electric aircraft. *Procedia CIRP*, 98, 660–665. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.171>
- [7] Rolinck, M., Gellrich, S., Bode, C., Mennenga, M., Cerdas, F., Friedrichs, J. & Herrmann, C. (2021). A Concept for Blockchain-Based LCA and its Application in the Context of Aircraft MRO. *Procedia CIRP*, 98, 394–399. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.123>
- [8] Barke, A., Thies, C., Melo, S. P., Cerdas, F., Herrmann, C. & Spengler, T. S. (2020). Socio-economic life cycle assessment of future aircraft systems. *Procedia CIRP*, 90, 262–267. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.096>
- [9] Hospodka, J., Bínová, H. & Pleninger, S. (2020). Assessment of All-Electric General Aviation Aircraft. *Energies*, 13(23), 6206. <https://doi.org/10.3390/en13236206>
- [10] Melo, S. P., Cerdas, F., Barke, A., Thies, C., Spengler, T. S. & Herrmann, C. (2020b). Life Cycle Engineering of future aircraft systems: the case of eVTOL vehicles. *Procedia CIRP*, 90, 297–302. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.060>
- [11] Pinheiro Melo, S., Barke, A., Cerdas, F., Thies, C., Mennenga, M., Spengler, T. S. & Herrmann, C. (2020a). Sustainability Assessment and Engineering of Emerging Aircraft Technologies—Challenges, Methods and Tools. *Sustainability*, 12(14), 5663. <https://doi.org/10.3390/su12145663>
- [12] Ribeiro, J., Afonso, F., Ribeiro, I., Ferreira, B., Policarpo, H., Peças, P. & Lau, F. (2020). Environmental assessment of hybrid-electric propulsion in conceptual aircraft design. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119477. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119477>
- [13] Tveitan, S. (2020). Life cycle assessment of hydrogen fuel in aviation [Master thesis]. University of Bergen.
- [14] Gnad, A. R., Speth, R. L., Sabnis, J. S. & Barrett, S. R. (2019). Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 105, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.11.002>
- [15] Jayme, D. B. (2019). Evaluation of the Hybrid-Electric Aircraft Project Airbus E-Fan X [Master thesis]. HAW Hamburg.
- [16] Johannung, A. (2017). Methodik zur Ökobilanzierung im Flugzeugvorentwurf [Dissertation, Verlag Dr. Hut]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund.
- [17] Wangai, A., Kiinzhikayev, S., Rohács, J. & Rohács, D. (2017). Comparison of Total Lifecycle Emission of Aircraft with Different Propulsion System. *RepTudKoz* (köt. 29, sz. 3), 337–348. <https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/reptudkoz/article/view/4433>
- [18] Ploetner, K. O., Miltner, L., Jochem, P., Kuhn, H. & Hornung, M. (2016). Environmental Life Cycle Assessment of Universally-Electric Powered Transport Aircraft. *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2016*.
- [19] Johannung, A. & Scholz, D. (2015). Comparison of the Potential Environmental Impact Improvements of Future Aircraft Concepts Using Life Cycle Assessment: CEAS Air & Space Conference 2015. Council of European Aerospace Societies (paper no. 80). [http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Airport2030/Airport2030\\_PUB\\_CEAS\\_15-09-07.pdf](http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Airport2030/Airport2030_PUB_CEAS_15-09-07.pdf)

- [20] Parolin, G., Borges, A. T., Santos, L. C. & Borille, A. V. (2021). A tool for aircraft eco-design based on streamlined Life Cycle Assessment and Uncertainty Analysis. *Procedia CIRP*, 98, 565–570. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.152>
- [21] Pierrat, E., Rupcic, L., Hauschild, M. Z. & Laurent, A. (2021). Global environmental mapping of the aeronautics manufacturing sector. *Journal of Cleaner Production*, 297, 126603. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126603>
- [22] Tasca, A. L., Cipolla, V., Abu Salem, K. & Puccini, M. (2021). Innovative Box-Wing Aircraft: Emissions and Climate Change. *Sustainability*, 13(6), 3282. <https://doi.org/10.3390/su13063282>
- [23] Trevisan, L. & Bordignon, M. (2020). Screening Life Cycle Assessment to compare CO<sub>2</sub> and Greenhouse Gases emissions of air, road, and rail transport: An exploratory study. *Procedia CIRP*, 90, 303–309. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.100>
- [24] Cox, B., Jemiolo, W. & Mutel, C. (2018b). Life cycle assessment of air transportation and the Swiss commercial air transport fleet. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.017>
- [25] Schäfer, K. (2017). Conceptual aircraft design for sustainability [Dissertation, Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen; Shaker Verlag]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund.
- [26] Liu, H., Xu, Y., Stockwell, N., Rodgers, M. O. & Guensler, R. (2016). A comparative life-cycle energy and emissions analysis for intercity passenger transportation in the U.S. by aviation, intercity bus, and automobile. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, 267–283. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2016.08.027>
- [27] Taptich, M. N., Horvath, A. & Chester, M. V. (2016). Worldwide Greenhouse Gas Reduction Potentials in Transportation by 2050. *Journal of Industrial Ecology*, 20(2), 329–340. <https://doi.org/10.1111/jiec.12391>
- [28] Wojciech, J. (2015). Life cycle assessment of current and future passenger air transport in Switzerland [Master thesis]. University of Nordland.
- [29] Timmis, A. J., Hodzic, A., Koh, L., Bonner, M., Soutis, C., Schäfer, A. & Dray, L. (2015). Environmental impact assessment of aviation emission reduction through the implementation of composite materials. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 20(2), 233–243. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0824-0>
- [30] Howe, S., Kolios, A. J. & Brennan, F. P. (2013). Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 19, 34–41. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2012.12.004>
- [31] Lewis, T. (2013). A Life Cycle Assessment of the Passenger Air Transport System Using Three Flight Scenarios [Master thesis]. Norwegian University of Science and Technology.
- [32] Liu, Z. (2013). Life cycle assessment of composites and aluminium use in aircraft systems [Master thesis]. Cranfield University, Cranfield, UK.
- [33] Howe, S. (2011). Environmental Impact Assessment and Optimisation of Commercial Aviation [Master thesis]. Cranfield University, Cranfield, UK.
- [34] Scelsi, L., Bonner, M., Hodzic, A., Soutis, C., Wilson, C., Scaife, R. & Ridgway, K. (2011). Potential emissions savings of lightweight composite aircraft components evaluated through life cycle assessment. *Express Polymer Letters*, 5(3), 209–217. <https://doi.org/10.3144/expresspolymlett.2011.20>
- [35] Oliveira Fernandes Lopes, J. V. de. (2010). Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft [Master thesis]. Universidade Técnica de Lisboa, Lisbon, Portugal.
- [36] Chester, M. V. & Horvath, A. (2009). Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, 4(2), 24008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/2/024008>
- [37] Chester, M. (2008). Environmental Life-cycle Assessment of Passenger Transportation [Dissertation]. University of California, Berkeley.
- [38] Abu Kasim, A., Chan, M. & Marek, E. J. (2022). Performance and failure analysis of a retrofitted Cessna aircraft with a Fuel Cell Power System fuelled with liquid hydrogen. *Journal of Power Sources*, 521, 230987. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2022.230987>
- [39] Zumegen, C., Strathoff, P., Stumpf, E., Schollenberger, M., Lutz, T., Krämer, E., Kirsch, B., Friedrichs, J., Schubert, M., Dafnis, A. & Schröder, K.-U. (2022). Aerodynamic and structural analysis of a partial turboelectric commuter aircraft with wingtip propellers at aircraft level. In *AIAA AVIATION 2022 Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2022-3955>
- [40] Alrashed, M.; Nikolaidis, T.; Pilidis, P.; Jafari, S. (2021). Utilisation of turboelectric distribution propulsion in commercial aviation: A review on NASA's TeDP concept. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(11), 48–65. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2021.03.014>

- 
- [41] Pelz, P. F., Leise, P. & Meck, M. (2021). Sustainable aircraft design — A review on optimization methods for electric propulsion with derived optimal number of propulsors. *Progress in Aerospace Sciences*, 123, 100714. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100714>
- [42] Nicolay, S., Karpuk, S., Liu, Y. & Elham, A. (2021). Conceptual design and optimization of a general aviation aircraft with fuel cells and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(64), 32676–32694. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.127>
- [43] Tashie-Lewis, B. C. & Nnabuife, S. G. (2021). Hydrogen Production, Distribution, Storage and Power Conversion in a Hydrogen Economy - A Technology Review. *Chemical Engineering Journal Advances*, 8, 100172. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.100172>
- [44] Thapa, N., Ram, S., Kumar, S. & Mehta, J. (2021). All electric aircraft: A reality on its way. *Materials Today: Proceedings*, 43, 175–182. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.11.611>
- [45] Wileman, A. J., Aslam, S. & Perinpanayagam, S. (2021). A road map for reliable power electronics for more electric aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 127, 100739. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2021.100739>
- [46] Xie, Y., Savvarisal, A., Tsourdos, A., Zhang, D. & Gu, J. (2021). Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management methodologies. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(4), 432–450. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.07.017>
- [47] Baumeister, S., Leung, A. & Ryley, T. (2020). The emission reduction potentials of First Generation Electric Aircraft (FGEA) in Finland. *Journal of Transport Geography*, 85, 102730. <https://doi.org/10.1016/j.jtrangeo.2020.102730>
- [48] Collins, J. M. & McLarty, D. (2020). All-electric commercial aviation with solid oxide fuel cell-gas turbine-battery hybrids. *Applied Energy*, 265, 114787. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.114787>
- [49] Grimme, W., Paul, A., Maertens, S. & van Wensveen, J. (2020). The prospects of hybrid-electric regional air transport - an assessment of travel time benefits of domestic short-haul flights in Germany with 19-seater aircraft. *Transportation Research Procedia*, 51, 199–207. <https://doi.org/10.1016/j.trpro.2020.11.022>
- [50] Schneider, M., Dickhoff, J., Kusterer, K. & Visser, W. (2020). Life Cycle Analysis for a Powertrain in a Concept for Electric Power Generation in a Hybrid Electric Aircraft. In *Proceedings of the ASME Turbo Expo 2020: Turbomachinery Technical Conference and Exposition - 2020: Presented at the ASME, September 21-25, 2020, online. the American Society of Mechanical Engineers; Curran Associates Inc.* <https://doi.org/10.1115/GT2020-15518>
- [51] Sziroczak, D., Jankovics, I., Gal, I. & Rohacs, D. (2020). Conceptual design of small aircraft with hybrid-electric propulsion systems. *Energy*, 204, 117937. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2020.117937>
- [52] Brelje, B. J. & Martins, J. R. (2019). Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: A review of concepts, models, and design approaches. *Progress in Aerospace Sciences*, 104, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.06.004>
- [53] Gesell, H., Wolters, F. & Plohr, M. (2019). System analysis of turbo-electric and hybrid-electric propulsion systems on a regional aircraft. *The Aeronautical Journal*, 123(1268), 1602–1617. <https://doi.org/10.1017/aer.2019.61>
- [54] Aigner, B., Nollmann, M. & Stumpf, E. (2018). Design of a Hybrid Electric Propulsion System within a Preliminary Aircraft Design Software Environment. <https://doi.org/10.25967/480153>
- [55] Fefermann, Y., Maury, C., Level, C., Zarati, K., Salanne, J.-P., Pornet, C., Thoraval, B. & Isikveren, A. T. (2016). Hybrid electric motive power systems for commuter transport applications. 30th Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences.
- [56] Verstraete, D. (2015). On the energy efficiency of hydrogen-fuelled transport aircraft. *International Journal of Hydrogen Energy*, 40(23), 7388–7394. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2015.04.055>
- [57] Heperle, M. J. (2012). Electric Flight - Potential and Limitations. STO-MP-AVT-209.
- 

Anhang A2 Referenzen aus der Feinanalyse zur Literaturrecherche von LCA und Flugzeugen.

<b>Listennummer</b>	<b>Veröffentlichungsart</b> Review (R), Artikel (A), Tagungsband (T), Universität (DISS, MA)	<b>Jahr</b>	<b>Erstautor</b>	<b>Kurzeinordnung</b> Titel-Keywords-Abstract	<b>Recherche</b> Datenbank (WOS, SD), Schneeballsuche (S), Eigene Recherche (E)	<b>Einordnungs- kategorien</b>	<b>Detailanalyse geeignet</b>	<b>LCA-Vergleich geeignet</b>	<b>Ausschluss</b>
[1]	A	2022b	Barke	Li-Sulfur all-solid-state battery, electric aircraft, short-haul, LCA, SDG	S	(2) (3) (6)	ja	ja	-
[2]	T	2022a	Barke	Conventional, electric aircraft, short-haul, hydrogen, life cycle, pLCA	SD	(1) (2) (3) (5) (6)	ja	ja	-
[3]	T	2022	Pinheiro Melo	Electric aircraft, life cycle, LCA, batteries	SD	(2) (3)	-	-	ja
[4]	A	2022	Scholz	Conventional, electric aircraft, life cycle, LCA	S	(1) (2) (3) (5)	ja	ja	-
[5]	T	2022	Strathoff	Conventional, electric aircraft, short-haul, hydrogen, LCA, scenario	E	(2) (3) (4) (5) (6)	ja	ja	-
[6]	T	2021	Barke	Conventional, electric aircraft, life cycle, LCA, batteries	SD	(2) (3) (5)	ja	-	ja
[7]	T	2021	Rolimck	LCA, future aircraft configurations	SD	(2) (3)	-	-	ja
[8]	T	2020	Barke	Conventional, electric aircraft, life cycle, LCA (cost, social)	SD	(2) (3) (5)	-	-	ja
[9]	A	2020	Hospodka	Conventional, electric aircraft, electricity, LCA	WOS	(2) (3) (5)	ja	-	-
[10]	T	2020b	Pinheiro Melo	Electric aircraft, life cycle, LCA	SD	(2) (3)	-	-	ja
[11]	R	2020a	Pinheiro Melo	LCA, emerging aircraft, fuels	WOS	(2) (3) (5)	ja	-	-
[12]	A	2020	Ribeiro	Conventional, electric aircraft, short-haul, life cycle, LCA	E	(2) (3) (5)	ja	-	-
[13]	MA	2020	Tveitan	Conventional, electric aircraft, hydrogen, life cycle, LCA	E	(4) (5)	ja	-	-
[14]	A	2019	Gnadt	Electric aircraft, emission, LCA, battery, scenario	S	(2) (3)	ja	-	-
[15]	MA	2019	Jayme	Conventional, electric aircraft, LCA, powertrain	E	(2) (3) (5)	ja	-	-
[16]	DISS	2017	Johanning	Conventional, electric aircraft, hydrogen, life cycle, LCA	S	(1) (2) (3) (4) (5)	ja	ja	-
[17]	A	2017	Wangai	Conventional, electric aircraft, short-haul, life cycle, LCA	E	(2) (3) (5) (6)	ja	-	-
[18]	T	2016	Ploetner	Conventional, electric aircraft, life cycle, LCA	S	(2) (3) (5)	ja	ja	-
[19]	T	2015	Johanning	Conventional, electric aircraft, hydrogen, life cycle, LCA	S	(1) (2) (3) (4) (5)	ja	-	ja

Anhang A3 Dokumentation der Feinanalyse zur Literaturrecherche von LCA und elektrifizierten Flugzeugen.

<b>Listennummer</b>	<b>Veröffentlichungsart</b> Review (R), Artikel (A), Tagungsband (T), Universität (DISS, MA)	<b>Jahr</b>	<b>Erstautor</b>	<b>Kurzeinordnung</b> Titel-Keywords-Abstract	<b>Recherche</b> Datenbank (WOS, SD), Schneeballsuche (S), Eigene Recherche (E)	<b>Einordnungs- kategorien</b>	<b>Detailanalyse geeignet</b>	<b>LCA-Vergleich geeignet</b>	<b>Ausschluss</b>
[20]	T	2021	Parolin	Conventional aircraft, life cycle, LCA	SD	(1) (5)	ja	-	-
[21]	A	2021	Pierrat	Conventional aircraft, LCA	WOS/SD	(1) (5)	-	-	ja
[22]	A	2021	Tasca	Conventional aircraft, LCA	WOS	(5)	-	-	ja
[23]	T	2020	Trevisan	Air-road-rail, life cycle, LCA	SD	(5)	-	-	ja
[24]	A	2018b	Cox	Conventional aircraft, short-haul, life cycle, LCA, scenario	S	(1) (5) (6)	ja	ja	-
[25]	DISS	2018	Schäfer	Conventional aircraft, life cycle, LCA, design software MICADO	E	(1) (5)	ja	-	-
[26]	A	2016	Liu	Air-road-rail, life cycle, LCA	E	(5)	-	-	ja
[27]	A	2016	Taptich	Air-road-rail, LCA, scenario	WOS	(5)	-	-	ja
[28]	MA	2015	Jemiolo	Conventional aircraft, short-haul, life cycle, LCA, scenario	E	(1) (5) (6)	ja	ja	ja
[29]	A	2015	Timmis	Conventional aircraft, life cycle, LCA, materials, scenario	WOS	(5)	ja	-	-
[30]	A	2013	Howe	Conventional aircraft, life cycle, LCA	E	(1) (5)	ja	ja	-
[31]	MA	2013	Lewis	Conventional aircraft, life cycle, LCA, scenario	E	(1) (5)	ja	ja	-
[32]	MA	2013	Liu	Conventional aircraft, life cycle, LCA	S	(1) (5)	ja	ja	-
[33]	MA	2011	Howe	Conventional aircraft, life cycle, LCA	E	(1) (5)	ja	ja	ja
[34]	A	2011	Scelsi	Conventional aircraft, LCA, materials	WOS	-	-	-	ja
[35]	MA	2010	Lopes	Conventional aircraft, life cycle, LCA, scenario	E	(1) (5)	ja	ja	-
[36]	A	2009	Chester	Conventional aircraft, short-haul, life cycle, LCA	WOS	(1) (5) (6)	ja	ja	-
[37]	DISS	2008	Chester	Conventional aircraft, short-haul, life cycle, LCA	E	(1) (5) (6)	ja	ja	ja

Anhang A4 Dokumentation der Feinanalyse zur Literaturrecherche von LCA und konventionellen Flugzeugen.

Veröffentlichungsart	Jahr	Erstautor	Kurzeinordnung Titel-Keywords-Abstract	Recherche	Einordnungs- kategorien	Detailanalyse geeignet	LCA-Vergleich geeignet	Ausschluss
Review (R), Artikel (A), Tagungsband (T), Universität (DISS, MA)				Datenbank (WOS, SD), Schneeballsuche (S), Eigene Recherche (E)	(1) LCA ISO Flugzeug, (2) LCA elek. Flugzeug, (3) Fallstudie BEV, (4) Fallstudie FCEV, (5) LCA konv. Flugzeug, (6) Kleinflugzeug			
Listennummer								
[38]	A	2022	Kasim	Electric aircraft, short-haul, hydrogen	SD	(4) (6)	ja	-
[39]	T	2022	Zumegen	Conventional, electric aircraft, short-haul	E	(3) (6)	ja	-
[40]	A	2021	Alreashed	Electric aircraft	S	(3)	-	ja
[41]	A	2021	Pelz	Electric aircraft	SD	(3)	-	ja
[42]	A	2021	Nicolay	Electric aircraft, short-haul, hydrogen, emission	S	(4) (6)	-	-
[43]	A	2021	Tashie-Lewis	Electric aircraft, hydrogen, powertrain	SD	(4)	-	ja
[44]	T	2021	Thapa	Electric aircraft, short-haul, battery	S	(3)	-	ja
[45]	A	2021	Wileman	Electric aircraft, power electronics	SD	(3)	-	ja
[46]	R	2021	Xie	Electric aircraft	SD	(3)	-	ja
[47]	A	2020	Baumeister	Electric aircraft, short-haul, emission	E	(3) (6)	ja	-
[48]	A	2020	Collins	Electric aircraft, hydrogen	S	(4)	-	ja
[49]	T	2020	Grimme	Electric aircraft, short-haul	S	(3) (6)	-	ja
[50]	T	2020	Schneider	Electric aircraft, powertrain	E	(3)	ja	-
[51]	A	2020	Szirozak	Electric aircraft	SD	(3)	-	ja
[52]	R	2019	Brelje	Electric aircraft	S	(3)	-	ja
[53]	T	2019	Gesell	Electric aircraft, short-haul, emission, powertrain	S	(3) (6)	ja	-
[54]	T	2018	Aigner	Electric aircraft, design software MICADO, sizing powertrain	S	(3)	ja	-
[55]	T	2016	Fefermann	Conventional aircraft, short-haul, scenario	E	(3) (6)	ja	-
[56]	A	2015	Verstraete	Electric aircraft, short-haul, hydrogen	S	(4) (6)	-	ja
[57]	A	2012	Heperle	Electric aircraft, short-haul, battery	E	(3) (6)	ja	-

Anhang A5 Dokumentation der Feinanalyse zur Literaturrecherche von elektrifizierten Flugzeugen.



<b>Erstautor und Jahr</b>	<b>LCA selbst durchgeführt</b>		<b>LCA in 4 Phasen nach ISO</b>	<b>SCOPE</b> Lebensphasen (A, B, C), Zeithorizont	<b>Flugzeugtyp, Personenanzahl, Distanz</b> Kurzstrecke (K), Mittelstrecke (M), Langstrecke (L)	<b>FU* und Energieträger</b> Kerosin (K), Strom (E), Wasserstoff (W)	<b>Vergleichsbetrachtung</b> Vergleichstechnologie [von Autor]	<b>Dateninput</b> Primär, sekundär [von Autor]	<b>Wirkungsabschätzung</b> Wirkungskategorie, Indikator
Barke 2022b	ja	ja	(A-B) 2022	Generisch 100 (K)	kWh (E)	-	S	ReCiPe (Midpoint) GWP, etc.	
Barke 2022a	ja	ja	(A-B) 2050	Generisch 100 (K)	pkm K, (E, W)	A318	S	ReCiPe GWP, Landnutzung, Ressourcen- erschöpfung	
Scholz 2022	ja	ja	(A-B) 2045	HEA1000 180 (M)	pkm (K, E)	A320 [16] [24] [28] [31] [33]	P [16]	ReCiPe (Endpoint)	
Strathoff 2022	ja	-	(B) 2050	Beechcraft 1900D PTE-2025, FCB-2050 19 (K)	MJ (K, E, W)	-	P	ReCiPe CO <sub>2</sub>	
Hospodka 2020	ja	-	(B) 2020	-	kWh (E)	-	-	CO <sub>2</sub>	
Pinheiro Melo 2020	-	-	-	-	-	[24] [36]	-	GWP, etc.	
Ribeiro 2020	ja	ja	(A-B) 2030 2050	HEA- RS22T, HEA-E190, 3, 114 (KM)	kWh (E)	RS22T, E190	P	ReCiPe (8 Midpoint) CO <sub>2</sub>	
Tveitan 2020	ja	-	(A-C) 2020	B787-H2 200 (M)	vlt (K, W)	-	S	ReCiPe GWP, etc.	
Gnadt 2019	ja	-	(B) 2050	AEA-800 180 (M)	kWh (K, E)	A320	P	GWP CO <sub>2</sub>	
Jayme 2019	ja	-	(B) 2019	E-Fan-X 73 (M)	pkm (K, E)	BAe 146- 100	-	ReCiPe CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Feinstaub	
Wangai 2017	ja	-	(A-B) 2017	Cessna 172 4 (K)	pkm (K, E)	-	-	GWP CO <sub>2</sub>	
Johanning 2017	ja	ja	(A-C) 2017	A320 180 (M)	pkm (K, E, W)	[33] [35]	S, [33]	ReCiPe (Endpoint) CO <sub>2</sub>	
Ploetner 2016	ja	-	(A-C) 2035	Ce-Liner 190 (K)	pkm (K, E)	A321, B787 [35] [33] [28]	P	GWP CO <sub>2</sub>	

\*Funktionelle Einheit in: pkm = passenger kilometer, vlt = vehicle life-time

Anhang A6 Dokumentation der Detailanalyse zur Literaturrecherche von LCA und elektrifizierten Flugzeugen.

<b>Erstautor und Jahr</b>	<b>LCA selbst durchgeführt</b>		<b>LCA in 4 Phasen nach ISO</b>	<b>SCOPE</b> Lebensphasen (A, B, C), Zeithorizont	<b>Flugzeugtyp, Personenanzahl, Distanz</b> Kurzstrecke (K), Mittelstrecke (M), Langstrecke (L)	<b>FU* und Energieträger</b> Kerosin (K), Strom (E), Wasserstoff (W)	<b>Vergleichsbetrachtung</b> Vergleichstechnologie [von Autor]	<b>Dateninput</b> Primär, sekundär [von Autor]	<b>Wirkungsabschätzung</b> Wirkungskategorie, Indikator
Parolin 2021	ja	-	(A-C) 2021	Bravo, Echo -	tkm (K)	-	P	ReCiPe (Mid-/Endpoint)	
Cox 2018b	ja	ja	(A-C) 2050	SAAB2000, AvroRJ146, A320, A340, A380 50-620 (K, M, L)	skm, pkm (K)	-	S	ReCiPe (Midpoint) GWP NO <sub>x</sub> , Feinstaub	
Schäfer 2018	ja	-	(A-C) 2018	CSR-02 150 (M)	vlt, pkm (K)	A320, A330, B737	P [30] [34]	CML CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Energie	
Timmis 2015	ja	-	(A-C) 2050	B787 -	tkm (K)	-	S	Eco-Indicator CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub>	
Howe 2013	ja	ja	(A-C) 2011	A320 180 (M)	vlt (K)	-	S	Eco-Indicator CO <sub>2</sub>	
Lewis 2013	ja	ja	(A-B) 2013	A320, A330, A380 180, 253, 525 (M, L)	vlt, vkm, pkm (K)	-	S [33] [35]	ReCiPe CO <sub>2</sub> , etc.	
Liu 2013	ja	ja	(A-C) 2013	A319 156 (M)	pkm (K)	B737	S [32]	Eco-Indicator CO <sub>2</sub>	
Lopes 2010	ja	ja	(A-C) 2009	A330 303 (L)	pkm (K)	Pkw, Zug	P	ReCiPe (Midpoint), Energie, Landnutzung	
Chester 2009	ja	ja	(A-B) 2005	EMB-145, B737, B747 33, 101, 305 (K, M, L)	vlt, vml, pml (K)	Pkw, Zug	S	GWP CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , Energie	

\*Funktionelle Einheit in: skm = seat kilometer, pkm = passenger kilometer, vkm = vehicle kilometer, vlt = vehicle life-time, tkm = tonne kilometer, vml= vehicle mile, pml = passenger mile

Anhang A7 Dokumentation der Detailanalyse zur Literaturrecherche von LCA und konventionellen Flugzeugen.

<b>Erstautor und Jahr</b>	<b>LCA selbst durchgeführt</b>			<b>LCA in 4 Phasen nach ISO</b>	<b>SCOPE</b> Lebensphasen (A, B, C), Zeithorizont	<b>Flugzeugtyp, Personenanzahl, Distanz</b> Kurzstrecke (K), Mittelstrecke (M), Langstrecke (L)	<b>FU* und Energieträger</b> Kerosin (K), Strom (E), Wasserstoff (W)	<b>Vergleichsbetrachtung</b> Vergleichstechnologie [von Autor]	<b>Dateninput</b> Primär, sekundär [von Autor]	<b>Wirkungsabschätzung</b> Wirkungskategorie, Indikator
Kasim 2022	-	-	-			Cessna 208, eCaravan 6 (K)	(W)	-	P	-
Zumegen 2022	-	-	-			Beechcraft 1900D, PT-2025 19 (K)	(K, E)	-	P	-
Nicolay 2021	-	-	(B) 2021			HyGAcraft 4 (K)	(K, W)	Cessna 172	S	CO <sub>2</sub> , NO <sub>x</sub> , etc.
Baumeister 2020	-	-	(B) 2025			Eviation Alice, Heart Aerospace ES-19 9, 19 (K)	pkm (K, E)	A320, ATR72, Pkw, Zug	S	CO <sub>2</sub>
Schneider 2020	-	-	-			Dornier 228 Hybrid 19 (K)	(K, E)	-	P	-
Gesell 2019	-	-	(B) 2025			ATR 72 Hybrid 72 (K)	MWh (K, E)	ATR72	S	CO <sub>2</sub>
Fefermann 2016	-	-	-			Beechcraft 1900D ARCH 19 (K)	(K, E)	-	P	-
Heperle 2012	-	-	-			Dornier 328E 28 (K)	(K, E)	-	P	-

Anhang A8 Dokumentation der Detailanalyse zur Literaturrecherche von elektrifizierten Flugzeugen.

Datenbank / Suchmaschine	Datum der Recherche	Schlagwörter / Suchbegriffe	Recherche-Einschränkungen	Treffer, insgesamt
Web of Science Core Collection	18.06.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Prospective AND (Vehicle OR Transport OR Mobility))	keine	92
Web of Science Core Collection	18.06.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Prospective AND (Vehicle OR Transport OR Mobility))	Suchzeitraum: 2000-2023	90
Web of Science Core Collection	18.06.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Prospective AND (Vehicle OR Transport OR Mobility))	Suchzeitraum: 2000-2023 Publikationstyp: Review articles, Articles, Book chapters	86
Web of Science Core Collection	18.06.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Prospective AND (Vehicle OR Transport OR Mobility))	Suchzeitraum: 2000-2023 Publikationstyp: Review articles, Articles, Book chapters Zugang: Open access	46
ScienceDirect	18.06.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Prospective AND (Vehicle OR Transport OR Mobility))	keine	25.851
ScienceDirect	18.06.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Prospective AND (Vehicle OR Transport OR Mobility))	Suchzeitraum: 2000-2023	21.625
ScienceDirect	18.06.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Prospective AND (Vehicle OR Transport OR Mobility))	Suchzeitraum: 2000-2023 Publikationstyp: Review articles, Research articles, Book chapters	18.296
ScienceDirect	18.06.2022	((Life Cycle Assessment OR LCA) AND Prospective AND (Vehicle OR Transport OR Mobility))	Suchzeitraum: 2000-2023 Publikationstyp: Review articles, Research articles, Book chapters Zugang: Open access	2.598

Anhang A9 Dokumentation der Grobanalyse zur Literaturrecherche von pLCA und Verkehrsmitteln.

## Zweite Metastudie: pLCA und Verkehrsmittel

### Referenzen der Feinanalyse

- [1] Cucurachi, S., Steubing, B., Siebler, F., Navarre, N., Caldeira, C. & Sala, S. (2022). Prospective LCA methodology for Novel and Emerging Technologies for BIO-based products: The PLANET BIO project (JRC129632). Publications Office of the European Union.
- [2] Dirmaichner, A., Rottoli, M., Sacchi, R., Rauner, S., Cox, B., Mutel, C., Bauer, C. & Luderer, G. (2022). Life-cycle impacts from different decarbonization pathways for the European car fleet. *Environmental Research Letters*, 17(4), 44009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4fdb>
- [3] Haase, M., Wulf, C., Baumann, M., Rösch, C., Weil, M., Zapp, P. & Naegler, T. (2022). Prospective assessment of energy technologies: a comprehensive approach for sustainability assessment. *Energy, Sustainability and Society*, 12(1). <https://doi.org/10.1186/s13705-022-00344-6>
- [4] Hanesch, S., Schöpp, F., Göllner-Völker, L. & Schebek, L. (2022). Life Cycle Assessment of an emerging overhead line hybrid truck in short-haul pilot operation. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130600. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130600>
- [5] Lai, Y. Y., Christley, E., Kulanovic, A., Teng, C. C., Björklund, A., Nordensvärd, J., Karakaya, E. & Urban, F. (2022). Analysing the opportunities and challenges for mitigating the climate impact of aviation: A narrative review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 156, 111972. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111972>
- [6] Naegler, T., Buchgeister, J., Hottenroth, H., Simon, S., Tietze, I., Viere, T. & Junne, T. (2022). Life cycle-based environmental impacts of energy system transformation strategies for Germany: Are climate and environmental protection conflicting goals? *Energy Reports*, 8, 4763–4775. <https://doi.org/10.1016/j.egy.2022.03.143>
- [7] Rüdüsili, M., Bach, C., Bauer, C., Beloin-Saint-Pierre, D., Elber, U., Georges, G., Limpach, R., Pareschi, G., Kannan, R. & Teske, S. L. (2022). Prospective life-cycle assessment of greenhouse gas emissions of electricity-based mobility options. *Applied Energy*, 306, 118065. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118065>
- [8] Sacchi, R., Terlouw, T., Siala, K., Dirmaichner, A., Bauer, C., Cox, B., Mutel, C., Daioglou, V. & Luderer, G. (2022b). PROspective EnvironMental Impact asSEment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112311>
- [9] Sacchi, R., Bauer, C., Cox, B. & Mutel, C. (2022a). When, where and how can the electrification of passenger cars reduce greenhouse gas emissions? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112475. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112475>
- [10] Weidner, T., Galán-Martín, A., Ryberg, M. W. & Guillén-Gosálbez, G. (2022). Energy systems modeling and optimization for absolute environmental sustainability: current landscape and opportunities. *Computers & Chemical Engineering*, 164, 107883. <https://doi.org/10.1016/j.compchemeng.2022.107883>
- [11] Ehrenberger, S., Seum, S., Pregger, T., Simon, S., Knitschky, G. & Kugler, U. (2021). Land transport development in three integrated scenarios for Germany – Technology options, energy demand and emissions. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 90, 102669. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2020.102669>
- [12] Fishman, T., Heeren, N., Pauliuk, S., Berrill, P., Tu, Q., Wolfram, P. & Hertwich, E. G. (2021). A comprehensive set of global scenarios of housing, mobility, and material efficiency for material cycles and energy systems modeling. *Journal of Industrial Ecology*, 25(2), 305–320. <https://doi.org/10.1111/jiec.13122>
- [13] Harpprecht, C., Oers, L., Northey, S. A., Yang, Y. & Steubing, B. (2021). Environmental impacts of key metals' supply and low-carbon technologies are likely to decrease in the future. *Journal of Industrial Ecology*, 25(6), 1543–1559. <https://doi.org/10.1111/jiec.13181>
- [14] Morfeldt, J., Davidsson Kurland, S. & Johansson, D. J. (2021). Carbon footprint impacts of banning cars with internal combustion engines. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 95, 102807. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102807>
- [15] Parolin, G., Borges, A. T., Santos, L. C. & Borille, A. V. (2021). A tool for aircraft eco-design based on streamlined Life Cycle Assessment and Uncertainty Analysis. *Procedia CIRP*, 98, 565–570. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2021.01.152>
- [16] Pizzol, M., Sacchi, R., Köhler, S. & Anderson Erjavec, A. (2021). Non-linearity in the Life Cycle Assessment of Scalable and Emerging Technologies. *Frontiers in Sustainability*, 1, Artikel 611593. <https://doi.org/10.3389/frsus.2020.611593>
- [17] Rottoli, M., Dirmaichner, A., Kyle, P., Baumstark, L., Pietzcker, R. & Luderer, G. (2021). Coupling a Detailed Transport Model to the Integrated Assessment Model REMIND. *Environmental Modeling & Assessment*, 26(6), 891–909. <https://doi.org/10.1007/s10666-021-09760-y>

- [18] Sacchi, R., Bauer, C. & Cox, B. L. (2021). Does Size Matter? The Influence of Size, Load Factor, Range Autonomy, and Application Type on the Life Cycle Assessment of Current and Future Medium- and Heavy-Duty Vehicles. *Environmental science & technology*, 55(8), 5224–5235. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07773>
- [19] Steubing, B. & Koning, D. de (2021). Making the use of scenarios in LCA easier: the superstructure approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(11), 2248–2262. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01974-2>
- [20] Usai, L., Hung, C. R., Vásquez, F., Windsheimer, M., Burheim, O. S. & Strømman, A. H. (2021). Life cycle assessment of fuel cell systems for light duty vehicles, current state-of-the-art and future impacts. *Journal of Cleaner Production*, 280, 125086. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125086>
- [21] Xie, Y., Savvarisal, A., Tsourdos, A., Zhang, D. & Gu, J. (2021). Review of hybrid electric powered aircraft, its conceptual design and energy management methodologies. *Chinese Journal of Aeronautics*, 34(4), 432–450. <https://doi.org/10.1016/j.cja.2020.07.017>
- [22] Bergerson, J. A., Brandt, A., Cresko, J., Carbajales-Dale, M., MacLean, H. L., Matthews, H. S., McCoy, S., McManus, M., Miller, S. A., Morrow, W. R., Posen, I. D., Seager, T., Skone, T. & Sleep, S. (2020). Life cycle assessment of emerging technologies: Evaluation techniques at different stages of market and technical maturity. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 11–25. <https://doi.org/10.1111/jiec.12954>
- [23] Cox, B., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., van Vuuren, D. P. & Mutel, C. L. (2020). Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. *Applied Energy*, 269, 115021. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115021>
- [24] Koroma, M. S., Brown, N., Cardellini, G. & Messagie, M. (2020). Prospective Environmental Impacts of Passenger Cars under Different Energy and Steel Production Scenarios. *Energies*, 13(23), 6236. <https://doi.org/10.3390/en13236236>
- [25] Mendoza Beltran, A., Cox, B., Mutel, C., Vuuren, D. P., Font Vivanco, D., Deetman, S., Edelenbosch, O. Y., Guinée, J. & Tukker, A. (2020). When the Background Matters: Using Scenarios from Integrated Assessment Models in Prospective Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 64–79. <https://doi.org/10.1111/jiec.12825>
- [26] Moni, S. M., Mahmud, R., High, K. & Carbajales-Dale, M. (2020). Life cycle assessment of emerging technologies: A review. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 52–63. <https://doi.org/10.1111/jiec.12965>
- [27] Navas-Anguita, Z., García-Gusano, D., Dufour, J. & Iribarren, D. (2020). Prospective techno-economic and environmental assessment of a national hydrogen production mix for road transport. *Applied Energy*, 259, 114121. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.114121>
- [28] Thonemann, N., Schulte, A. & Maga, D. (2020). How to Conduct Prospective Life Cycle Assessment for Emerging Technologies? A Systematic Review and Methodological Guidance. *Sustainability*, 12(3), 1192. <https://doi.org/10.3390/su12031192>
- [29] Vandepaer, L., Panos, E., Bauer, C. & Amor, B. (2020). Energy System Pathways with Low Environmental Impacts and Limited Costs: Minimizing Climate Change Impacts Produces Environmental Cobenefits and Challenges in Toxicity and Metal Depletion Categories. *Environmental science & technology*, 54(8), 5081–5092. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06484>
- [30] van der Giesen, C., Cucurachi, S., Guinée, J., Kramer, G. J. & Tukker, A. (2020). A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120904. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120904>
- [31] Gupta, P., Wu, Y., He, X., Zhuge, W. & Ma, F. (2019). Life cycle analysis of HCNG light-duty vehicle demonstration project. *Matéria (Rio de Janeiro)*, 24(2), Artikel e12381. <https://doi.org/10.1590/s1517-707620190002.0696>
- [32] Yao, Y. & Huang, R. (2019). A Parametric Life Cycle Modeling Framework for Identifying Research Development Priorities of Emerging Technologies: A Case Study of Additive Manufacturing. *Procedia CIRP*, 80, 370–375. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2019.01.037>
- [33] Cox, B., Mutel, C. L., Bauer, C., Mendoza Beltran, A. & van Vuuren, D. P. (2018). Uncertain Environmental Footprint of Current and Future Battery Electric Vehicles. *Environmental science & technology*, 52(8), 4989–4995. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00261>
- [34] Cucurachi, S., van der Giesen, C. & Guinée, J. (2018). Ex-ante LCA of Emerging Technologies. *Procedia CIRP*, 69, 463–468. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2017.11.005>
- [35] Deutz, S., Bongartz, D., Heuser, B., Kätelhön, A., Schulze Langenhorst, L., Omari, A., Walters, M., Klankermayer, J., Leitner, W., Mitsos, A., Pischinger, S. & Bardow, A. (2018). Cleaner production of cleaner fuels: wind-to-wheel – environmental assessment of CO<sub>2</sub>-based oxymethylene ether as a drop-in fuel. *Energy & Environmental Science*, 11(2), 331–343. <https://doi.org/10.1039/C7EE01657C>



- 
- [36] Navas-Anguita, Z., García-Gusano, D. & Iribarren, D. (2018). Prospective Life Cycle Assessment of the Increased Electricity Demand Associated with the Penetration of Electric Vehicles in Spain. *Energies*, 11(5), 1185. <https://doi.org/10.3390/en11051185>
- [37] Raugei, M., Hutchinson, A. & Morrey, D. (2018). Can electric vehicles significantly reduce our dependence on non-renewable energy? Scenarios of compact vehicles in the UK as a case in point. *Journal of Cleaner Production*, 201, 1043–1051. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.08.107>
- [38] Arvidsson, R., Tillman, A.-M., Sandén, B. A., Janssen, M., Nordelöf, A., Kushnir, D. & Molander, S. (2018). Environmental Assessment of Emerging Technologies: Recommendations for Prospective LCA. *Journal of Industrial Ecology*, 22(6), 1286–1294. <https://doi.org/10.1111/jiec.12690>
- [39] Steubing, B., Mutel, C., Suter, F. & Hellweg, S. (2016). Streamlining scenario analysis and optimization of key choices in value chains using a modular LCA approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(4), 510–522. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-1015-3>
- [40] Berrill, P., Arvesen, A., Scholz, Y., Gils, H. C. & Hertwich, E. G. (2016). Environmental impacts of high penetration renewable energy scenarios for Europe. *Environmental Research Letters*, 11(1), 14012. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/1/014012>
- [41] Zimmermann, B. M., Dura, H., Baumann, M. J. & Weil, M. R. (2015). Prospective time-resolved LCA of fully electric supercap vehicles in Germany. *Integrated environmental assessment and management*, 11(3), 425–434. <https://doi.org/10.1002/ieam.1646>
- [42] Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A.-M., Ljunggren Söderman, M. & van Mierlo, J. (2014). Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(11), 1866–1890. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0788-0>
- [43] Höjer, M., Ahlroth, S., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., Finnveden, G., Hjelm, O., Hochschorner, E., Nilsson, M. & Palm, V. (2008). Scenarios in selected tools for environmental systems analysis. *Journal of Cleaner Production*, 16(18), 1958–1970. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.01.008>
- [44] Spielmann, M., Scholz, R., Tietje, O. & Haan, P. de (2005). Scenario Modelling in Prospective LCA of Transport Systems. Application of Formative Scenario Analysis (11 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(5), 325–335. <https://doi.org/10.1065/lca2004.10.188>
- [45] Pesonen, H.-L., Ekvall, T., Fleischer, G., Huppel, G., Jahn, C., Klos, Z. S., Rebitzer, G., Sonnemann, G. W., Tintinelli, A., Weidema, B. P. & Wenzel, H. (2000). Framework for scenario development in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/BF02978555>
- 

Anhang A10 Referenzen aus der Feinanalyse zur Literaturrecherche von pLCA und Verkehrsmitteln.

<b>Ausschluss</b>	<b>Methodenvergleich geeignet</b>	<b>Detailanalyse geeignet</b>	<b>Einordnungs-kategorien</b> (1) pLCA Flugzeug (2) pLCA Transport (3) pLCA-Methode (4) TTS (Batterieelektrisch/ Brennstoffzellelektrisch)	<b>Recherche</b> Datenbank (WOS, SD), Schneeballsuche (S), Eigene Recherche (E)	<b>Kurzeinordnung</b> Titel-Keywords-Abstract	<b>Erstautor</b>	<b>Jahr</b>	<b>Veröffentlichungsart</b> Review (R), Artikel (A), Tagungsband (T)	<b>Listennummer</b>
-	ja	ja	(3)	S	pLCA, method, 4-step scenario development, in-/external parameters	Cucurachi	2022	A	[1]
-	ja	ja	(2) (3) (4)	WOS	pLCA, freight transport system model, IAM, GHG, resource depletion	Dirnaichner	2022	A	[2]
-	ja	ja	(2) (3) (4)	WOS	pLCA, energy technologies, 2050, scenarios, fuel, fuel cell, battery	Haase	2022	A	[3]
-	ja	ja	(2) (3) (4)	E	LCA scenarios, parameters, different TRL, emerging freight transport	Hanesch	2022	A	[4]
-	-	-	(4)	SD	review, measure, aviation emission, regulation, technological solution	Lai	2022	R	[5]
-	ja	ja	(2) (3) (4)	SD	pLCA, scenario data LCI, transport, energy system transformation	Naegler	2022	A	[6]
-	ja	ja	(2) (3) (4)	WOS/SD	pLCA, supply chain model, electricity-based mobility, cars, scenario	Rüdisüli	2022	A	[7]
-	ja	ja	(2) (3)	WOS/SD	pLCA, IAM, inventory database of changes, freight transport, targets	Sacchi	2022b	A	[8]
-	ja	ja	(2) (3) (4)	S	pLCA, method, tool calculator, cars, BEV, FCEV, parameters, 2050	Sacchi	2022a	A	[9]
-	-	-	(3)	SD	pLCA, absolute environmental sustainability concept, energy systems	Weidner	2022	A	[10]
-	-	-	(4)	SD	emissions, prospective scenarios, explorative, normative targets 2030	Ehrenberger	2021	A	[11]
-	ja	ja	(2) (3) (4)	WOS	pLCA, IAM, material, energy, transport, scenario parameters, method	Fishman	2021	A	[12]
-	ja	ja	(3) (4)	S	pLCA, energy-resource nexus, energy and metal supply scenarios	Harrprecht	2021	A	[13]
-	-	-	(2) (4)	WOS	pLCA, foreground system scenarios, car, Swedish electricity mix 2030	Morfheldt	2021	A	[14]
-	-	-	(1)	SD	pLCA, aircraft tool, conceptual phase, composite substitution scenario	Parolin	2021	T	[15]

Anhang A11 Dokumentation der Feinanalyse zur Literaturrecherche von pLCA und Verkehrsmitteln (I).

<b>Listennummer</b>	<b>Veröffentlichungsart</b> Review (R), Artikel (A), Tagungsband (T)	<b>Jahr</b>	<b>Erstautor</b>	<b>Kurzeinordnung</b> Titel-Keywords-Abstract	<b>Recherche</b> Datenbank (WOS, SD), Schneeballsuche (S), Eigene Recherche (E)	<b>Einordnungs- kategorien</b> (1) pLCA Flugzeug (2) pLCA Transport (3) pLCA-Methode (4) TTS (Batterieelektrisch/ Brennstoffzellenelektrisch)	<b>Detailanalyse geeignet</b>	<b>Methodenvergleich geeignet</b>	<b>Ausschluss</b>
[16]	A	2021	Pizzol	pLCA, upscaling, learning scenarios, parametrized LCA model, trucks	S	(2) (3) (4)	ja	ja	-
[17]	A	2021	Rottoli	scenarios, IAM, method, transport model, BEV, FCEV, rail, truck	S	(4)	ja	-	-
[18]	A	2021	Sacchi	pLCA, tool calculator, trucks, BEV, FCEV, parameters, 2050	S	(2) (3) (4)	ja	ja	-
[19]	A	2021	Steubing	pLCA, tool, superstructure database, IAM, future background, EV	S	(2) (3) (4)	ja	ja	-
[20]	A	2021	Usai	pLCA, freight transport, fuel cell, RE scenarios, secondary platinum	WOS	(2) (4)	-	-	ja
[21]	R	2021	Xie	review of hybrid electric powered aircraft	SD	(4)	-	-	ja
[22]	A	2020	Bergerson	pLCA, method, technology and market maturity, transport examples	S	(3) (4)	ja	-	-
[23]	A	2020	Cox	pLCA, future cars, powertrain, electricity scenarios, background data	WOS	(2) (3) (4)	ja	ja	-
[24]	A	2020	Korama	pLCA, future 2050, EV supply chain, electricity, steel production	WOS	(2) (3) (4)	ja	-	-
[25]	A	2020	Mendoza Beltran	pLCA, background scenario, IAM, electricity mix, EV-CV, approach	WOS	(2) (3) (4)	ja	ja	-
[26]	R	2020	Moni	pLCA, low TRL, method guidance, review, compare, data, uncertainty	S	(3)	ja	-	-
[27]	A	2020	Navas-Anguita	pLCA, energy system modelling, hydrogen, vehicle use, 2050 scenario	WOS	(2) (4)	-	-	ja
[28]	R	2020	Thonemann	pLCA, emerging technologies, systematic review, method guidance	E	(3)	ja	ja	-
[29]	A	2020	Vandepaer	pLCA, method, BAU reference/climate database, scenario families, EV	S	(2) (3) (4)	ja	ja	-
[30]	A	2020	van der Giesen	pLCA, guidance, foreground, background, uncertainty, IAM, experts	S	(3)	ja	-	-

Anhang A12 Dokumentation der Feinanalyse zur Literaturrecherche von pLCA und Verkehrsmitteln (II).

<b>Listennummer</b>	<b>Veröffentlichungsart</b> Review (R), Artikel (A), Tagungsband (T)	<b>Jahr</b>	<b>Erstautor</b>	<b>Kurzeinordnung</b> Titel-Keywords-Abstract	<b>Recherche</b> Datenbank (WOS, SD), Schneeballsuche (S), Eigene Recherche (E)	<b>Einordnungs- kategorien</b> (1) pLCA Flugzeug (2) pLCA Transport (3) pLCA-Methode (4) TTS (Batterieelektrisch/ Brennstoffzellenelektrisch)	<b>Detailanalyse geeignet</b>	<b>Methodenvergleich geeignet</b>	<b>Ausschluss</b>
[31]	A	2019	Gupta	LCA, hydrogen truck, GREET, parametric assumptions, scenarios	WOS	(2) (4)	-	-	ja
[32]	T	2019	Yao	LCA, key factors for emerging technologies, parametric analysis	SD	(3)	-	-	ja
[33]	A	2018	Cox	LCA scenarios, electricity mix, IAM, case study BEV-CV	S	(2) (4)	ja	ja	ja
[34]	T	2018	Cucurachi	emerging technologies, lab/pilot scale, methodical challenges, review	SD	(3)	ja	-	-
[35]	A	2018	Deutz	case study fuel, hydrogen from electrolysis basing on wind power	WOS	(4)	-	-	ja
[36]	A	2018	Navas-Anguila	pLCA, energy system, electricity mix, prospective life cycle 2050, EV	WOS	(2) (4)	-	-	ja
[37]	A	2018	Raugei	pLCA, electricity supply, vehicle use phase, case study BEV-CV	WOS	(2) (4)	-	-	ja
[38]	R	2017	Arvidsson	pLCA, method, review of case studies	WOS	(3) (4)	ja	-	-
[39]	A	2016	Steubing	modular LCA, scenario analysis, optimization, transport examples	S	(2) (3) (4)	ja	-	-
[40]	A	2016	Berrill	pLCA, power system, electric transport, scenarios, resource depletion	WOS	(2)	-	-	ja
[41]	A	2015	Zimmermann	pLCA, energy mix, vehicle use, scenario data in LCI, dynamic method	S	(2) (3) (4)	ja	-	-
[42]	R	2014	Nordelöf	LCA review, EV, future perspective missing, resources key for future	S	(2) (4)	ja	-	-
[43]	A	2008	Höjer	pLCA, scenario categories, method guidance, modelling techniques	S	(3)	ja	ja	-
[44]	A	2005	Spielmann	pLCA, scenarios, future transport systems (rail, bus, car), method	WOS	(2) (3)	ja	ja	-
[45]	A	2000	Pesonen	pLCA, method, framework, definition, What-if/Cornerstone scenarios	S	(3)	ja	ja	-

Anhang A13 Dokumentation der Feinanalyse zur Literaturrecherche von pLCA und Verkehrsmitteln (III).

Erstautor und Jahr	Methodischer pLCA Ansatz	Mehrstufiger Szenariobau	pLCA selbst durchgeführt	Szenarien für Transport	SCOPE der Veränderung Lebensphasen, Zeithorizont	Untersuchungsgegenstand neuartig (N), konventionell (K), TRL-L/P/M, Datenbezug (ecoinvent, Literatur, Expertise)	Charakteristik/Methodik Prädiktiv/Explorativ/Normativ (PEN), BAU/Wandel, Technik	Veränderungsmaßnahme Parameter des Vordergrund- / Hintergrundsystems (V/H)	Signifikanz der Ergebnisse große Veränderung zu Ausgangslage, weitere Erkenntnisse aus pLCA
Cucurachi 2022	ja	ja	-	-	-	Generisch: (N), TRL-L/P (Upscaling Datenabschätzung, IAM-Szenarien)	(P, E, N) BAU+Wandel Vorausschau, Narrative	V: Diverse H: Politik, Recht, Tech-Fortschritt, Umwelt, Sozioökonomie (PESTEL)	Klare vierstufige Szenarioentwicklung mit abgrenzbarem Zukunftsszenario
Dirnacher 2022	ja	ja	ja	ja	(B + A-C) 2050	Elektrische Pkw (N), TRL-M, (eco, Lit, IAM-Szenarien)	(E) BAU+Wandel Trend, Narrative	V: Effizienz H: Strommix, Kraftstoff, Recycling, PV, Stahl, Sozioökonomie	Einige Wirkungen von BEV, FCEV, syn. Kraftstoffe höher als von CV
Haase 2022	ja	-	ja	ja	(A-C) 2050	Kraftstoffe Batterien (N), TRL-P, (eco, Lit, Szenarien)	(N) BAU+Wandel Zielerreichen	V: Effizienz H: Strommix, Kraftstoff, Recycling, Sozioökonomie	Normatives Indikatorset u.a. auf Basis von SDG
Hanesch 2022	ja	-	ja	ja	(A-B) 2030	Elektrische Lkw (N), TRL-P, (eco, Lit)	(P) BAU+Wandel Vorausschau	V: Effizienz, Nutzungserhöhung H: Strommix	Zukunftsszenario verändert den klimaschädlichsten Lkw
Naegler 2022	ja	-	ja	ja	(A-C) 2050	Elektrische Pkw, Lkw (N), TRL-M, (eco, Lit, Szenarien)	(E, N) Wandel Vorausschau	V: Effizienz H: Strommix, Kraftstoff, Pkw/Lkw Marktanteil, Sozioökonomie	Harmonisierung 10 Szenarien ergibt neue Wirkungen, teils höher in 2050
Rüdisüli 2022	ja	-	ja	ja	(B) 2050	Elektrische Pkw (N), TRL-M, (eco, Lit)	(P, E, N) BAU+Wandel Trend	V: Kraftstoff Substitution H: stündlich Strommix (z.B. Import, Sektorenkopplung, PV-Ausbau)	Energieszenarioanzahl gibt großen Möglichkeitsraum in Zukunft

Anhang A14 Dokumentation der Detailanalyse zur Literaturrecherche von pLCA und Verkehrsmitteln (I).

Erstautor und Jahr	Methodischer pLCA Ansatz	Mehrstufiger Szenariobau	pLCA selbst durchgeführt	Szenarien für Transport	SCOPE der Veränderung Lebensphasen, Zeithorizont	Untersuchungsgegenstand neuartig (N), konventionell (K), TRL-L/P/M, Datenbezug (ecoinvent, Literatur, Expertise)	Charakteristik/Methodik Prädiktiv/Explorativ/Normativ (PEN), BAU/Wandel, Technik	Veränderungsmaßnahme Parameter des Vordergrund- / Hintergrundsystems (V/H)	Signifikanz der Ergebnisse große Veränderung zu Ausgangslage, weitere Erkenntnisse aus pLCA
Sacchi 2022b	ja	-	ja	ja	- 2050	Datensätze Energie, Klinker, Stahl, Lkw- Transport (N), TRL-P (eco, IAM- Szenarien)	(E, N) BAU+ Wandel Voraus- schau	H: Strommix, Material (z.B. Effizienz, Bioenergie, Flottenmix) Geplant: Wärme, Recycling	Premise er- höht Trans- parenz der Modellwahl und Konsis- tenz der neuen LCA Szenarien
Sacchi 2022a	ja	-	ja	ja	(A-C) 2050	Elektrische Pkw (N), TRL-M, (Lit, eco, Tool, IAM- Szenarien Natur- gesetze)	(P, N) BAU+ Wandel Zieler- reichen	V: Effizienz, Leichtbau, H: Strommix, Wärme, Re- cyclingstahl, Flottenmix, Kraftstoff, CO <sub>2</sub> -Entzug	Vergleich 2019/2050 Flotten- emission bei HEV (2°C Sze- nario) am höchsten
Fishman 2021	ja	ja	ja	ja	(A-C) 2060	Mobilität Pkm (K), TRL-M, (Lit, Ex IAM- Szenarien)	(E) Wandel Trend, Narra- tive	V: Material- Effizienz- Strategien H: Sozioöko- nomie, Re- cycling	Datenquali- tät und Ma- terialkreis- lauf für Szenarien relevant
Harpprecht 2021	ja	ja	ja	-	(A-C) 2050	Batterie, Datensätze Metalle (N), TRL-M (eco, Lit, IAM- Szenarien)	(E) BAU+ Wandel Voraus- schau	H: Erzgehalt Vorketten- effizienz, Recycling, Strommix	Symbiose zukünftiger Metallliefer- ketten und zukünftiger Strommix
Pizzol 2021	-	-	ja	ja	(A-B) 2050	Elektrische Lkw (N, K), TRL-P/M, (eco, Tool, Lernkurve, Upscaling)	(P) BAU+ Wandel Trend	V: Effizienz, FU, Batterie- gewicht, Dichte, Pro- duktivität, Standort	Parametri- sierte LCA- Modelle sind für Upscaling sehr hilfreich

Anhang A15 Dokumentation der Detailanalyse zur Literaturrecherche von pLCA und Verkehrsmitteln (II).



Erstautor und Jahr	Methodischer pLCA Ansatz	Mehrstufiger Szenariobau	pLCA selbst durchgeführt	Szenarien für Transport	SCOPE der Veränderung Lebensphasen, Zeithorizont	Untersuchungsgegenstand neuartig (N), konventionell (K), TRL-L/P/M, Datenbezug (ecoinvent, Literatur, Expertise)	Charakteristik/Methodik Prädiktiv/Explorativ/Normativ (PEN), BAU/Wandel, Technik	Veränderungsmaßnahme Parameter des Vordergrund- / Hintergrundsystems (V/H)	Signifikanz der Ergebnisse große Veränderung zu Ausgangslage, weitere Erkenntnisse aus pLCA
Rottoli 2021	-	ja	-	ja	- 2050	Transport- Sektor (K, N), TRL-M, (Lit, Tool, IAM- Szenarien, Lernkurve, Sättigungs- grad)	(P) BAU+ Wandel Trend, Voraus- schau	V: Effizienz, Lebenszeit, Kraftstoff H: Sozioöko- nomie, Kon- kurrenz- bedarf, In- frastruktur, Ressourcen- knappheit, Flottenmix	Verkehrs- modell für IAM- Szenario REMIND als Maß einer Verkehrs- sektor Dekarbo- nisierung
Sacchi 2021	ja	-	ja	ja	(A-C) 2050	Elektrische Lkw (N), TRL-P, (Lit, eco, Tool, IAM- Szenarien Natur- gesetze)	(P, N) BAU+ Wandel Trend, Zieler- reichen	V: Effizienz, Batterie- dichte, Brenn- stoffzellen- material, Leichtbau H: Strommix, Kraftstoff, CCS Ze- mentsektor	Flottenziele EU als Maß technisch machbarer Lkw- Lösungen
Steubing 2021	ja	-	ja	ja	(A-B) 2050	Elektrische Pkw (N), TRL-M, (eco, IAM- Szenarien)	(E) BAU+ Wandel Voraus- schau, Narra- tive	V: Effizienz, Batterie- dichte, Leichtbau H: Sektoren (Industrie, Strommix, Rohstoffab- bau, Abfall), Sozioöko- nomie	Toolverbin- dung Vor- der-/Hin- tergrundsys- temverän- derung er- zeugt große Szenario- varianz in Activity Browser
Bergerson 2020	ja	-	-	ja	-	Fahrzeug, Kraftstoff (N, K), Tech- nologie in Märkten (N, K)	(P, E) BAU+ Wandel Voraus- schau	V: Produkti- vität, Kraft- stoffeinsatz, H: Strommix, Marktanteil	Größere Szenario- änderung für neuarti- ge Techno- logien
Cox 2020	ja	-	ja	ja	(A-B) 2040	Elektrische Pkw (N), TRL-M, (eco, IAM- Szenarien)	(P, E) BAU+ Wandel Voraus- schau	V: Batterie, Fahrzeug- masse, Lebensdauer, H: Strommix	Wirkung Strommix hoch für BEV und FCEV

Anhang A16 Dokumentation der Detailanalyse zur Literaturrecherche von pLCA und Verkehrsmitteln (III).

Erstautor und Jahr	Methodischer pLCA Ansatz	Mehrstufiger Szenariobau	pLCA selbst durchgeführt	Szenarien für Transport	SCOPE der Veränderung Lebensphasen, Zeithorizont	Untersuchungsgegenstand neuartig (N), konventionell (K), TRL-L/P/M, Datenbezug (ecoinvent, Literatur, Experte)	Charakteristik/Methodik Prädiktiv/Explorativ/Normativ (PEN), BAU/Wandel, Technik	Veränderungsmaßnahme Parameter des Vordergrund- / Hintergrundsystems (V/H)	Signifikanz der Ergebnisse große Veränderung zu Ausgangslage, weitere Erkenntnisse aus pLCA
Koroma 2020	-	-	ja	ja	(A-C) 2050	Elektrische Pkw (N), TRL-M, (eco, Lit, Szenarien)	(E, N) BAU+ Wandel Voraus- schau	V: Effizienz H: Strommix, Wärme, Eisen/Stahl Produktion	Änderung in Szenario für EV groß und für CV mittel
Mendoza Beltran 2020	ja	ja	ja	ja	(B) 2050	Elektrische Pkw (N), TRL-M, (eco, IAM- Szenarien)	(E) BAU+ Wandel Voraus- schau	H: 2020- 2050 EU- Strommix Änderungen in allen Prozessen	EV hat meist die bessere Wirkung als CV über Zeit und Szenario
Moni 2020	ja	-	-	-	-	Review (Lit, Ex(perte), Simulation Upscaling, Lernkurve, Versuche)	(P, E) BAU+ Wandel Voraus- schau	V: Künftige Produktion und Reife H: Markt- durchsatz neue Technik	pLCA Hür- den durch geringes TRL mit unvollstän- digen Daten
Thonemann 2020	ja	-	-	-	-	Review (Lit, Ex(perte), Simulation Upscaling, Natur- gesetze)	(73% P, 23% E) BAU+ Wandel Voraus- schau	H: Strommix, Wärmemix, Metallbedarf (Zukunfts- märkte)	Hürden, da Vergleich nur unter derselben Zeit und hohem TRL möglich ist
Vandepaer 2020	ja	ja	ja	ja	(A-C) 2050	Energie- system mit Kopplung Transport- Sektor (K, N), TRL- P/M, (Lit, eco, ESM- Szenarien)	(E, N) BAU+ Wandel Voraus- schau, Narra- tive, Zieler- reichen	V: Effizienz, Struktur, An- trieb, Batterie Lebenszeit, Kraftstoff H: Strommix, Wärmemix, Materialpro- duktion En- ergiebedarf	Integrierte LCA-Um- weltindika- toren in En- ergiesystem Modellen nutzen zur Szenario- bewertung
van der Giesen 2020	ja	-	-	-	-	Generisch: (N), TRL-L (Ex, IAM- Szenarien, Simulation Upscaling)	(P, E) BAU+ Wandel Voraus- schau	H: Strommix, Technologie- mix	Einsatz Ex- pertenum- frage redu- ziert Un- sicherheit in Szenario

Anhang A17 Dokumentation der Detailanalyse zur Literaturrecherche von pLCA und Verkehrsmitteln (IV).

Erstautor und Jahr	Methodischer pLCA Ansatz	Mehrstufiger Szenariobau	pLCA selbst durchgeführt	Szenarien für Transport	SCOPE der Veränderung Lebensphasen, Zeithorizont	Untersuchungsgegenstand neuartig (N), konventionell (K), TRL-L/P/M, Datenbezug (ecoinvent, Literatur, Experte)	Charakteristik/Methodik Prädiktiv/Explorativ/Normativ (PEN), BAU/Wandel, Technik	Veränderungsmaßnahme Parameter des Vordergrund- / Hintergrundsystems (V/H)	Signifikanz der Ergebnisse große Veränderung zu Ausgangslage, weitere Erkenntnisse aus pLCA
Cucurachi 2018	ja	-	-	-	-	Generisch: (N), TRL-L	(P, E) BAU+ Wandel	V: Wirkungs- grad, Ma- terialeinsatz	Einsatz Sze- nario für finale TRL- Stufe und zu Vergleich
Arvidsson 2017	ja	ja	-	ja	-	Transport u.a. Kraft- stoff, Brenn- stoffzelle, Batterie(Lit)	(P, E) BAU+ Wandel Voraus- schau	V: Wirkungs- grad/Energie Reduktion H: Strommix	Ein erwart- bares Sze- nario oder Szenario- trichter
Steubing 2016	-	-	-	ja	-	Elektrische Pkw (N), TRL-M, (eco)	(E) BAU+ Wandel	V: Pkwgröße H: Regionaler Strommix	33 Szena- rien aus modularem LCA-Modell
Zimmermann 2015	-	-	ja	ja	(A-C) 2031	Elektrische Pkw (N), TRL-P, (eco, Lit)	(E) BAU+ Wandel Voraus- schau	H: 2030 Strommix in Nutzenphase, sonstiger Strommix identisch	Nur Verän- derung der Nutzen- phase, da dort größte Wirkungen
Nordelöf 2014	-	-	-	ja	-	Elektrische Pkw (N), TRL-M, (Lit)	(E) Wandel	H: Recycling Rohstoffab- bau, Strom- mix	Berücksich- tigung kün- ftigen Roh- stoffprozess
Höjer 2008	ja	ja	-	ja	-	Fahrzeug, Kraftstoff, Strommix, Abfall, Ziel- emission (K), TRL-M	(P, E, N) BAU+ Wandel Zieler- reichen	V: Daten zu Historie H: Schlüssel- faktoren zu wenigen Szenarien	In normativ Szenario ist komplexe Datenan- passung notwendig
Spielmann 2005	ja	ja	ja	ja	(A-B) 2020	Bahn, vgl. Bus, Pkw (K), TRL-M, (eco)	(E, N) BAU+ Wandel Voraus- schau	V: Kosten, Komfort, Gewicht H: Sozioöko- nomie	Diverse Ge- samtmaß- nahmen in Verkehrs- sektor
Pesonen 2000	ja	ja	-	-	-	Generisch: (K), TRL-M	(P, E, N) BAU+ Wandel Trend, Voraus-/ Zurück- schau	V: Design, Lebenszeit, Technik- fortschritt, Funktions- änderung	Einsatz von Marker-Sze- narien für langfristi- gen Zeit- horizont

Anhang A18 Dokumentation der Detailanalyse zur Literaturrecherche von pLCA und Verkehrsmitteln (V).

## Anhang B - Methodenentwicklung und Methodenanwendung

### Glossar für Begriffe zur Umsetzung der ex-post Sachbilanz

Ex-post Sachbilanz (LCI)	„Bestandteil der Ökobilanz, der die Zusammenstellung und Quantifizierung von Inputs und Outputs eines Produktes im Verlauf seines Lebensweges umfasst“ (DIN EN ISO 14044)
Standard-Parameter	Auf Produktsysteme konventioneller Fahrzeugtransporte ausgelegte Variable, mit der Input- und Outputdaten quantifiziert werden können
Gesamtflussinventar	Quantifiziertes Sachbilanz-Ergebnis eines Produktsystems pro Modell
Transportmodell	Auf Produktsysteme konventioneller Fahrzeugtransporte ausgelegtes Verrechnungsmodell zur Nachbildung der Technologie für den Erhalt des Gesamtflussinventars

Anhang B1 Glossar für die ex-post Sachbilanz.

### Glossar für Begriffe zur Umsetzung der ex-ante Sachbilanz

Ex-ante Sachbilanz (eLCI)	Nachbildung von einem vollständigen Produktsystem der neuartigen Technologie anhand einer Typologie der Technologieveränderung mit einer Parameter-Generierung für das noch in Entwicklung befindliche Produktsystem zur Umweltbewertung im Status Quo
Transport-Transformationslösung (TTS)	Konkrete Variante einer in Entwicklung befindlichen Technologie des Verkehrssektors, die im Markthochlauf bereits technische Machbarkeit von TRL 3 erlangt hat und die konventionelle Technologie im gleichen Mobilitätsfeld mit einer Energienutzungsveränderung ersetzen kann
Transformations-typ	Überkategorie der TTS, die jede Energienutzungsveränderung enthält und die Maßnahmen Energieträgerwechsel, Antriebssystemwechsel, Tragstrukturwechsel und Strominfrastrukturwechsel umfasst
Mobilitätsfeld	Gleiches Einsatzfeld der konventionellen und neuartigen Technologie, das sich aus dem Mobilitätstyp und Mobilitätszweck zusammensetzt
Mobilitätstyp	Kategorie der qualitativen Transportleistung, die sich in die Festlegung des Verkehrsmittels und des Transportguts unterteilt
Mobilitätszweck	Kategorie der quantitativen Transportleistung, die vom Mobilitätstyp zu erfüllen ist und aus energiebasiertem Fahrzyklus, distanzbasiertem Transportradius und quantifizierter Transportgutmenge besteht
Vergleichs-Parameter	Variablen, mit denen für die neuartige Technologie Mobilitätstyp, Mobilitätszweck und Transformationstyp charakterisiert werden
Transformations-Parameter	Variablen, welche zusätzlich zu den Standard-Parametern als erstes Veränderungslevel aus der Transformation resultierende Input- und Outputdaten zur Ausbildung des Transformationsmodells darstellen
Datengenerierungstechnik	Diversifizierte Werkzeuge zur Datensammlung und Quantifizierung, mit denen ein vollständiges Modell des Produktsystems für die Umweltbewertung im Referenzzustand ausgebildet werden kann
Transformationsmodell	Auf Produktsysteme neuartiger Fahrzeugtransporte ausgelegtes Verrechnungsmodell zur Nachbildung der Technologie für den Erhalt des Gesamtflussinventars
Referenzzustand	Gegenwärtiger Zustand (Status Quo) der Transformation, der gesetzte Rahmenvorgaben bezüglich einer nachhaltigen Mobilität nicht einhält

Anhang B2 Glossar für die ex-ante Sachbilanz.

## Glossar für Begriffe zur Umsetzung der prospektiven Sachbilanz

Prospektive Sachbilanz (pLCI)	Nachbildung von zukunftsgerichteten konventionellen und neuartigen Technologien anhand der Charakterisierung der Zukunftsveränderung mit einer Parameter-Modifizierung für marktreife Produktsysteme zur Umweltbewertung mittels konsistenter Zukunftsszenarien
Zukunftsszenario	Zukunftsbild über eine mögliche zukünftige Situation inklusive der Entwicklungspfade von Entwicklungen, Dynamiken und treibenden Kräfte, welche zur zukünftigen Situation führen, mit dem Fokus auf bestimmte interessierende Aspekte einer möglichen Zukunft unter vielen und ohne Wahrheitsanspruch (Kosow & Gaßner, 2008)
Szenarioausprägungsergebnis	Abbildung einer spezifischen Szenarioausprägung, unterteilt in einen qualitativen Erzählstrang und in quantifizierte Szenariobausteine, zur Abgrenzung von anderen Szenarien basierend auf den Festlegungen der Szenarioentwicklung
Szenarioentwicklung	Festlegungen im Entwicklungsprozess des Zukunftsszenarios, das sich aus dem Szenariotyp und dem Modifikationszweck zusammensetzt
Szenariotyp	Kategorie für prädiktive, explorative und normative Szenarien zur qualitativen zweidimensionalen Veränderung mittels Zeithorizont, der eine nahe bis entfernte Zukunft abbildet, und Veränderungsintensität, aus der eine gemäßigte bis extreme Entwicklung hervorgeht
Modifikationszweck	Kategorie der quantitativen Veränderung zum Referenzzustand, die Ursachen der Zukunftsveränderungen als Basis für Wertänderungen in drei Parameterarten bereitstellt, aus welchen sich zusammen mit unveränderten Parametern das Zukunftsveränderungsmodell bildet
Advance-Parameter (AP)	Variablen der ersten Parameterart des Modifikationszwecks, die als zweites Veränderungslevel ausgewählten technologischen Fortschritt der Input- und Outputdaten für Technologieverbesserungen der konventionellen Technologie abbilden
Upscaling-Parameter (UP)	Variablen der zweiten Parameterart des Modifikationszwecks, die als zweites Veränderungslevel ausgewählten technologischen Fortschritt der Input- und Outputdaten für eine möglichst abgeschlossene Technologieentwicklung der neuartigen Technologie abbilden
Overall-Parameter (OP)	Variablen der dritten Parameterart des Modifikationszwecks, die als drittes Veränderungslevel ausgewählten zeitlichen Fortschritt der Input- und Outputdaten im Hintergrundsystem für die konventionelle und neuartige Technologie abbilden und aufgrund der hohen Unsicherheit in mehreren Ausprägungen ausgebildet werden können
Inventar-Parameter	Variablen, die sich aus nicht-modifizierten Incumbent-Parameter (IP) der CT bzw. Emerging-Parameter (EP) der TTS sowie modifizierten AP, UP und OP im Zukunftsveränderungsmodell zusammensetzen
Datenmodifikationstechnik	Diversifizierte Werkzeuge zur Modifizierung, mit denen technologisch und zeitlich passgenaue Modelle aller Produktsysteme für die Umweltbewertung im Zukunftszustand ausgebildet werden können
Zukunftsveränderungsmodell	Auf Produktsysteme konventioneller und neuartiger Fahrzeugtransporte ausgelegtes Verrechnungsmodell zur Nachbildung der Technologien für den Erhalt prospektiver Gesamtflussinventare
Zukunftszustand	In der Zukunft befindlicher Zustand der Transformation, in dem zwar Anforderungen berücksichtigt wurden, aber nicht erfüllt sein müssen
Zielzustand	Das Erreichen des vorgegebenen Ziels der Transformation, in dem Anforderungen an eine nachhaltige Mobilität erfüllt sind

Anhang B3 Glossar für die prospektive Sachbilanz.

<b>Parameterverzeichnis für retrospektive Ökobilanzierung</b> <b>Zur Modellierung neuartiger Verkehrsmittel mittels Parameter-Generierung</b>		
CA 2002	Standard-Parameter	Wert mit Einheit
Funktionelle Einheit	Jahresfahrleistung	299880 km/a
	Jahresfahrzyklen	630 Missionen/a
	Durchschnittliche Transportdistanz	476 km/Mission
	Transportgutmenge	14 n (19 n)
	Durchschnittliche Auslastung	75%
Herstellungsphase (A)	Gesamtfahrzeugmasse	4919 kg
	Modellfahrzeugmasse	4283,5 kg (4630 kg)
	Fahrzeugmaterialverteilung	Aluminium (62,5%), Stahl (22,1%), Kupfer (0,2%), Nickel (3,9%), Kritische Rohstoffe (4,5%), Verbundwerkstoffe (2,9%), Sonstige Polymere (3,9%)
	Komponentenprozessenergie	18100,4 MJ Wärme, 1871,5 kWh Strom
	Komponentenanzahl	1 x A1, 2 x A3, 1 x A5, 1 x A7, 1 x A8
	Komponententransportdistanz	1212,6 tkm Straße
	Komponentenmasse	Konventioneller Antrieb (448,7 kg), Propeller (59,9 kg), Tragstruktur (2465,0 kg), Flugzeugsysteme (750,0 kg), Kabinenausrüstung (500,0 kg)
Komponentenmaterialverteilung	A1-Alu (4,7%), A1-Stahl (51,1%), A1-Edelmetalle (44,2%), A1-Polymere (0%), A3-Alu (46,0%), A3-Stahl (0%), A3-Edelmetalle (0%), A3-Polymere (54,0%), A5-Alu (78,6%), A5-Stahl (15,0%), A5-Edelmetalle (5,5%), A5-Polymere (0,9%), A7-Alu (58,6%), A7-Stahl (26,3%), A7-Edelmetalle (4,7%), A7-Polymere (10,4%), A8-Alu (45,0%), A8-Stahl (30,0%), A8-Edelmetalle (0%), A8-Polymere (25,0%)	
Nutzenphase (B)	Durchschnittlicher Energieverbrauch	0,87 kg/km Kerosin
	Energieverbrauch (während Fahrzyklus)	Reiseflug: 280,7 kg Kerosin
	Energieverbrauch (Start/Stop Fahrzyklus)	LTO: 131,8 kg Kerosin
Entsorgungsphase (C)	Fahrzeuglebensdauer	20 a
	Komponentenlebensdauer	Konventionelle (20 a)
	Fahrzeugverwertungsverteilung	Beseitigung (80%), Verbrennung (20%), Recycling (20%)
	Materialverwertungsverteilung	Verbrennung – Polymere (20%), Recycling – Alu (20%), Recycling – Stahl (20%), Recycling – Edelmetalle (20%)

Anhang B4 Standard-Parameter des konventionellen Flugzeugs CA 2002.



<b>Parameterverzeichnis für Ökobilanzierung</b>		
<b>Zur Klassifizierung neuartiger Verkehrsmittel</b>		
<b>HEA 2025</b>	<b>Vergleichs-Parameter</b>	<b>Dokumentation</b>
Mobilitätstyp	Verkehrsmittel	Flugzeug
	Fahrzeuggröße	Klein
	Fahrzeugbaureihe mit Fahrzeugbaujahr	Beechcraft 1900D-PTE 2025
	Transportgut	Personen
Mobilitätszweck	Konventionelle Leistung	1308 kW *2
	Fahrzyklus	Kurzstrecke
	Transportradius	Nationalverkehr
	Transportgutmenge	19 Personen
Transformationstyp	Elektrische Leistung	347 kW *2
	Energienutzungs- veränderung	Energieträgerwechsel, Antriebssystemwechsel, Tragstrukturwechsel
	Energieträgerart	Kerosin, Strom
	Technologiereifegrad	Labormaßstab [Industrieller Maßstab]
	Zeitlicher Zustand mit Betrachtungszeitpunkt	Referenzzustand 2023 [Prädiktiver Zukunftszustand 2025]

Anhang B5 Vergleichs-Parameter der Transport-Transformationslösung HEA gegenüber dem CA.

<b>Parameterverzeichnis für Ökobilanzierung</b>		
<b>Zur Klassifizierung neuartiger Verkehrsmittel</b>		
<b>FCEA 2050</b>	<b>Vergleichs-Parameter</b>	<b>Dokumentation</b>
Mobilitätstyp	Verkehrsmittel	Flugzeug
	Fahrzeuggröße	Klein
	Fahrzeugbaureihe mit Fahrzeugbaujahr	Beechcraft 1900D-FCB 2050
	Transportgut	Personen
Mobilitätszweck	Konventionelle Leistung	-
	Fahrzyklus	Kurzstrecke
	Transportradius	Nationalverkehr
	Transportgutmenge	19 Personen
Transformationstyp	Elektrische Leistung	467 kW Batterie, 779 kW *2 Brennstoffzellen
	Energienutzungs- veränderung	Energieträgerwechsel, Antriebssystemwechsel, Tragstrukturwechsel
	Energieträgerart	Wasserstoff, Strom
	Technologiereifegrad	Labormaßstab [Industrieller Maßstab]
	Zeitlicher Zustand mit Betrachtungszeitpunkt	Referenzzustand 2023 [Explorativer Zukunftszustand 2050]

Anhang B6 Vergleichs-Parameter der Transport-Transformationslösung FCEA gegenüber dem CA.

<b>Parameterverzeichnis für retrospektive Ökobilanzierung</b> <b>Zur Modellierung neuartiger Verkehrsmittel mittels Parameter-Generierung</b>		
<b>HEA 2025</b>	<b>Standard-Parameter</b>	<b>Wert mit Einheit</b>
Funktionelle Einheit	Jahresfahrleistung	299880 km/a
	Jahresfahrzyklen	630 Missionen/a
	Durchschnittliche Transportdistanz	476 km/Mission
	Transportgutmenge	14 n (19 n)
	Durchschnittliche Auslastung	75%
Herstellungsphase (A)	Gesamtfahrzeugmasse	4983 kg
	Modellfahrzeugmasse	4623,1 kg (4893 kg)
	Fahrzeugmaterialverteilung	Aluminium (55,1%), Stahl (23,9%), Kupfer (2,6%), Nickel (5,0%), Kritische Rohstoffe (5,0%), Verbundwerkstoffe (4,4%), Sonstige Polymere (4,0%)
	Komponentenprozessenergie	17265,6 MJ Wärme, 1785,2 kWh Strom
	Komponentenanzahl	1 x A1, 1 x A2, 4 x A3, 1 x A5, 1 x A7, 1 x A8
	Komponententransportdistanz	1575,5 tkm Straße, 1901,4 tkm Luft
	Komponentenmasse	Konventioneller Antrieb (596,0 kg), Elektrischer Antrieb (252,2 kg), Propeller (32,8 kg), Tragstruktur (2351,3 kg), Flugzeugsysteme (820,0 kg), Kabinenausstattung (472,4 kg)
Komponentenmaterialverteilung	A1-Alu (4,7%), A1-Stahl (51,1%), A1-Edelmetalle (44,2%), A1-Polymere (0%), A2-Alu (19,1%), A2-Stahl (58,5%), A2-Edelmetalle (16,8%), A2-Polymere (5,6%), A3-Alu (46,0%), A3-Stahl (0%), A3-Edelmetalle (0%), A3-Polymere (54,0%), A5-Alu (79,5%), A5-Stahl (14,6%), A5-Edelmetalle (5,0%), A5-Polymere (0,9%), A7-Alu (50,6%), A7-Stahl (23,1%), A7-Edelmetalle (17,2%), A7-Polymere (9,1%), A8-Alu (45,0%), A8-Stahl (10,0%), A8-Edelmetalle (0%), A8-Polymere (45,0%)	
Nutzenphase (B)	Durchschnittlicher Energieverbrauch	0,61 kg/km Kerosin, 0,02 kWh/km Strom
	Energieverbrauch (während Fahrzyklus)	Reiseflug: 259,5 kg Kerosin
	Energieverbrauch (Start/Stop Fahrzyklus)	LTO: 31,4 kg Kerosin, 7,6 kWh Strom
Entsorgungsphase (C)	Fahrzeuglebensdauer	20 a
	Komponentenlebensdauer	Konventionelle (20 a)
	Fahrzeugverwertungsverteilung	Beseitigung (80%), Verbrennung (20%), Recycling (20%)
	Materialverwertungsverteilung	Verbrennung – Polymere (20%), Recycling – Alu (20%), Recycling – Stahl (20%), Recycling – Edelmetalle (20%)

HEA 2025	Transformations-Parameter	Wert mit Einheit
Energieträger (Geringe Transformationsintensität)	Neuer Herstellungspfad	-
	Elektrischer Fahranteil	0% elektrische Energiebereitstellung, 50% elektrische Wellenleistung
	Regenerative Energien Anteil	45% RE
Antriebssystem (Mittlere Transformationsintensität)	Elektromotorart	Permanenterregte Synchronmotoren
	Batterieart	Für elektrisches Rollen: Lithium-Ionen (NMC 811)
	Batterieenergiedichte	Li-Ion: 195 Wh/kg (222 Wh/kg)
	Ladezyklen Anzahl	Li-Ion: 1800 n
	Brennstoffzellenart	-
	Leistungselektronik Komponenten	Generator, Gleichrichter, Wechselrichter, Kabel, Schutzschalter, Getriebe
	Lebensdauer	Elektromotor (6,8 a), Li-Ion Batterie (2,9 a)
Tragstruktur (Große Transformationsintensität)	Materialsubstitutionsmenge	Sitze: 94,5 kg Stahl mit CFK
	Formgebung	Größere Stromlinienform
	Fertigungsmethode	Metallbauweise
	Materialeffizienz	2%
Strominfrastruktur (Zusätzliche Transformationsintensität)	Elektrisches Straßensystem	-
	Batterieladeleistung	-
	Gesamtlänge	-
	Komponentenanzahl	-
	Herstellungsort	-
	Durchschnittliche Infrastrukturnutzung	-

Anhang B7 Standard-Parameter und Transformations-Parameter des neuartigen Flugzeugs HEA 2025.

<b>Parameterverzeichnis für retrospektive Ökobilanzierung</b> <b>Zur Modellierung neuartiger Verkehrsmittel mittels Parameter-Generierung</b>		
FCEA 2050	Standard-Parameter	Wert mit Einheit
Funktionelle Einheit	Jahresfahrleistung	299880 km/a
	Jahresfahrzyklen	630 Missionen/a
	Durchschnittliche Transportdistanz	476 km/Mission
	Transportgutmenge	14 n (19 n)
	Durchschnittliche Auslastung	75%
Herstellungsphase (A)	Gesamtfahrzeugmasse	6283 kg
	Modellfahrzeugmasse	6054 kg (6283 kg)
	Fahrzeugmaterialverteilung	Aluminium (42,1%), Stahl (6,2%), Kupfer (23,3%), Nickel (0,2%), Kritische Rohstoffe (12,9%), Verbundwerkstoffe (5,6%), Sonstige Polymere (9,7%)
	Komponentenprozessenergie	15344,8 MJ Wärme, 1586,6 kWh Strom
	Komponentenanzahl	1 x A2, 4 x A3, 1 x A5, 1 x A7, 1 x A8
	Komponententransportdistanz	1050,6 tkm Straße
	Komponentenmasse	Elektrischer Antrieb (2615,0 kg), Propeller (26,7 kg), Tragstruktur (2089,7 kg), Flugzeugsysteme (833,3 kg), Kabinenausstattung (409,0 kg)
Komponentenmaterialverteilung	A2-Alu (43,6%), A2-Stahl (5,3%), A2-Edelmetalle (40,6%), A2-Polymere (10,5%), A3-Alu (46,0%), A3-Stahl (0%), A3-Edelmetalle (0%), A3-Polymere (54,0%), A5-Alu (16,6%), A5-Stahl (12,6%), A5-Edelmetalle (3,8%), A5-Polymere (67,0%), A7-Alu (56,5%), A7-Stahl (15,1%), A7-Edelmetalle (17,9%), A7-Polymere (10,5%), A8-Alu (45,0%), A8-Stahl (10,0%), A8-Edelmetalle (0%), A8-Polymere (45,0%)	
Nutzenphase (B)	Durchschnittlicher Energieverbrauch	0,17 kg/km Flüssigwasserstoff, 0,41 kWh/km Strom
	Energieverbrauch (während Fahrzyklus)	Reiseflug: 75,6 kg Flüssigwasserstoff, 161,7 kWh Strom
	Energieverbrauch (Start/Stop Fahrzyklus)	LTO: 5,3 kg Flüssigwasserstoff, 35,4 kWh Strom
Entsorgungsphase (C)	Fahrzeuglebensdauer	20 a
	Komponentenlebensdauer	Konventionelle (20 a)
	Fahrzeugverwertungsverteilung	Beseitigung (80%), Verbrennung (20%), Recycling (20%)
	Materialverwertungsverteilung	Verbrennung – Polymere (20%), Recycling – Alu (20%), Recycling – Stahl (20%), Recycling – Edelmetalle (20%)

FCEA 2050	Transformations-Parameter	Wert mit Einheit
Energieträger (Geringe Transformationsintensität)	Neuer Herstellungspfad	Prozess (Elektrolyse), Input (Strom), Output (Flüssigwasserstoff)
	Elektrischer Fahranteil	14% elektrische Energiebereitstellung, 100% elektrische Wellenleistung
	Regenerative Energien Anteil	45% RE
Antriebssystem (Mittlere Transformationsintensität)	Elektromotorart	Permanenterregte Synchronmotoren
	Batterieart	Für Antriebssystem: Lithium-Schwefel Für elektrisches Rollen: Lithium-Ionen (NMC 811)
	Batterieenergiedichte	Li-S: 400 Wh/kg (500 Wh/kg), Li-Ion: 195 Wh/kg (222 Wh/kg)
	Ladezyklen Anzahl	Li-S: 500 n, Li-Ion: 1800 n
	Brennstoffzellenart	Polymerelektrolytmembran
	Leistungselektronik Komponenten	Wechselrichter, Kabel, Schutzschalter, Getriebe, Verdichter, Wärmetauscher, Flüssigwasserstofftank
	Lebensdauer	Elektromotor (6,8 a), Li-Ion Batterie (2,9 a), Li-S Batterie (0,8 a) Brennstoffzelle (4,8 a), Wasserstofftank (7,9 a)
Tragstruktur (Große Transformationsintensität)	Materialsubstitutionsmenge	Sitze: 94,5 kg Stahl mit CFK Struktur: 1383,4 kg Alu mit CFK
	Formgebung	Größere Stromlinienform
	Fertigungsmethode	Verbundbauweise
	Materialeffizienz	25%
Strominfrastruktur (Zusätzliche Transformationsintensität)	Elektrisches Straßensystem	-
	Batterieladeleistung	-
	Gesamtlänge	-
	Komponentenanzahl	-
	Herstellungsort	-
	Durchschnittliche Infrastrukturnutzung	-

Anhang B8 Standard-Parameter und Transformations-Parameter des neuartigen Flugzeugs FCEA 2050.

<b>Datenerhebungsblatt HEA: Prozess A2 - Elektrischer Antrieb Herstellung</b>				
Gesamtgewicht: 252,24 kg				
Anzahl: 1 Stück				
<b>Prozessmodul Name</b>	<b>Modul-masse (in kg)</b>	<b>Teilkomponente Name</b>	<b>Datensatz Zuordnung</b>	<b>Material-Verteilung (in %)</b>
Elektromotor	107,45	Motor 1	Aluminium	0,19
		Motor 2	Stahl	0,63
		Motor 3	Chrom-Stahl	0,08
		Motor 4	Kupfer	0,09
		Motor 5	Neodym	0,01
Generator	26,99	Generator 1	Aluminium	0,16
		Generator 2	Kupfer	0,09
		Generator 3	Stahl	0,75
Gleichrichter	26,99	Converter 1	Aluminium	0,6
		Converter 2	Kupfer	0,12
		Converter 3	Chrom-Stahl	0,08
		Converter 4	Stahl	0,11
		Converter 5	PET	0,03
		Converter 6	PP	0,03
		Converter 7	PVC	0,03
Wechselrichter	11,86	Inverter 1	Aluminium	0,66
		Inverter 2	Kupfer	0,15
		Inverter 3	Stahl	0,07
		Inverter 4	PET	0,04
		Inverter 5	PP	0,04
		Inverter 6	PVC	0,04
Kupferkabel	54,99	Kabel 1	Kupfer	0,66
		Kabel 2	PET	0,34
Schutzschalter	7,06	Switch 1	Kupfer	0,27
		Switch 2	Stahl	0,25
		Switch 3	PET	0,16
		Switch 4	PP	0,16
		Switch 5	PVC	0,16
Getriebe	16,90	Getriebe	Stahl	1

Anhang B9 Datenerhebungsblatt für die Lebensweg-Prozesse der HEA zur Elektrischer Antrieb Herstellung.



<b>Datenerhebungsblatt FCEA: Prozess A2 - Elektrischer Antrieb Herstellung</b>				
Gesamtgewicht: 2615,04 kg				
Anzahl: 1 Stück				
<b>Prozessmodul Name</b>	<b>Modul-masse (in kg)</b>	<b>Teilkomponente Name</b>	<b>Datensatz Zuordnung</b>	<b>Material-Verteilung (in %)</b>
Elektromotor	151,67	Motor 1	Aluminium	0,19
		Motor 2	Stahl	0,63
		Motor 3	Chrom-Stahl	0,08
		Motor 4	Kupfer	0,09
		Motor 5	Neodym	0,01
Wechselrichter	15,69	Inverter 1	Aluminium	0,66
		Inverter 2	Kupfer	0,15
		Inverter 3	Stahl	0,07
		Inverter 4	PET	0,04
		Inverter 5	PP	0,04
		Inverter 6	PVC	0,04
Kupferkabel	104,60	Kabel 1	Kupfer	0,66
		Kabel 2	PET	0,34
Schutzschalter	23,54	Switch 1	Kupfer	0,27
		Switch 2	Stahl	0,25
		Switch 3	PET	0,16
		Switch 4	PP	0,16
		Switch 5	PVC	0,16
Getriebe	14,38	Getriebe	Stahl	1
Lithium-Schwefel-Batterie	855,12	Batterie 1	Aluminium	0,45
		Batterie 2	Stahl	0,02
		Batterie 3	Kupfer	0,3
		Batterie 4	Lithium	0,13
		Batterie 5	PET	0,04
		Batterie 6	PP	0,03
		Batterie 7	PVC	0,03
Polymerelektrolyt-membran Brennstoffzelle	211,82	PEM 1	Aluminium	0,05
		PEM 2	Stahl	0,02
		PEM 3	GFK	0,02
		PEM 4	Graphit	0,73
		PEM 5	PET	0,06
		PEM 6	PP	0,06
		PEM 7	PVC	0,06
Polymerelektrolyt-membran Verdichter	83,68	Zentrifugalkompressor	Titan	0,834
		Gehäuse	Chrom-Stahl	0,166
Polymerelektrolyt-membran Wärmetauscher	713,91	Wärmetauscher 1	Aluminium	0,34
		Wärmetauscher 2	Stahl	0,66
Flüssigwasserstofftank	397,49	Tankwand	Aluminium	0,765
		Isolationsmaterial	PUR	0,235

Anhang B10 Datenerhebungsblatt für die Lebensweg-Prozesse der FCEA zur Elektrischer Antrieb Herstellung.

	<b>Gesamtflussinventar</b>		CA 2002	CA 2025A	CA 2050B	CA 2050C
	Produktsystem, Modellierungszeitpunkt		LCI	pLCI PRE	pLCI EXP <sub>1</sub>	pLCI EXP <sub>2</sub>
	<b>Produkt- und Elementarflüsse</b>	<b>/pkm</b>	<b>Aggregiertes Sachbilanz-Ergebnis</b>			
A – Herstellungsphase	Aluminium Bereitstellung	kg	0,0000319	0,0000314	0,0000125	0,0000125
	Stahl Bereitstellung	kg	0,0000052	0,0000045	0,0000042	0,0000042
	Chrom-Stahl Bereitstellung	kg	0,0000061	0,0000060	0,0000042	0,0000042
	Kupfer Bereitstellung	kg	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
	Nickel Bereitstellung	kg	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
	Nickel-Legierung Bereitstellung	kg	0,0000019	0,0000025	0,0000022	0,0000022
	Titan Bereitstellung	kg	0,0000022	0,0000023	0,0000016	0,0000016
	Kobalt Bereitstellung	kg	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
	Neodym Bereitstellung	kg				
	Lithium Bereitstellung	kg				
	Graphit Bereitstellung	kg				
	CFK Bereitstellung	kg	0,0000003	0,0000014	0,0000138	0,0000138
	GFK Bereitstellung	kg	0,0000011	0,0000014	0,0000012	0,0000012
	PET Bereitstellung	kg	0,0000005	0,0000004	0,0000004	0,0000004
	PP Bereitstellung	kg	0,0000005	0,0000004	0,0000004	0,0000004
	PVC Bereitstellung	kg	0,0000005	0,0000004	0,0000004	0,0000004
	PUR Bereitstellung	kg	0,0000003	0,0000003	0,0000003	0,0000003
	Gummi Bereitstellung	kg	0,0000003	0,0000002	0,0000001	0,0000001
	Transport Straße	tkm	0,0000144	0,0000189	0,0000165	0,0000165
	Transport Luft	tkm				
Strom Bereitstellung	kWh	0,0000223	0,0000217	0,0000151	0,0000151	
Wärme Bereitstellung	MJ	0,0002156	0,0002101	0,0001465	0,0001465	
Lackierung Bereitstellung	kg	0,0000005	0,0000002	0,0000004	0,0000004	
B – Nutzenphase	Kerosin Bereitstellung	kg	0,0618998	0,0490621	0,0414631	0,0414631
	Strom Bereitstellung	kWh				
	Wasserstoff Bereitstellung	kg				
	Kohlendioxid Emission	kg	0,1949842	0,1545457	0,1306087	0,1306087
	Stickoxide Emission	kg	0,0003179	0,0002568	0,0002176	0,0002176
	Schwefeloxide Emission	kg	0,0000520	0,0000412	0,0000348	0,0000348
	Wasser Emission	m3	0,0000761	0,0000603	0,0000510	0,0000510
	Kohlenmonoxid Emission	kg	0,0014753	0,0010755	0,0008978	0,0008978
	Kohlenwasserstoffe Emission	kg	0,0003359	0,0002287	0,0001888	0,0001888
C – Entsorgungsphase	Transport Straße	tkm	0,0000000	0,0000000	0,0000000	0,0000000
	Strom Bereitstellung	kWh	0,0000195	0,0000454	0,0000944	0,0001465
	Abfall Deponierung	kg	0,0000408	0,0000296	0,0000158	0,0000034
	Verbundwerkstoffe Verbrennung	kg	0,0000003	0,0000010	0,0000075	0,0000135
	PET Verbrennung	kg	0,0000001	0,0000002	0,0000002	0,0000001
	PP Verbrennung	kg	0,0000001	0,0000002	0,0000002	0,0000001
	PVC Verbrennung	kg	0,0000001	0,0000002	0,0000002	0,0000001
	PUR Verbrennung	kg	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000002
	Gummi Verbrennung	kg	0,0000001	0,0000001	0,0000001	0,0000001
	Aluminium Recycling	kg	0,0000064	0,0000126	0,0000075	0,0000119
	Stahl Recycling	kg	0,0000023	0,0000056	0,0000071	0,0000080
	Edelmetalle Recycling	kg	0,0000009	0,0000022	0,0000026	0,0000033
	Polymere Recycling	kg		0,0000001	0,0000003	0,0000009
	Aluminium Sekundärrohstoffe	kg	0,0000063	0,0000125	0,0000074	0,0000118
	Stahl Sekundärrohstoffe	kg	0,0000020	0,0000049	0,0000063	0,0000071
Edelmetalle Sekundärrohstoffe	kg	0,0000007	0,0000017	0,0000020	0,0000025	
Polymere Sekundärrohstoffe	kg		0,0000001	0,0000003	0,0000009	

Anhang B11 Gesamtflussinventar zur Bereitstellung der Transportfunktion im konventionellen Flugzeug pro Personenkilometer.

<b>Gesamtflussinventar</b>		<b>HEA 2025</b>	<b>HEA 2025A</b>	
Produktsystem, Modellierungszeitpunkt		eLCI	pLCI PRE	
<b>Produkt- und Elementarflüsse</b>	<b>/pkm</b>	<b>Aggregiertes Sachbilanz-Ergebnis</b>		
<b>A – Herstellungsphase</b>	Aluminium Bereitstellung	kg	0,0000332	0,0000332
	Stahl Bereitstellung	kg	0,0000077	0,0000077
	Chrom-Stahl Bereitstellung	kg	0,0000067	0,0000067
	Kupfer Bereitstellung	kg	0,0000016	0,0000016
	Nickel Bereitstellung	kg	0,0000005	0,0000005
	Nickel-Legierung Bereitstellung	kg	0,0000025	0,0000025
	Titan Bereitstellung	kg	0,0000021	0,0000021
	Kobalt Bereitstellung	kg	0,0000002	0,0000002
	Neodym Bereitstellung	kg	0,0000000	0,0000000
	Lithium Bereitstellung	kg	0,0000002	0,0000002
	Graphit Bereitstellung	kg	0,0000005	0,0000005
	CFK Bereitstellung	kg	0,0000015	0,0000015
	GFK Bereitstellung	kg	0,0000012	0,0000012
	PET Bereitstellung	kg	0,0000008	0,0000008
	PP Bereitstellung	kg	0,0000006	0,0000006
	PVC Bereitstellung	kg	0,0000006	0,0000006
	PUR Bereitstellung	kg	0,0000003	0,0000003
	Gummi Bereitstellung	kg	0,0000002	0,0000002
	Transport Straße	tkm	0,0000188	0,0000188
	Transport Luft	tkm	0,0000226	0,0000226
Strom Bereitstellung	kWh	0,0000213	0,0000213	
Wärme Bereitstellung	MJ	0,0002056	0,0002056	
Lackierung Bereitstellung	kg	0,0000005	0,0000005	
<b>B – Nutzenphase</b>	Kerosin Bereitstellung	kg	0,0436510	0,0436510
	Strom Bereitstellung	kWh	0,0011390	0,0011390
	Wasserstoff Bereitstellung	kg		
	Kohlendioxid Emission	kg	0,1375005	0,1375005
	Stickoxide Emission	kg	0,0002396	0,0002396
	Schwefeloxide Emission	kg	0,0000367	0,0000367
	Wasser Emission	m3	0,0000537	0,0000537
	Kohlenmonoxid Emission	kg	0,0007421	0,0007421
	Kohlenwasserstoffe Emission	kg	0,0001176	0,0001176
<b>C – Entsorgungsphase</b>	Transport Straße	tkm	0,0000000	0,0000000
	Strom Bereitstellung	kWh	0,0000252	0,0000563
	Abfall Deponierung	kg	0,0000483	0,0000342
	Verbundwerkstoffe Verbrennung	kg	0,0000005	0,0000009
	PET Verbrennung	kg	0,0000002	0,0000003
	PP Verbrennung	kg	0,0000001	0,0000002
	PVC Verbrennung	kg	0,0000001	0,0000002
	PUR Verbrennung	kg	0,0000001	0,0000001
	Gummi Verbrennung	kg	0,0000000	0,0000001
	Aluminium Recycling	kg	0,0000066	0,0000133
	Stahl Recycling	kg	0,0000029	0,0000076
	Edelmetalle Recycling	kg	0,0000015	0,0000033
	Polymere Recycling	kg		0,0000002
	Aluminium Sekundärrohstoffe	kg	0,0000066	0,0000132
	Stahl Sekundärrohstoffe	kg	0,0000025	0,0000067
Edelmetalle Sekundärrohstoffe	kg	0,0000012	0,0000025	
Polymere Sekundärrohstoffe	kg		0,0000002	

Anhang B12 Gesamtflussinventar zur Bereitstellung der Transportfunktion im hybridelektrischen Flugzeug pro Personenkilometer.

	<b>Gesamtflussinventar</b>		<b>FCEA 2050</b>	<b>FCEA 2050B</b>	<b>FCEA 2050C</b>
	Produktsystem, Modellierungszeitpunkt		eLCI	pLCI EXP <sub>1</sub>	pLCI EXP <sub>2</sub>
	<b>Produkt- und Elementarflüsse</b>	<b>/pkm</b>	<b>Aggregiertes Sachbilanz-Ergebnis</b>		
<b>A – Herstellungsphase</b>	Aluminium Bereitstellung	kg	0,0001433	0,0000839	0,0000636
	Stahl Bereitstellung	kg	0,0000173	0,0000138	0,0000124
	Chrom-Stahl Bereitstellung	kg	0,0000039	0,0000038	0,0000037
	Kupfer Bereitstellung	kg	0,0000791	0,0000403	0,0000273
	Nickel Bereitstellung	kg	0,0000005	0,0000004	0,0000003
	Nickel-Legierung Bereitstellung	kg			
	Titan Bereitstellung	kg	0,0000020	0,0000020	0,0000020
	Kobalt Bereitstellung	kg	0,0000001	0,0000000	0,0000000
	Neodym Bereitstellung	kg	0,0000001	0,0000000	0,0000000
	Lithium Bereitstellung	kg	0,0000336	0,0000168	0,0000112
	Graphit Bereitstellung	kg	0,0000082	0,0000065	0,0000057
	CFK Bereitstellung	kg	0,0000179	0,0000179	0,0000179
	GFK Bereitstellung	kg	0,0000012	0,0000012	0,0000011
	PET Bereitstellung	kg	0,0000119	0,0000066	0,0000048
	PP Bereitstellung	kg	0,0000089	0,0000049	0,0000036
	PVC Bereitstellung	kg	0,0000089	0,0000049	0,0000036
	PUR Bereitstellung	kg	0,0000030	0,0000028	0,0000026
	Gummi Bereitstellung	kg	0,0000002	0,0000002	0,0000002
	Transport Straße	tkm	0,0000125	0,0000125	0,0000125
	Transport Luft	tkm			
Strom Bereitstellung	kWh	0,0000189	0,0000189	0,0000189	
Wärme Bereitstellung	MJ	0,0001827	0,0001827	0,0001827	
Lackierung Bereitstellung	kg	0,0000003	0,0000003	0,0000003	
<b>B – Nutzenphase</b>	Kerosin Bereitstellung	kg			
	Strom Bereitstellung	kWh	0,0295708	0,0295708	0,0295708
	Wasserstoff Bereitstellung	kg	0,0121444	0,0121444	0,0121444
	Kohlendioxid Emission	kg			
	Stickoxide Emission	kg			
	Schwefeloxide Emission	kg			
	Wasser Emission	m <sup>3</sup>			
	Kohlenmonoxid Emission	kg			
	Kohlenwasserstoffe Emission	kg			
<b>C – Entsorgungsphase</b>	Transport Straße	tkm	0,0000003	0,0000001	0,0000000
	Strom Bereitstellung	kWh	0,0001646	0,0003469	0,0004088
	Abfall Deponierung	kg	0,0002721	0,0000753	0,0000157
	Verbundwerkstoffe Verbrennung	kg	0,0000038	0,0000095	0,0000171
	PET Verbrennung	kg	0,0000024	0,0000033	0,0000010
	PP Verbrennung	kg	0,0000018	0,0000025	0,0000007
	PVC Verbrennung	kg	0,0000018	0,0000025	0,0000007
	PUR Verbrennung	kg	0,0000006	0,0000014	0,0000023
	Gummi Verbrennung	kg	0,0000000	0,0000001	0,0000002
	Aluminium Recycling	kg	0,0000287	0,0000503	0,0000604
	Stahl Recycling	kg	0,0000042	0,0000149	0,0000153
	Edelmetalle Recycling	kg	0,0000247	0,0000429	0,0000382
	Polymere Recycling	kg		0,0000033	0,0000084
	Aluminium Sekundärrohstoffe	kg	0,0000284	0,0000499	0,0000599
	Stahl Sekundärrohstoffe	kg	0,0000038	0,0000132	0,0000135
Edelmetalle Sekundärrohstoffe	kg	0,0000189	0,0000328	0,0000292	
Polymere Sekundärrohstoffe	kg		0,0000033	0,0000084	

Anhang B13 Gesamtflussinventar zur Bereitstellung der Transportfunktion im brennstoffzellenelektrischen Flugzeug pro Personenkilometer.

<b>Parameterverzeichnis für prospektive Ökobilanzierung</b>		
<b>Zur Modellierung zukünftiger Verkehrsmittel mittels Parameter-Modifizierung</b>		
<b>HEA 2025</b>	<b>Inventar-Parameter</b>	<b>Qualitative Veränderungstendenz</b>
Durchschnittlicher Energieverbrauch	Energieverbrauchsreduktion	0,61 kg/km Kerosin und 0,02 kWh/km Strom statt 0,87 kg/km Kerosin für eine Flugmission
Materialsubstitutionsmenge	Materialartveränderung	2/3 CFK statt Stahl in Sitzen
Batterieart	Produktartwechsel	Batterie Li-Ion NMC 811 statt Li-Ion NMC 111 in Flugzeugsystemen zum elektrischen Rollen
Herstellungsort	Herstellungsortveränderung	Weiter Flugtransport des elektrischen Antriebs durch Produktion in China
Batterieenergiedichte	Herstellungsinputreduktion	Geringerer Energiebedarf für Li-Ion Batterie
Komponentenmasse	Materialeffizienzerhöhung	Geringerer Materialbedarf für Li-Ion Batterie
Regenerative Energien Anteil	Regenerative Energien Anteilserhöhung	Mehr RE statt 45% RE im zukünftigen Strommix über Flugzeuglebensweg und Li-Ion Batterie Produktion
Fahrzeugverwertungsverteilung	Recyclinginputrateerhöhung	Verdoppeltes Recycling statt 20% Recyclingquote
<b>HEA 2025</b>	<b>Externe Faktoren</b>	<b>Qualitative Veränderungstendenz</b>
P – Politisch	Klimapolitik	Mittlere Ambition Klimazielerreichen
E – Wirtschaftlich	Lieferkettentransport	Wenig Veränderung Globalisierungstrend von weiten, kostspieligen Transportwegen
S – Soziokulturell	Verzicht	Leichte Reduktion Distanz/Wahl Verkehrsmittel/Transporthäufigkeit
T – Technologisch	Allgemeiner technologischer Fortschritt	Moderate Veränderungen zu effizienteren Produkten
	Innovation	Mittlerer Fortschritt für neue oder verbesserte Produkte
E – Ökologisch	Umweltwirkungen Dienstleistungen	Wenig Fortschritt zu ökologisch vorteilhafterem Personentransport
L – Gesetzlich	Klimakonformität	Mittlere Reduktion der THG-Emissionen über den Lebensweg
	Kreislauffähigkeit	Geringe Steigerung der Rezyklierbarkeit

Anhang B14 Inventar-Parameter zur Ausbildung des Zukunftsveränderungsmodells der HEA (oben) und externe Faktoren für die übergeordnete Zukunftsentwicklung (unten).

## Parameterverzeichnis für prospektive Ökobilanzierung

Zur Modellierung zukünftiger Verkehrsmittel mittels Parameter-Modifizierung

FCEA 2050	Inventar-Parameter	Qualitative Veränderungstendenz
Durchschnittlicher Energieverbrauch	Energieverbrauchsreduktion	0,17 kg/km LH <sub>2</sub> und 0,41 kWh/km Strom statt 0,87 kg/km Kerosin für eine Flugmission
Materialsubstitutionsmenge	Materialartveränderung	2/3 CFK statt Stahl in Sitzen
		2/3 CFK statt Aluminium in Tragstruktur
Batterieart	Produktartwechsel	Batterie Li-Ion NMC 811 statt Li-Ion NMC 111 in Flugzeugsystemen zum elektrischen Rollen
		Batterie Li-S statt Li-Ion NMC 111 in elektrischem Antrieb
Herstellungsort	Herstellungsortveränderung	Näherer Straßentransport des elektrischen Antriebs durch Produktion in Deutschland
Batterieenergiedichte	Herstellungsinputreduktion	Geringerer Energiebedarf für Batterie
Komponentenmasse	Materialeffizienzerhöhung	Geringerer Materialbedarf für Batterie
		Geringerer Materialbedarf für E-Motor
Lebensdauer	Lebensdauererhöhung	Geringe/mittlere Steigerung E-Motor
		Mittlere/starke Steigerung Li-Ion
		Starke/sehr starke Steigerung Li-S
		Geringe/mittlere Steigerung Brennstoffzelle
		Leichte/geringe Steigerung LH <sub>2</sub> Tank
Neuer Herstellungspfad	Herstellungspfadverbesserung	Geringerer Materialbedarf für CFK Bereitstellung, zukünftiger Strommix in Markt CFK Bereitstellung
		Leichter/geringerer Energiebedarf für LH <sub>2</sub> Bereitstellung, zukünftiger Strommix in Markt LH <sub>2</sub> Bereitstellung
Regenerative Energien Anteil	Regenerative Energien Anteilserhöhung	Deutlich mehr RE statt 45% RE im Strommix über Flugzeuglebensweg und Antriebsproduktion (E-Motor, Wechselrichter, Schutzschalter, Batterie, Brennstoffzelle, Wärmetauscher)
Fahrzeugverwertungsverteilung	Recyclinginputrateerhöhung	Drei- bis vierfaches Recycling statt 20% Recyclingquote



FCEA 2050	Externe Faktoren	Qualitative Veränderungstendenz
P – Politisch	Klimapolitik	Sehr hohe Ambition Klimazielerreichen
E – Wirtschaftlich	Lieferkettentransport	Mehr Reduktion Globalisierungstrend von weiten, kostspieligen Transportwegen
S – Soziokulturell	Verzicht	Mittlere Reduktion Distanz/Wahl Verkehrsmittel/Transporthäufigkeit
T – Technologisch	Allgemeiner technologischer Fortschritt	Sehr große Veränderungen für Effizienz und längere Lebensdauern
	Innovation	Großer Fortschritt für neue oder verbesserte Produkte
E – Ökologisch	Umweltwirkungen Dienstleistungen	Großer Fortschritt zu ökologisch vorteilhafterem Personentransport
L – Gesetzlich	Klimakonformität	Sehr große Reduktion der THG- Emissionen über den Lebensweg
	Kreislauffähigkeit	Sehr große Steigerung der Rezyklierbarkeit

Anhang B15 Inventar-Parameter zur Ausbildung des Zukunftsveränderungsmodells der FCEA (oben) und externe Faktoren für die übergeordnete Zukunftsentwicklung (unten).

Parameterart	Inventar-Parameter für die Modifizierung 2050 Explorative Zukunftsentwicklung	Ausprägungsmenge	
		CA	FCEA
Advance- Parameter	AP 1 - Energieverbrauchsreduktion	1 Wert	Bereits enthalten
	AP 2 - Materialartveränderung	1 Wert	Bereits enthalten
	AP 3 - Materialartveränderung	1 Wert	Bereits enthalten
	AP 4 - Produktartwechsel	Nicht enthalten	Bereits enthalten
	AP 5 - Produktartwechsel	Nicht enthalten	Bereits enthalten
	AP 6 - Herstellungsortveränderung	Nicht enthalten	Bereits enthalten
Upscaling- Parameter	UP 1 - Herstellungsinputreduktion	Nicht enthalten	1 Wert
	UP 2 - Materialeffizienzerhöhung	Nicht enthalten	1 Wert
	UP 3 - Materialeffizienzerhöhung	Nicht enthalten	1 Wert
	UP 4 - Lebensdauererhöhung	Nicht enthalten	2 Werte
	UP 5 - Lebensdauererhöhung	Nicht enthalten	2 Werte
	UP 6 - Lebensdauererhöhung	Nicht enthalten	2 Werte
	UP 7 - Lebensdauererhöhung	Nicht enthalten	2 Werte
	UP 8 - Lebensdauererhöhung	Nicht enthalten	2 Werte
Overall- Parameter	OP 1 - Herstellungspfadverbesserung	Explorativ: 2 Werte	Explorativ: 2 Werte
	OP 2 - Herstellungspfadverbesserung	Nicht enthalten	Explorativ: 2 Werte
	OP 3 - Regenerative Energien Anteilserhöhung	Explorativ: 2 Werte	Explorativ: 2 Werte
	OP 4 - Recyclinginputrateerhöhung	Explorativ: 2 Werte	Explorativ: 2 Werte

Anhang B16 Einordnung des Modifikationszwecks für Inventar-Parameter der explorativen Zukunftsentwicklung.

<b>Inventar-Parameter für 2050 Entwicklungspfade</b>	<b>Datenmodifikations-technik</b>	<b>Flussmodifikation</b>
AP 1 - Energieverbrauchsreduktion	Näherungswert alternatives Produkt, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Energie für Flugzeugbetrieb
AP 2 - Materialartveränderung	Näherungswert alternatives Produkt, Expertenumfrage	Substitution: Austausch CFK in Flugzeugsitzen
AP 3 - Materialartveränderung	Näherungswert alternatives Produkt, Expertenumfrage	Substitution: Austausch CFK in Strukturbauteilen
AP 4 - Produktartwechsel	-	-
AP 5 - Produktartwechsel	-	-
AP 6 - Herstellungsortveränderung	-	-
UP 1 - Herstellungsinputreduktion	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Energie alle Batterien
UP 2 - Materialeffizienz-erhöhung	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material alle Batterien
UP 3 - Materialeffizienz-erhöhung	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material E-Motor
UP 4 - Lebensdauererhöhung	Expertenannahme, Expertenumfrage	Effizienz: Nutzungsdauer E-Motor
UP 5 - Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenannahme	Effizienz: Nutzungsdauer Li-Ion Batterie
UP 6 - Lebensdauererhöhung	Expertenannahme, Expertenumfrage	Effizienz: Nutzungsdauer Li-S Batterie
UP 7 - Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenumfrage	Effizienz: Nutzungsdauer Brennstoffzelle
UP 8 - Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenumfrage	Effizienz: Nutzungsdauer LH <sub>2</sub> Tank
OP 1 - Herstellungspfadverbesserung	Näherungswert alternatives Produkt, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material CFK Bereitstellung am Markt
OP 2 - Herstellungspfadverbesserung	Literaturannahme, Expertenannahme	Effizienz: Reduktion Energie LH <sub>2</sub> Bereitstellung am Markt
OP 3 - Regenerative Energien Anteilserhöhung	Literaturannahme, Expertenumfrage	Marktanteil/entfernte Produkte /neue Produkte: Reduzierte Bereitsteller fossile Energieträger am Markt, zusätzliche Bereitsteller Wasserstoff am Markt
OP 4 - Recyclinginputrateerhöhung	Literaturannahme, Expertenumfrage	Marktanteil/neue Produkte: Zusätzliche Bereitsteller Sekundärrohstoffe am Markt

Anhang B17 Ausbildung von Entwicklungspfaden für Inventar-Parameter der explorativen Zukunftsentwicklung.

<b>Parameter-Bündel-Liste der FCEA</b>				
<b>Inventar-Kürzel</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter 2023 Referenzzustand</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Umsetzungsmaßnahme</b>
EP 1.1	REF	Energieverbrauchsreduktion	0,17 kg/km LH <sub>2</sub> , 0,41 kWh/km Strom	-33%
EP 2.1	REF	Materialartveränderung	94,5 kg (2/3) Stahl zu CFK (1/5 Kabine)	-2% insg.
EP 3.1	REF	Materialartveränderung	1383,4 kg (4/5) Alu zu CFK (2/5 Struktur)	-23% insg.
EP 4.1	REF	Produktartwechsel	38,5 kg Li-Ion NMC 811 Batterie in Flugsystemen	-
EP 5.1	REF	Produktartwechsel	855 kg Li-S Batterie in elektrischem Antrieb	-
EP 6.1	REF	Herstellungsortveränderung	350 km Straßen-transport	-
UP 1.1	REF	Herstellungsinputreduktion	100% Energiebedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-
UP 2.1	REF	Materialeffizienz-erhöhung	100% Materialbedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-
UP 3.1	REF	Materialeffizienz-erhöhung	100% Materialbedarf E-Motor	-
UP 4.1	REF	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer E-Motor	-
UP 5.1	REF	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer Li-Ion Batterie	-
UP 6.1	REF	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer Li-S Batterie	-
UP 7.1	REF	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer Brennstoffzelle	-
UP 8.1	REF	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer LH <sub>2</sub> Tank	-
OP 1.1	REF	Herstellungspfadverbesserung	100% Materialbedarf CFK-Markt, 45% RE in Strommix	-
OP 2.1	REF	Herstellungspfadverbesserung	100% Energiebedarf LH <sub>2</sub> -Markt, 45% RE in Strommix	-
OP 3.1	REF	Regenerative Energien Anteilserhöhung	45% RE Strommix in Fahrzeug und Antrieb Produktion	-
OP 4.1	REF	Recyclinginputrate-erhöhung	20% Recyclingquote	-
<b>Inventar-Kürzel</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter 2050 Zukunftszustand</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Wert-änderung</b>
UP 1.2	FUT-EXP-BETTER	Herstellungsinputreduktion	100% Energiebedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-17,5%
UP 2.2	FUT-EXP-BETTER	Materialeffizienz-erhöhung	100% Materialbedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-10%
UP 3.2	FUT-EXP-BETTER	Materialeffizienz-erhöhung	100% Materialbedarf E-Motor	-10%

UP 4.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer E-Motor	+30%
UP 5.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer Li-Ion Batterie	+70%
UP 6.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer Li-S Batterie	+100%
UP 7.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer Brennstoffzelle	+25%
UP 8.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer LH <sub>2</sub> Tank	+10%
OP 1.2	FUT-EXP-BETTER	Herstellungspfadverbesserung	100% Materialbedarf CFK-Markt, 45% RE in Strommix	-12,5%, +51%
OP 2.2	FUT-EXP-BETTER	Herstellungspfadverbesserung	100% Energiebedarf LH <sub>2</sub> -Markt, 45% RE in Strommix	-5%, +51%
OP 3.3	FUT-EXP-BETTER	Regenerative Energien Anteilserhöhung	45% RE Strommix in Fahrzeug und Antrieb Produktion	+51%
OP 4.3	FUT-EXP-BETTER	Recyclinginputrateerhöhung	20% Recyclingquote	+45%
<b>Inventar-Kürzel</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter 2050 Zukunftszustand</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Wert-änderung</b>
UP 1.2	FUT-EXP-FASTER	Herstellungsinpuderuktion	100% Energiebedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-17,5%
UP 2.2	FUT-EXP-FASTER	Materialeffizienz-erhöhung	100% Materialbedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-10%
UP 3.2	FUT-EXP-FASTER	Materialeffizienz-erhöhung	100% Materialbedarf E-Motor	-10%
UP 4.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer E-Motor	+65%
UP 5.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer Li-Ion Batterie	+130%
UP 6.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer Li-S Batterie	+200%
UP 7.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer Brennstoffzelle	+40%
UP 8.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	100% Lebensdauer LH <sub>2</sub> Tank	+20%
OP 1.3	FUT-EXP-FASTER	Herstellungspfadverbesserung	100% Materialbedarf CFK-Markt, 45% RE in Strommix	-12,5%, +49%
OP 2.3	FUT-EXP-FASTER	Herstellungspfadverbesserung	100% Energiebedarf LH <sub>2</sub> -Markt, 45% RE in Strommix	-20%, +49%
OP 3.4	FUT-EXP-FASTER	Regenerative Energien Anteilserhöhung	45% RE Strommix in Fahrzeug und Antrieb Produktion	+49%
OP 4.4	FUT-EXP-FASTER	Recyclinginputrateerhöhung	20% Recyclingquote	+70%

Anhang B18 Zuordnung der Inventar-Parameter in der Parameter-Bündel-Liste für alle FCEA Entwicklungspfade.

<b>Parameter-Bündel-Liste des CA</b>				
<b>Inventar-Kürzel</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter 2023 Referenzzustand</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Umsetzungsmaßnahme</b>
AP 1.1	REF	Energieverbrauchsreduktion	0,87 kg/km Kerosin	-
AP 2.1	REF	Materialartveränderung	4919 kg Flugzeuggewicht	-
OP 1.1	REF	Herstellungspfadverbesserung	100% Material CFK-Markt, 45% RE in Strommix	-
OP 3.1	REF	Regenerative Energien Anteilserhöhung	45% RE Strommix in Fahrzeug	-
OP 4.1	REF	Recyclinginputrateerhöhung	20% Recyclingquote	-
<b>Inventar-Kürzel</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter 2025 Zukunftszustand</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Wertänderung</b>
AP 1.2	FUT-PRE-BAU	Energieverbrauchsreduktion	0,87 kg/km Kerosin	-23%
AP 2.2	FUT-PRE-BAU	Materialartveränderung	4919 kg Flugzeuggewicht	-7% (Sitze und Weiteres)
OP 3.2	FUT-PRE-BAU	Regenerative Energien Anteilserhöhung	45% RE Strommix in Fahrzeug	+ 25%
OP 4.2	FUT-PRE-BAU	Recyclinginputrateerhöhung	20% Recyclingquote	+ 22%
<b>Inventar-Kürzel</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter 2050 Zukunftszustand</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Wertänderung</b>
AP 1.3	FUT-EXP-BETTER	Energieverbrauchsreduktion	0,87 kg/km Kerosin	-33%
AP 2.3	FUT-EXP-BETTER	Materialartveränderung	4919 kg Flugzeuggewicht	-25% (Sitze und Struktur)
OP 1.2	FUT-EXP-BETTER	Herstellungspfadverbesserung	100% Material CFK-Markt, 45% RE in Strommix	-12,5%, + 51%
OP 3.3	FUT-EXP-BETTER	Regenerative Energien Anteilserhöhung	45% RE Strommix in Fahrzeug	+ 51%
OP 4.3	FUT-EXP-BETTER	Recyclinginputrateerhöhung	20% Recyclingquote	+ 45%
<b>Inventar-Kürzel</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter 2050 Zukunftszustand</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Wertänderung</b>
AP 1.3	FUT-EXP-FASTER	Energieverbrauchsreduktion	0,87 kg/km Kerosin	-33%
AP 2.3	FUT-EXP-FASTER	Materialartveränderung	4919 kg Flugzeuggewicht	-25% (Sitze und Struktur)
OP 1.3	FUT-EXP-FASTER	Herstellungspfadverbesserung	100% Material CFK-Markt, 45% RE in Strommix	-12,5%, + 49%
OP 3.4	FUT-EXP-FASTER	Regenerative Energien Anteilserhöhung	45% RE Strommix in Fahrzeug	+ 49%
OP 4.4	FUT-EXP-FASTER	Recyclinginputrateerhöhung	20% Recyclingquote	+ 70%

Anhang B19 Zuordnung der Inventar-Parameter in der Parameter-Bündel-Liste für alle CA Entwicklungspfade.





<b>Parametermodifikationsverzeichnis für Ökobilanzierung</b> <b>Zur Modellierung zukunftsgerichteter Verkehrsmittel mittels Parameter-Modifizierung</b> *Konventioneller Transport: Incumbent-Parameter [IP] / Advance-Parameter [AP] / Overall-Parameter [OP] **Transport-Transformationslösung: Emerging-Parameter [EP] / Upscaling-Parameter [UP] / Overall-Parameter [OP]						
FCEA 2050			Referenzzustand			
Inventar-Kürzel <sup>*/**</sup>	Zeit-Kürzel	Inventar-Parameter	Datengenerierungstechnik	Flussumsetzung	Referenzwert	Umsetzungsmaßnahme
EP 1.1	REF	Energieverbrauchsreduktion	Simulation	Effizienz: Reduktion Energie Flugzeugbetrieb	0,17 kg/km LH2, 0,41 kWh/km Strom	-33%
EP 2.1	REF	Materialartveränderung	Geometrische Berechnung	Substitution: Austausch CFK in Flugzeugsitzen	94,5 kg (2/3) Stahl zu CFK (1/5 Kabine)	-2% insg.
EP 3.1	REF	Materialartveränderung	Expertenschätzung	Substitution: Austausch CFK in Strukturbauteilen	1383,4 kg (4/5) Alu zu CFK (2/5 Struktur)	-23% insg.
EP 4.1	REF	Produktartwechsel	Datenbank	Neue Produkte: Zusätzliche Bereitsteller Li-Ion NMC 811	38,5 kg Lithium-Ionen-Batterie NMC 811 in Flugsystemen	-
EP 5.1	REF	Produktartwechsel	Literaturwert	Neue Produkte: Zusätzliche Bereitsteller Li-S	855 kg Lithium-Schwefel-Batterie in elektrischem Antrieb	-
EP 6.1	REF	Herstellungsortveränderung	Eigene Schätzung	Distanz: Antrieb Produktionsortveränderung	350 km Straßen-transport	-
UP 1.1	REF	Herstellungsinpuderduktion	-	-	100% Energiebedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-
UP 2.1	REF	Materialeffizienz-erhöhung	-	-	100% Materialbedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-
UP 3.1	REF	Materialeffizienz-erhöhung	-	-	100% Materialbedarf E-Motor	-
UP 4.1	REF	Lebensdauererhöhung	-	-	100% Lebensdauer E-Motor	-
UP 5.1	REF	Lebensdauererhöhung	-	-	100% Lebensdauer Li-Ion Batterie	-
UP 6.1	REF	Lebensdauererhöhung	-	-	100% Lebensdauer Li-S Batterie	-
UP 7.1	REF	Lebensdauererhöhung	-	-	100% Lebensdauer Brennstoffzelle	-
UP 8.1	REF	Lebensdauererhöhung	-	-	100% Lebensdauer LH2 Tank	-
OP 1.1	REF	Herstellungspfadverbesserung	-	-	100% Materialbedarf CFK-Markt, 45% RE in Strommix	-
OP 2.1	REF	Herstellungspfadverbesserung	-	-	100% Energiebedarf LH2-Markt, 45% RE in Strommix	-
OP 3.1	REF	Regenerative Energien Anteilserhöhung	-	-	45% RE Strommix in Fahrzeug und Antrieb Produktion	-
OP 4.1	REF	Recyclinginputrateerhöhung	-	-	20% Recyclingquote	-
FCEA 2050B			Zukunftszustand - Szenariovariante B			
Inventar-Kürzel <sup>*/**</sup>	Zeit-Kürzel	Inventar-Parameter	Datenmodifikationstechnik	Flussmodifikation	Referenzwert	Wertänderung
UP 1.2	FUT-EXP-BETTER	Herstellungsinpuderduktion	Lernkurve, Expertenfrage	Effizienz: Reduktion Energie alle Batterien	100% Energiebedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-17,5%
UP 2.2	FUT-EXP-BETTER	Materialeffizienz-erhöhung	Lernkurve, Expertenfrage	Effizienz: Reduktion Material alle Batterien	100% Materialbedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-10%
UP 3.2	FUT-EXP-BETTER	Materialeffizienz-erhöhung	Lernkurve, Expertenfrage	Effizienz: Reduktion Material E-Motor	100% Materialbedarf E-Motor	-10%
UP 4.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	Expertenannahme, Expertenfrage	Effizienz: Nutzungsdauer E-Motor	100% Lebensdauer E-Motor	+30%
UP 5.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenannahme	Effizienz: Nutzungsdauer Li-Ion Batterie	100% Lebensdauer Li-Ion Batterie	+70%
UP 6.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	Expertenannahme, Expertenfrage	Effizienz: Nutzungsdauer Li-S Batterie	100% Lebensdauer Li-S Batterie	+100%
UP 7.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenfrage	Effizienz: Nutzungsdauer Brennstoffzelle	100% Lebensdauer Brennstoffzelle	+25%
UP 8.2	FUT-EXP-BETTER	Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenfrage	Effizienz: Nutzungsdauer LH2 Tank	100% Lebensdauer LH2 Tank	+10%
OP 1.2	FUT-EXP-BETTER	Herstellungspfadverbesserung	Näherungswert alternatives Produkt, Expertenfrage	Effizienz: Reduktion Material CFK Bereitstellung am Markt	100% Materialbedarf CFK-Markt, 45% RE in Strommix	-12,5%, +51%

OP 2.2	FUT-EXP-BETTER	Herstellungspfadverbesserung	Literaturannahme, Expertenannahme	Effizienz: Reduktion Energie LH2 Bereitstellung am Markt	100% Energiebedarf LH2-Markt, 45% RE in Strommix	-5%, +51%
OP 3.3	FUT-EXP-BETTER	Regenerative Energien Anteilserhöhung	Literaturannahme, Expertenumfrage	Marktanteil/entfernte /neue Produkte: Reduzierte Bereitsteller fossile Energieträger am Markt, zusätzliche Bereitsteller Wasserstoff am Markt	45% RE Strommix in Fahrzeug und Antrieb Produktion	+51%
OP 4.3	FUT-EXP-BETTER	Recyclinginputrateerhöhung	Literaturannahme, Expertenumfrage	Marktanteil/neue Produkte: Zusätzliche Bereitsteller Sekundärrohstoffe am Markt	20% Recyclingquote	+45%
<b>FCEA 2050C</b>			<b>Zukunftszustand - Szenariovariante C</b>			
<b>Inventar-Kürzel*</b>	<b>Zeit-Kürzel</b>	<b>Inventar-Parameter</b>	<b>Datenmodifikations-technik</b>	<b>Flussmodifikation</b>	<b>Referenzwert</b>	<b>Wertänderung</b>
UP 1.2	FUT-EXP-FASTER	Herstellungsinputreduktion	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Energie alle Batterien	100% Energiebedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-17,5%
UP 2.2	FUT-EXP-FASTER	Materialeffizienz-erhöhung	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material alle Batterien	100% Materialbedarf Li-Ion / Li-S Batterie	-10%
UP 3.2	FUT-EXP-FASTER	Materialeffizienz-erhöhung	Lernkurve, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material E-Motor	100% Materialbedarf E-Motor	-10%
UP 4.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	Expertenannahme, Expertenumfrage	Effizienz: Nutzungsdauer E-Motor	100% Lebensdauer E-Motor	+65%
UP 5.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenannahme	Effizienz: Nutzungsdauer Li-Ion Batterie	100% Lebensdauer Li-Ion Batterie	+130%
UP 6.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	Expertenannahme, Expertenumfrage	Effizienz: Nutzungsdauer Li-S Batterie	100% Lebensdauer Li-S Batterie	+200%
UP 7.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenumfrage	Effizienz: Nutzungsdauer Brennstoffzelle	100% Lebensdauer Brennstoffzelle	+40%
UP 8.3	FUT-EXP-FASTER	Lebensdauererhöhung	Eigene Annahme, Expertenumfrage	Effizienz: Nutzungsdauer LH2 Tank	100% Lebensdauer LH2 Tank	+20%
OP 1.3	FUT-EXP-FASTER	Herstellungspfadverbesserung	Näherungswert alternatives Produkt, Expertenumfrage	Effizienz: Reduktion Material CFK Bereitstellung am Markt	100% Materialbedarf CFK-Markt, 45% RE in Strommix	-12,5%, +49%
OP 2.3	FUT-EXP-FASTER	Herstellungspfadverbesserung	Literaturannahme, Expertenannahme	Effizienz: Reduktion Energie LH2 Bereitstellung am Markt	100% Energiebedarf LH2-Markt, 45% RE in Strommix	-20%, +49%
OP 3.4	FUT-EXP-FASTER	Regenerative Energien Anteilserhöhung	Literaturannahme, Expertenumfrage	Marktanteil/entfernte /neue Produkte: Reduzierte Bereitsteller fossile Energieträger am Markt, zusätzliche Bereitsteller Wasserstoff am Markt	45% RE Strommix in Fahrzeug und Antrieb Produktion	+49%
OP 4.4	FUT-EXP-FASTER	Recyclinginputrateerhöhung	Literaturannahme, Expertenumfrage	Marktanteil/neue Produkte: Zusätzliche Bereitsteller Sekundärrohstoffe am Markt	20% Recyclingquote	+70%
<b>Konstanzcheck</b>			<b>Völlig konsistent</b>	<b>Teilweise konsistent</b>	<b>Nicht konsistent</b>	<b>Keine Aussage möglich</b>
<b>FCEA 2050B</b>			84 x (+)	15 x (O)	0 x (-)	3 x (/)
<b>FCEA 2050C</b>			86 x (+)	13 x (O)	0 x (-)	3 x (/)
<b>Szenariokombination</b>			<b>Szenarioname</b>			
<b>FCEA 2050B</b>			Wind of change (WOC)			
<b>FCEA 2050C</b>			Fast progress (FP)			

Anhang B21 Parametermodifikationsverzeichnis für die Szenarioentwicklungsprozess-Dokumentation der FCEA.

Beitragsanalyse der Umweltwirkungen im Zukunftsszenario Wind of change									
Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
		CA-2050B (WOC)	CO <sub>2</sub> -eq	0,04%	-	0,01%	0,00%	0,43%	0,01%
	NO <sub>x</sub> -eq	0,05%	-	0,01%	0,00%	0,46%	0,01%	0,09%	0,07%
	Cu-eq	13,65%	-	0,28%	0,00%	8,34%	0,21%	5,10%	1,18%
	<b>Gesamt</b> [g/pkm]	<b>B1</b>		<b>B2</b>		<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
	151,77	13,34%		86,06%		0,00%	0,01%	0,05%	-0,09%
	0,308	28,80%		70,57%		0,00%	0,00%	0,07%	-0,14%
	0,049	79,99%		0,00%		0,17%	0,00%	1,52%	-10,45%
Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
		FCEA-2050B (WOC)	CO <sub>2</sub> -eq	-	3,27%	0,03%	0,00%	1,60%	0,03%
	NO <sub>x</sub> -eq	-	4,67%	0,03%	0,00%	1,45%	0,03%	0,34%	0,15%
	Cu-eq	-	6,85%	0,01%	0,00%	0,50%	0,01%	0,64%	0,06%
	<b>Gesamt</b> [g/pkm]	<b>B1</b>		<b>B2</b>		<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
	52,70	94,97%		-		0,04%	0,09%	1,46%	-1,94%
	0,125	94,64%		-		0,04%	0,01%	1,96%	-3,32%
	0,940	97,63%		-		0,03%	0,00%	0,90%	-6,64%

Hellrot: mehr als 1% Beitrag am Gesamtergebnis, Dunkelrot: mehr als 10% Beitrag am Gesamtergebnis

Anhang B22 Signifikante Parameter von CA und FCEA am prozessbezogenen Umweltwirkungsbeitrag im externen Vergleich des Szenarios WOC für die drei Wirkungskategorien im Zukunftszustand.

Beitragsanalyse der Umweltwirkungen im Zukunftsszenario Fast progress									
Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
		CA-2050C (FP)	CO <sub>2</sub> -eq	0,04%	-	0,01%	0,00%	0,44%	0,01%
	NO <sub>x</sub> -eq	0,05%	-	0,01%	0,00%	0,47%	0,01%	0,09%	0,07%
	Cu-eq	14,01%	-	0,29%	0,00%	8,72%	0,22%	5,23%	1,23%
	<b>Gesamt</b> [g/pkm]	<b>B1</b>		<b>B2</b>		<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
	151,76	13,35%		86,06%		0,01%	0,02%	0,07%	-0,14%
	0,308	28,80%		70,58%		0,01%	0,00%	0,10%	-0,21%
	0,048	82,07%		0,00%		0,30%	0,01%	2,18%	-14,26%
Produkt-system	Einheit [in %]	A1	A2	A3	A4	A5	A6	A7	A8
		FCEA-2050C (FP)	CO <sub>2</sub> -eq	-	2,19%	0,03%	0,00%	1,49%	0,03%
	NO <sub>x</sub> -eq	-	3,29%	0,02%	0,00%	1,39%	0,03%	0,30%	0,14%
	Cu-eq	-	5,27%	0,01%	0,00%	0,54%	0,01%	0,58%	0,06%
	<b>Gesamt</b> [g/pkm]	<b>B1</b>		<b>B2</b>		<b>C1</b>	<b>C2</b>	<b>C3</b>	<b>C4</b>
	57,92	96,38%		-		0,06%	0,09%	1,32%	-1,99%
	0,132	96,18%		-		0,05%	0,01%	1,83%	-3,25%
	0,897	99,09%		-		0,04%	0,00%	0,92%	-6,53%

Hellrot: mehr als 1% Beitrag am Gesamtergebnis, Dunkelrot: mehr als 10% Beitrag am Gesamtergebnis

Anhang B23 Signifikante Parameter von CA und FCEA am prozessbezogenen Umweltwirkungsbeitrag im externen Vergleich des Szenarios FP für die drei Wirkungskategorien im Zukunftszustand.

Studienvergleich zur prospektiven Sachbilanz				
pLCI-Studie	Mehrstufiges Vorgehen [Framework Zuordnung]	Methoden-anwendung	Entwickelte Szenarien	Fallstudien-ergebnisse
(Spielmann et al., 2005)	<u>I. Entwicklung Einheitsprozess-szenarien</u> I.1 Wirkungsvariablen Auswahl des Szenarios. [pLCI-I.1, pLCI-I.2] I.2 Strukturelle Analyse. [pLCI-I.3] I.3 Konstruktion Einheitsprozess-szenarien. [pLCI-III.7] I.4 Quantifizierung Einheitsprozess-szenarien. [pLCI-II.5] <u>II. Integration Einheitsprozess-szenario</u> II.5 Auswahl Eckpfeiler-Szenarien. [pLCI-II.6] [Parameterverzeichnis für pLCA] II.6 Quantifizierung Eckpfeiler-Szenarien. [pLCI-III.8]	<u>Inventar-Parameter:</u> Kraftstofftyp, Emissionsminderungstechnologie, Betriebsbedingungen  <u>Externe Faktoren:</u> Umweltaspekte, Kraftstoffpreis, Verkehrspolitik, Mobilitätsstil, Kombinierte Mobilität, Personentransport, Strompreis	Vier Marker-Szenarien und neue Narrativen ohne Status Quo  <i>Worldwide Environmental Regulation</i> [BEST 2020] <i>Individual Satisfaction</i> [WORST 2020] <i>Moderate Environmental Regulation</i> [BETTER 2020] <i>Trend</i> [BAU 2020]	<i>ecoinvent 2000</i> Daten: 2000  Zwölf pLCI-Modelle Bahn  Vergleich FUT: Bahn vs. Bus +15% CO <sub>2</sub> -eq -71% CO <sub>2</sub> -eq 0% NO <sub>x</sub> -eq -86% NO <sub>x</sub> -eq  Vergleich FUT: Bahn vs. Pkw -52% CO <sub>2</sub> -eq -87% CO <sub>2</sub> -eq -48% NO <sub>x</sub> -eq -82% NO <sub>x</sub> -eq
(Mendoza Beltran et al., 2020)	<u>I. Szenario-Generierung</u> (IAM IMAGE Nutzung) [pLCI-II.6] <u>II. Szenario-Auswertung</u> (In Sachbilanz) II.2 Parameter Identifizierung. (Datenbankfilterung zu Flüssen und Prozessen) [pLCI-I.1] II.3 Parameter Anpassung. (Mit IAM Szenarien) [pLCI-II.5] II.4 LCI Kalkulation. (Mit angepasster Sachbilanz) [pLCI-III.8]	<u>Inventar-Parameter:</u> Modifizierung Strommix im ganzen Hintergrundsystem mit Änderung Stromerzeugungstechnologie mittels Effizienz und Marktanteil  <u>Externe Faktoren:</u> Vielfältige aus IAM IMAGE Szenario	Drei Szenarien in acht zeitlichen Zuständen [A/B-2020/30/40/50] zu etablierten Narrativen  [REF ecoinvent] [REF IMAGE] <i>GreenRoad</i> (SSP1) [FUT BETTER] <i>MidRoad</i> (SSP2) [FUT BAU] <i>RegRivalry</i> (SSP3) [FUT WORST]	<i>ReCiPe2008 Midpoint-H</i> Daten: 2012  Je ein e/LCI-Modell, 90 pLCI-Modelle TTS vs. CT  Vergleich REF: 0% CO <sub>2</sub> -eq -5% NMVOC +215% Fe-eq  Vergleich FUT: -7% CO <sub>2</sub> -eq -75% CO <sub>2</sub> -eq -18% NMVOC -29% NMVOC +215% Fe-eq +223% Fe-eq
(Gucurachi et al., 2022)	<u>I. Identifikation von Einflussparametern</u> I.1 PESTEL-Analyse. [pLCI-I.2] I.2 Kausalschleifendiagramm. [pLCI-I.3] I.3 Erstes LCI-Modell. [LCI] [eLCI] <u>II. Erstellung von Sub-Szenarien pro Parameter</u> II.4 Parameter-Sub-Szenarien. [pLCI-II.5] (Sub-Szenarien Umgebungsparameter [externe Faktoren], Sub-Szenarien Technologieparameter [Inventar-Parameter], Hochskalierung [UP], Datenabschätzung [eLCI Datengenerierungstechniken]) <u>III. Erstellung von Szenarien aus Sub-Szenarien</u> III.5 Konsistenzprüfung. [pLCI-III.7] III.6 Szenario-Erstellung. [pLCI-II.6] [pLCI-III.9] <u>IV. Implementierung der Szenarien in LCI-Modell</u> IV.7 Verfeinertes LCI-Modell. [pLCI-III.8] IV.8 Szenario-Daten. (Für Parameter Vordergrund- und Hintergrundsystem) [Parameterverzeichnis für pLCA]			

Anhang B24 Studienvergleich zum mehrstufigen Vorgehen im Szenarioentwicklungsprozess mit dieser Arbeit. (I)

Studienvergleich zur prospektiven Sachbilanz				
pLCI-Studie	Mehrstufiges Vorgehen [Framework Zuordnung]	Methoden-anwendung	Entwickelte Szenarien	Fallstudien-ergebnisse
(Langkau et al., 2023)	<p><u>I. Identifizierung relevanter Inventarparameter und Schlüsselfaktoren</u></p> <p>I.1 Vorläufiges LCI-Modell und Sensitivitätsanalyse. [pLCI-I.1]</p> <p>I.2 PESTEL. [pLCI-I.2]</p> <p>I.3 Kausalschleifen-diagramm. [pLCI-I.3]</p> <p><u>II. Ermittlung zukünftiger Annahmen jedes relevanten Inventarparameters und Schlüsselfaktors [pLCI-II.5]</u></p> <p>II.4 Annahme von Annahmen.</p> <p>II.5 Ableitung von Annahmen.</p> <p>II.6 Unterscheidbarkeits-basierte Annahmen-Auswahl.</p> <p><u>III. Kombination Annahmen zu Zukunftsszenarien [pLCI-III.7]</u></p> <p>III.7 Konsistenzprüfung.</p> <p>III.8 Unterscheidbarkeits-basierte Szenarien-Auswahl.</p>	<p><u>Inventar-Parameter:</u></p> <p>Technologischer Fortschritt BTJ (Biomasse-zu-Kerosin), Technologischer Fortschritt PTJ (Energie-zu-Kerosin), Zukünftiger Strommix, Zukünftige Stroh-versorgung</p> <p><u>Externe Faktoren:</u></p> <p>Klimapolitik, Strohüberschuss</p>	<p>Vier Szenarien ohne Narrativen, ohne Status Quo und ohne imple-mentierte Werte</p> <p><i>General best case</i> [BEST 2050]</p> <p><i>General worst case</i> [WORST 2050]</p> <p><i>Best case for PTJ (vs. BTJ)</i> [BEST PTJ 2050]</p> <p><i>Best case for BTJ (vs. PTJ)</i> [BEST BTJ 2050]</p>	-
Diese Forschungsarbeit	<p><u>I. Selektive Parameter Identifizierung</u></p> <p>I.1 Inventar-Parameter Scannen. [pLCI-I.1]</p> <p>I.2 Externe Faktoren Scannen. [pLCI-I.2]</p> <p>I.3 Sachbilanz Verknüpfung. [pLCI-I.3]</p> <p><u>II. Zukünftige Parameter Erarbeitung</u></p> <p>II.4 Modifikationszweck Auswahl. [pLCI-II.4]</p> <p>II.5 Parameter Veränderung. [pLCI-II.5]</p> <p>II.6 Szenariotyp Zuordnung. [pLCI-II.6]</p> <p><u>III. Zukunftsszenario Bestimmung</u></p> <p>III.7 Zukunftsszenario Kombination. [pLCI-III.7]</p> <p>III.8 Sachbilanzmodell Integration. [pLCI-III.8]</p> <p>III.9 Narrative Kenntlich-machung. [pLCI-III.9]</p>	<p><u>Inventar-Parameter:</u></p> <p>Energieverbrauchsre- duktion, Materialart- veränderung, Produkt- artwechsel, Herstell- ungsortveränderung, Herstellungsinputre- duktion, Materialeffizi- enzerhöhung, Lebens- dauererhöhung, Her- stellungspfadverbesse- rung, Regenerative Energien Anteilserhö- hung, Recyclinginput- rateerhöhung</p> <p><u>Externe Faktoren:</u></p> <p>Klimapolitik, Liefer- kettentransport, Verzicht, Allgemeiner technologischer Fort- schritt, Innovation, Umweltwirkungen Dienstleistungen, Klimakonformität, Kreislauffähigkeit</p>	<p>Drei Szenarien zu abgrenzbaren Narrativen und Status Quo</p> <p>[REF 2023]</p> <p><i>Keep moving forward</i> [FUT BAU 2025]</p> <p><i>Wind of change</i> [FUT BETTER 2050]</p> <p><i>Fast progress</i> [FUT FASTER 2050]</p>	<p><i>ReCiPe2016 Midpoint-H</i> Daten: 2023</p> <p>Ein LCI- Modell, zwei eLCI-Modelle, sechs pLCI- Modelle</p> <p>Vergleich FUT: HEA vs. CA -11% CO<sub>2</sub>-eq -8% NO<sub>x</sub>-eq +7% Cu-eq</p> <p>Vergleich FUT: FCEA vs. CA -62% CO<sub>2</sub>-eq -65% CO<sub>2</sub>-eq -57% NO<sub>x</sub>-eq -60% NO<sub>x</sub>-eq +1763% Cu-eq +1804% Cu-eq</p>

Anhang B25 Studienvergleich zum mehrstufigen Vorgehen im Szenarioentwicklungsprozess mit dieser Arbeit. (II)



---

---

## Literaturverzeichnis

---

- § 2 Absatz 1, Absatz 2, 43. BImSchV (2018). Dreiundvierzigste Verordnung zur Durchführung des Bundes-Immissionsschutzgesetzes, 18-07-2018 (Verordnung über nationale Verpflichtungen zur Reduktion der Emissionen bestimmter Luftschadstoffe vom 18. Juli 2018).
- § 4 Anlage 1-3, KSG (2019). Bundes-Klimaschutzgesetz (KSG) - Gesetz zur Einführung eines Bundes-Klimaschutzgesetzes und zur Änderung weiterer Vorschriften: Bundesanzeiger Verlag, 12-12-2019 (Bundesgesetzblatt Teil I Nr. 48).
- Accardo, A., Dotelli, G., Musa, M. L. & Spessa, E. (2021). Life Cycle Assessment of an NMC Battery for Application to Electric Light-Duty Commercial Vehicles and Comparison with a Sodium-Nickel-Chloride Battery. *Applied Sciences*, 11(3), 1160. <https://doi.org/10.3390/app11031160>
- Adrianto, L. R., van der Hulst, M. K., Tokaya, J. P., Arvidsson, R., Blanco, C. F., Caldeira, C., Guillén-Gonsálbez, G., Sala, S., Steubing, B., Buyle, M., Kaddoura, M., Navarre, N. H., Pedneault, J., Pizzol, M., Salieri, B., van Harmelen, T. & Hauck, M. (2021). How can LCA include prospective elements to assess emerging technologies and system transitions? The 76th LCA Discussion Forum on Life Cycle Assessment, 19 November 2020. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(8), 1541–1544. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01934-w>
- Agora Energiewende. (2024). *Die Energiewende in Deutschland: Stand der Dinge 2023: Rückblick auf die wesentlichen Entwicklungen sowie Ausblick auf 2024*. [www.agora-energiewende.org](http://www.agora-energiewende.org)
- Ajanovic, A., Sayer, M. & Haas, R. (2022). The economics and the environmental benignity of different colors of hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 47(57), 24136–24154. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2022.02.094>
- Arena, M., Azzone, G. & Conte, A. (2013). A streamlined LCA framework to support early decision making in vehicle development. *Journal of Cleaner Production*, 41, 105–113. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.09.031>
- Arvidsson, R., Tillman, A.-M., Sandén, B. A., Janssen, M., Nordelöf, A., Kushnir, D. & Molander, S. (2018). Environmental Assessment of Emerging Technologies: Recommendations for Prospective LCA. *Journal of Industrial Ecology*, 22(6), 1286–1294. <https://doi.org/10.1111/jiec.12690>
- Asmatulu, E., Twomey, J. & Overcash, M. (2013a). Evaluation of recycling efforts of aircraft companies in Wichita. *Resources, Conservation and Recycling*, 80, 36–45. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2013.08.002>
- Ausberg, L., Citroth, A., Feifel, S., Franze, J., Kaltschmitt, M., Klemmayer, I., Meyer, K., Saling, P., Schebek, L., Weinberg, J. & Wulf, C. (2015). Lebenszyklusanalysen. In M. Kaltschmitt & L. Schebek (Hrsg.), *Umweltbewertung für Ingenieure* (S. 203–315). Springer Berlin Heidelberg.

- 
- Barke, A., Thies, C., Melo, S. P., Cerdas, F., Herrmann, C. & Spengler, T. S. (2022a). Comparison of conventional and electric passenger aircraft for short-haul flights – A life cycle sustainability assessment. *Procedia CIRP*, 105, 464–469. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2022.02.077>
- BDI/BCG/Prognos. (2018). *Klimapfade für Deutschland*. Unter Mitarbeit von: Philipp Gerbert, Patrick Herhold, Jens Burchardt, Stefan Schönberger, Florian Rechenmacher, Almut Kirchner, Andreas Kemmler, Marco Wünsch. <https://www.prognos.com/de/projekt/klimapfade-fuer-deutschland>
- Bergerson, J. A., Brandt, A., Cresko, J., Carbajales-Dale, M., MacLean, H. L., Matthews, H. S., McCoy, S., McManus, M., Miller, S. A., Morrow, W. R., Posen, I. D., Seager, T., Skone, T. & Sleep, S. (2020). Life cycle assessment of emerging technologies: Evaluation techniques at different stages of market and technical maturity. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 11–25. <https://doi.org/10.1111/jiec.12954>
- Bishop, P., Hines, A. & Collins, T. (2007). The current state of scenario development: an overview of techniques. *Foresight*, 9(1), 5–25. <https://doi.org/10.1108/14636680710727516>
- Bisinella, V., Christensen, T. H. & Astrup, T. F. (2021). Future scenarios and life cycle assessment: systematic review and recommendations. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(11), 2143–2170. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01954-6>
- Blas, I. de, Mediavilla, M., Capellán-Pérez, I. & Duce, C. (2020). The limits of transport decarbonization under the current growth paradigm. *Energy Strategy Reviews*, 32, 100543. <https://doi.org/10.1016/j.esr.2020.100543>
- Blat Belmonte, B., Esser, A., Weyand, S., Franke, G., Schebek, L. & Rinderknecht, S. (2020). Identification of the Optimal Passenger Car Vehicle Fleet Transition for Mitigating the Cumulative Life-Cycle Greenhouse Gas Emissions until 2050. *Vehicles*, 2(1), 75–99. <https://doi.org/10.3390/vehicles2010005>
- BMU. (2020). *Klimaschutz in Zahlen: Fakten, Trends und Impulse deutscher Klimapolitik*. Ausgabe 2020. Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (BMU). [www.bmu.de/publikationen](http://www.bmu.de/publikationen)
- Börjeson, L., Höjer, M., Dreborg, K.-H., Ekvall, T. & Finnveden, G. (2006). Scenario types and techniques: Towards a user's guide. *Futures*, 38(7), 723–739. <https://doi.org/10.1016/j.futures.2005.12.002>
- Brelje, B. J. & Martins, J. R. (2019). Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: A review of concepts, models, and design approaches. *Progress in Aerospace Sciences*, 104, 1–19. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.06.004>
- Die Bundesregierung. (2021). *Deutsche Nachhaltigkeitsstrategie: Weiterentwicklung 2021*. Bundesregierung. [www.bundesregierung.de/publikationen](http://www.bundesregierung.de/publikationen)
- Byule, Audenaert, Billen, Boonen & van Passel (2019). The Future of Ex-Ante LCA? Lessons Learned and Practical Recommendations. *Sustainability*, 11(19), 5456. <https://doi.org/10.3390/su11195456>

- Cerdas, F., Egede, P. & Herrmann, C. (2017). LCA of Electromobility. In M. Z. Hauschild, R. K. Rosenbaum & S. I. Olsen (Hrsg.), *Life cycle assessment: Theory and practice* (S. 669–693). SPRINGER. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-319-56475-3_27)
- Chester, M. V. & Horvath, A. (2009). Environmental assessment of passenger transportation should include infrastructure and supply chains. *Environmental Research Letters*, 4(2), 24008. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/4/2/024008>
- Ciroth, A., Muller, S. & Weidema, B. (2012). *Refining the pedigree matrix approach in ecoinvent: Version 7.1*. GreenDelta. <https://lca-net.com/publications/show/refining-pedigree-matrix-approach-ecoinvent/>
- Ciroth, A., Muller, S., Weidema, B. & Lesage, P. (2016). Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1338–1348. <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0670-5>
- Cox, B., Bauer, C., Mendoza Beltran, A., van Vuuren, D. P. & Mutel, C. L. (2020). Life cycle environmental and cost comparison of current and future passenger cars under different energy scenarios. *Applied Energy*, 269, 115021. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.115021>
- Cox, B., Jemiolo, W. & Mutel, C. (2018b). Life cycle assessment of air transportation and the Swiss commercial air transport fleet. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, 1–13. <https://doi.org/10.1016/j.trd.2017.10.017>
- Cox, B., Mutel, C. L., Bauer, C., Mendoza Beltran, A. & van Vuuren, D. P. (2018a). Uncertain Environmental Footprint of Current and Future Battery Electric Vehicles. *Environmental science & technology*, 52(8), 4989–4995. <https://doi.org/10.1021/acs.est.8b00261>
- Cucurachi, S., Steubing, B., Siebler, F., Navarre, N., Caldeira, C. & Sala, S. (2022). *Prospective LCA methodology for Novel and Emerging Technologies for BIO-based products: The PLANET BIO project* (JRC129632). Publications Office of the European Union.
- Destatis. (2020). *Umweltökonomische Gesamtrechnungen: Aufkommen und Verwendung in Rohstoffäquivalenten*. Berichtszeitraum 2000 bis 2016. Statistisches Bundesamt. <https://www.destatis.de/DE/Themen/Gesellschaft-Umwelt/Umwelt/UGR/rohstoffe-materialfluesse-wasser/Publicationen/Downloads/rohstoffaequivalente-5853101169004.html> [https://doi.org/10.1007/978-3-642-53729-5\\_13](https://doi.org/10.1007/978-3-642-53729-5_13)
- Dieckhoff, C., Appelrath, H.-J., Fishedick, M., Grunwald, A. & Höffler, F. (2014). *Zur Interpretation von Energieszenarien* (Stand: Mai 2014). *Schriftenreihe Energiesysteme der Zukunft*. acatech - Deutsche Akademie der Technikwissenschaften.
- Dillman, K. J., Árnadóttir, Á., Heinonen, J., Czepkiewicz, M. & Davíðsdóttir, B. (2020). Review and Meta-Analysis of EVs: Embodied Emissions and Environmental Breakeven. *Sustainability*, 12(22), 9390. <https://doi.org/10.3390/su12229390>
- DIN 9020-1 (1983). *DIN 9020-1:1983: Luft- und Raumfahrt. Masseaufteilung für Luftfahrzeuge schwerer als Luft. Massehauptgruppen und Massebegriffe. Übersicht*. Beuth Verlag. <https://www.beuth.de/de/norm/din-9020-1/1063112>

- DIN 9020-2 (1983). *DIN 9020-2:1983: Luft- und Raumfahrt. Masseaufteilung für Luftfahrzeuge schwerer als Luft. Massehauptgruppen und Massebegriffe. Definitionen.* Beuth Verlag. <https://www.beuth.de/de/norm/din-9020-2/1063153>
- DIN 9020-5 (1992). *DIN 9020-5:1992: Luft- und Raumfahrt. Masseaufteilung für Luftfahrzeuge schwerer als Luft. Maß- und Bauangaben.* Beuth Verlag. <https://www.beuth.de/de/norm/din-9020-5/1812671>
- DIN EN ISO 14040 (11.2009). *DIN EN ISO 14040:2009-11: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006.*
- DIN EN ISO 14044 (10.2006). *DIN EN ISO 14044:2006-10: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006.*
- Dirnaichner, A., Rottoli, M., Sacchi, R., Rauner, S., Cox, B., Mutel, C., Bauer, C. & Luderer, G. (2022). Life-cycle impacts from different decarbonization pathways for the European car fleet. *Environmental Research Letters*, 17(4), 44009. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ac4fdb>
- Dolganova, I., Rödl, A., Bach, V., Kaltschmitt, M. & Finkbeiner, M. (2020). A Review of Life Cycle Assessment Studies of Electric Vehicles with a Focus on Resource Use. *Resources*, 9(3), 32. <https://doi.org/10.3390/resources9030032>
- EMEP/EEA. (2019). *Aviation emissions calculator* [Excel]. European Environment Agency. <https://www.eea.europa.eu/publications/emep-eea-guidebook-2019>
- Engels, J. I., Frank, S., Gurevych, I., Heßler, M., Knodt, M., Monstadt, J., Nordmann, A., Oetting, A., Rudolph-Cleff, A., Rüppel, U., Schenk, G. J. & Steinke, F. (2021). *Transformation, Zirkulation, System of Systems: Für ein dynamisches Verständnis netzgebundener Infrastrukturen.* <https://doi.org/10.26083/TUPRINTS-00017923>
- EU COM. (2011). *Flightpath 2050. Europe's vision for aviation; maintaining global leadership and serving society's needs; report of the High-Level Group on Aviation Research.*
- EU COM. (2020). *Study on the EU's list of critical raw materials: Final report (2020).* Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2873/11619>
- Fancourt, M. (2016). *Scenario development: A review of approaches.* United Nations Environment Programme. UNEP. [https://www2.unep-wcmc.org/system/comfy/cms/files/files/000/000/803/original/Scenario\\_Development\\_2016\\_WEB.pdf](https://www2.unep-wcmc.org/system/comfy/cms/files/files/000/000/803/original/Scenario_Development_2016_WEB.pdf)
- fFe. (2020). *LCIA Environmental Indicators for the Construction and End-of-Life of Electrolysers: (Germany)* [Project BEniVer]. <https://opendata.ffe.de/dataset/lcia-environmental-indicators-for-the-construction-and-end-of-life-of-electrolysers-germany/>
- Fishman, T., Heeren, N., Pauliuk, S., Berrill, P., Tu, Q., Wolfram, P. & Hertwich, E. G. (2021). A comprehensive set of global scenarios of housing, mobility, and material

- efficiency for material cycles and energy systems modeling. *Journal of Industrial Ecology*, 25(2), 305–320. <https://doi.org/10.1111/jiec.13122>
- Fraunhofer ISE. (2022). *Energy-Charts: Öffentliche Nettostromerzeugung in Deutschland 2022*. [https://www.energy-charts.info/charts/energy\\_pie/chart.htm?l=de&c=DE&year=2022&interval=year](https://www.energy-charts.info/charts/energy_pie/chart.htm?l=de&c=DE&year=2022&interval=year)
- Gasafi, E. & Weil, M. (2011). Approach and application of life cycle screening in early phases of process design: case study of supercritical water gasification. *Journal of Cleaner Production*, 19(14), 1590–1600. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2011.05.021>
- Gibon, T., Wood, R., Arvesen, A., Bergesen, J. D., Suh, S. & Hertwich, E. G. (2015). A Methodology for Integrated, Multiregional Life Cycle Assessment Scenarios under Large-Scale Technological Change. *Environmental science & technology*, 49(18), 11218–11226. <https://doi.org/10.1021/acs.est.5b01558>
- Gnadt, A. R., Speth, R. L., Sabnis, J. S. & Barrett, S. R. (2019). Technical and environmental assessment of all-electric 180-passenger commercial aircraft. *Progress in Aerospace Sciences*, 105, 1–30. <https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2018.11.002>
- GOV.UK. (2022). *GHG Conversion Factors for Company Reporting* [Excel]. UK Government. <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2022>
- Gustavsson, M., Hacker, F. & Helms, H. (2019). *Overview of ERS and complementary technologies: COLLERS*. <https://www.electricroads.org/report-overview-of-ers-concepts-and-complementary-technologies/>
- Hanesch, S. (2024a). *Editierbares Parameterverzeichnis*. Excel-Datei. Technische Universität Darmstadt. <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1349>
- Hanesch, S. (2024b). *GNOSIS Flugzeugmodelle*. Excel-Datei. Technische Universität Darmstadt. <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1350>
- Hanesch, S. & Schebek, L. (2023). *Ökobilanz-Bericht für den Flugzeugvorentwurf von Flugtransportalternativen eines 19-Sitzer Kleinflugzeugs*. Im Projekt GNOSIS. Technische Universität Darmstadt. <https://doi.org/10.48328/tudatalib-1244.2>
- Hanesch, S., Schöpp, F., Göllner-Völker, L. & Schebek, L. (2022). Life Cycle Assessment of an emerging overhead line hybrid truck in short-haul pilot operation. *Journal of Cleaner Production*, 338, 130600. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2022.130600>
- Harpprecht, C., Oers, L., Northey, S. A., Yang, Y. & Steubing, B. (2021). Environmental impacts of key metals' supply and low-carbon technologies are likely to decrease in the future. *Journal of Industrial Ecology*, 25(6), 1543–1559. <https://doi.org/10.1111/jiec.13181>
- Hawker Beechcraft. (2008a). *Other International Inbound Shipping to U.S. – Routing Guide*.
- Hawker Beechcraft. (2008b). *Domestic Inbound within North America – Routing Guide*.
- Hetherington, A. C., Borrion, A. L., Griffiths, O. G. & McManus, M. C. (2014). Use of LCA as a development tool within early research: challenges and issues across different



- sectors. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(1), 130–143.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-013-0627-8>
- Hill, N., Amaral, S., Morgan-Price, S., Nokes, T., Bates, J., Helms, H., Fehrenbach, H., Biemann, K., Abdalla, N., Jöhrens, J., Cotton, E., German, L., Harris, A., Haye, S., Sim, C. & Bauen, A. (2020). *Determining the environmental impacts of conventional and alternatively fuelled vehicles through LCA*. Ricardo Energy & Environment.
- Hofmann, K. M., Hanesch, S., Levin-Keitel, M., Krummheuer, F., Serbser, W. H., Teille, K. & Wust, C. (2021). Kapitel 1 Auswirkungen von Digitalisierung auf persönliche Mobilität und vernetzte Räume – Zusammenfassende Betrachtung der Unseens digitaler Mobilität. In R. W. Scholz, M. Beckedahl, S. Noller & O. Renn (Hrsg.), *DiDaT Weißbuch: Verantwortungsvoller Umgang mit digitalen Daten – Orientierungen eines transdisziplinären Prozesses* (S. 69–96). Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG. <https://doi.org/10.5771/9783748924111-01>
- Höjer, M., Ahlroth, S., Dreborg, K.-H., Ekvall, T., Finnveden, G., Hjelm, O., Hochschorner, E., Nilsson, M. & Palm, V. (2008). Scenarios in selected tools for environmental systems analysis. *Journal of Cleaner Production*, 16(18), 1958–1970.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2008.01.008>
- Huijbregts, M. A. J., Steinmann, Z. J. N., Elshout, P. M. F., Stam, G., Verones, F., Vieira, M., Zijp, M., Hollander, A. & van Zelm, R. (2017). ReCiPe2016: A harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(2), 138–147. <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>
- Hung, C. R., Ellingsen, L. A.-W. & Majeau-Bettez, G. (2020). LiSET: A Framework for Early-Stage Life Cycle Screening of Emerging Technologies. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 26–37. <https://doi.org/10.1111/jiec.12807>
- INFRAS. (2022). *Handbuch für Emissionsfaktoren des Strassenverkehrs* [Software]. Bundesamt für Umwelt BAFU (CH), Umweltbundesamt UBA (DE), Umweltbundesamt UBA (AT), Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie ADEME (FR), Trafikverket (SE), Miljødirektoratet (NO).  
<https://www.hbefa.net/d/index.html>
- IPCC. (2013). *Climate change 2013: The physical science basis: Working Group I contribution to the Fifth assessment report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press.
- IPCC. (2018). *Global Warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on the impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, sustainable development, and efforts to eradicate poverty*. IPCC.  
<https://doi.org/10.1017/9781009157940.007>
- IPCC. (2019). *2019 Refinement to the 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Volume 2: Energy. Chapter 1: Introduction*.
- IPCC. (2021). *Climate Change 2021 - The Physical Science Basis: Sixth Assessment Report (AR6)*. Summary for Policymakers. IPCC.



- IRP. (2019). *Global Resources Outlook 2019: Natural resources for the future we want*. International Resource Panel. United Nations Environment Programme.
- Jayme, D. B. (2019). *Evaluation of the Hybrid-Electric Aircraft Project Airbus E-Fan X* [Masterthesis]. HAW Hamburg.
- Johanning, A. (2016). *Life Cycle Assessment in Conceptual Aircraft Design*. Excel-Datei. <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.1531.0485>
- Johanning, A. (2017). *Methodik zur Ökobilanzierung im Flugzeugvorentwurf* [Dissertation, Verlag Dr. Hut]. GBV Gemeinsamer Bibliotheksverbund.
- Joyce, P. J. & Björklund, A. (2022). Futura: A new tool for transparent and shareable scenario analysis in prospective life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 26(1), 134–144. <https://doi.org/10.1111/jiec.13115>
- JRC/EC. (2011). *ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context*. Publications Office of the European Union.
- Klöppfer, W. & Grahl, B. (2014). *Life Cycle Assessment (LCA): A Guide to Best Practice*. Wiley-VCH.
- Koroma, M. S., Brown, N., Cardellini, G. & Messagie, M. (2020). Prospective Environmental Impacts of Passenger Cars under Different Energy and Steel Production Scenarios. *Energies*, 13(23), 6236. <https://doi.org/10.3390/en13236236>
- Kosow, H. & Gaßner, R. (2008). *Methoden der Zukunfts- und Szenarioanalyse: Überblick, Bewertung und Auswahlkriterien*. Werkstattbericht / IZT, Institut für Zukunftsstudien und Technologiebewertung: Bd. 103. IZT.
- Kreyenberg, D. (2016). *Fahrzeugantriebe für die Elektromobilität*. Springer Fachmedien Wiesbaden. <https://doi.org/10.1007/978-3-658-14284-1>
- Langkau, S., Steubing, B., Mutel, C., Ajie, M. P., Erdmann, L., Voglhuber-Slavinsky, A. & Janssen, M. (2023). A stepwise approach for Scenario-based Inventory Modelling for Prospective LCA (SIMPL). *The International Journal of Life Cycle Assessment*. <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02175-9>
- Liu, Z., Ciais, P., Deng, Z., Lei, R., Davis, S. J., Feng, S., Zheng, B., Cui, D., Dou, X., Zhu, B., Guo, R., Ke, P., Sun, T., Lu, C., He, P., Wang, Y., Yue, X., Wang, Y., Lei, Y., . . . Schellnhuber, H. J. (2020). *Near-real-time monitoring of global CO2 emissions reveals the effects of the COVID-19 pandemic* (Nr. 1). <http://arxiv.org/pdf/2004.13614.pdf> <https://doi.org/10.1038/s41467-020-18922-7>
- Meinert, S. (2014). *Leitfaden Szenarioentwicklung*. European Trade Union Institute.
- Mendoza Beltran, A., Cox, B., Mutel, C., Vuuren, D. P., Font Vivanco, D., Deetman, S., Edelenbosch, O. Y., Guinée, J. & Tukker, A. (2020). When the Background Matters: Using Scenarios from Integrated Assessment Models in Prospective Life Cycle Assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 64–79. <https://doi.org/10.1111/jiec.12825>

- Milà i Canals, L., Azapagic, A., Doka, G., Jefferies, D., King, H., Mutel, C., Nemecek, T., Roches, A., Sim, S., Stichnothe, H., Thoma, G. & Williams, A. (2011). Approaches for Addressing Life Cycle Assessment Data Gaps for Bio-based Products. *Journal of Industrial Ecology*, 15(5), 707–725. <https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2011.00369.x>
- Moni, S. M., Mahmud, R., High, K. & Carbajales-Dale, M. (2020). Life cycle assessment of emerging technologies: A review. *Journal of Industrial Ecology*, 24(1), 52–63. <https://doi.org/10.1111/jiec.12965>
- Mouritz, A. (2012). *Introduction to Aerospace Materials*. Woodhead Publishing in materials. Elsevier Science. <https://ebookcentral.proquest.com/lib/kxp/detail.action?docID=1584625>
- NASA. (2012). *Technology Readiness Level*. [https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology\\_readiness\\_level](https://www.nasa.gov/directorates/heo/scan/engineering/technology/technology_readiness_level)
- Nicolay, S., Karpuk, S., Liu, Y. & Elham, A. (2021). Conceptual design and optimization of a general aviation aircraft with fuel cells and hydrogen. *International Journal of Hydrogen Energy*, 46(64), 32676–32694. <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2021.07.127>
- Nielsen, P. & Wenzel, H. (2002). Integration of environmental aspects in product development: a stepwise procedure based on quantitative life cycle assessment. *Journal of Cleaner Production*, 10(3), 247–257. [https://doi.org/10.1016/S0959-6526\(01\)00038-5](https://doi.org/10.1016/S0959-6526(01)00038-5)
- Nordelöf, A., Messagie, M., Tillman, A.-M., Ljunggren Söderman, M. & van Mierlo, J. (2014). Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles—what can we learn from life cycle assessment? *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 19(11), 1866–1890. <https://doi.org/10.1007/s11367-014-0788-0>
- Parodi, O. (2021). Zum Verhältnis von Technik, Technikfolgenabschätzung und Transformation. In R. Lindner, M. Decker, E. Ehrensperger, N. B. Heyen, S. Lingner, C. Scherz & M. Sotoudeh (Hrsg.), *Gesellschaft – Technik – Umwelt. Neue Folge: Bd. 22. Gesellschaftliche Transformationen: Gegenstand oder Aufgabe der Technikfolgenabschätzung?* (1. Auflage, S. 19–36). Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG. <https://doi.org/10.5771/9783748901556-19>
- Parvatker, A. G. & Eckelman, M. J. (2019). Comparative Evaluation of Chemical Life Cycle Inventory Generation Methods and Implications for Life Cycle Assessment Results. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 7(1), 350–367. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.8b03656>
- Pesonen, H.-L., Ekvall, T., Fleischer, G., Huppel, G., Jahn, C., Klos, Z. S., Rebitzer, G., Sonnemann, G. W., Tintinelli, A., Weidema, B. P. & Wenzel, H. (2000). Framework for scenario development in LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 5(1). <https://doi.org/10.1007/BF02978555>
- Pipistrel. (2017). *Pipistrel ALPHA ELECTRO Information Pack: Aircraft information*.

- Pizzol, M., Sacchi, R., Köhler, S. & Anderson Erjavec, A. (2021). Non-linearity in the Life Cycle Assessment of Scalable and Emerging Technologies. *Frontiers in Sustainability*, 1, Artikel 611593. <https://doi.org/10.3389/frsus.2020.611593>
- Ploetner, K. O., Miltner, L., Jochem, P., Kuhn, H. & Hornung, M. (2016). Environmental life cycle assessment of universally-electric powered transport aircraft: Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress 2016. *Braunschweig*.
- Ratheon Aircraft. (2000). *Section III Systems Description Beech 1900D Airliner*. [https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiSyKrL6\\_z8AhWY87sIHRwtDiEQFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.smartcockpit.com%2Fdocs%2FRaytheon\\_Beechcraft\\_1\\_00D-SYSTEMS\\_DESCRIPTION.pdf&usg=AOvVaw1WwaG-aypQITagU57FKD2T](https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUKEwiSyKrL6_z8AhWY87sIHRwtDiEQFnoECA0QAQ&url=https%3A%2F%2Fwww.smartcockpit.com%2Fdocs%2FRaytheon_Beechcraft_1_00D-SYSTEMS_DESCRIPTION.pdf&usg=AOvVaw1WwaG-aypQITagU57FKD2T)
- Ribeiro, J., Afonso, F., Ribeiro, I., Ferreira, B., Policarpo, H., Peças, P. & Lau, F. (2020). Environmental assessment of hybrid-electric propulsion in conceptual aircraft design. *Journal of Cleaner Production*, 247, 119477. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.119477>
- Rotolo, D., Hicks, D. & Martin, B. R. (2015). What is an emerging technology? *Research Policy*, 44(10), 1827–1843. <https://doi.org/10.1016/j.respol.2015.06.006>
- Rottoli, M., Dirnaichner, A., Kyle, P., Baumstark, L., Pietzcker, R. & Luderer, G. (2021). Coupling a Detailed Transport Model to the Integrated Assessment Model REMIND. *Environmental Modeling & Assessment*, 26(6), 891–909. <https://doi.org/10.1007/s10666-021-09760-y>
- Rounsevell, M. D. A. & Metzger, M. J. (2010). Developing qualitative scenario storylines for environmental change assessment. *WIREs Climate Change*, 1(4), 606–619. <https://doi.org/10.1002/wcc.63>
- Rüdisüli, M., Bach, C., Bauer, C., Beloin-Saint-Pierre, D., Elber, U., Georges, G., Limpach, R., Pareschi, G., Kannan, R. & Teske, S. L. (2022). Prospective life-cycle assessment of greenhouse gas emissions of electricity-based mobility options. *Applied Energy*, 306, 118065. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2021.118065>
- Sacchi, R., Bauer, C., Cox, B. & Mutel, C. (2022a). When, where and how can the electrification of passenger cars reduce greenhouse gas emissions? *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 162, 112475. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112475>
- Sacchi, R., Terlouw, T., Siala, K., Dirnaichner, A., Bauer, C., Cox, B., Mutel, C., Daioglou, V. & Luderer, G. (2022b). PROspective EnvironMental Impact asSEment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 160, 112311. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112311>
- Sacchi, R. & Bauer, C. (2023). *mobitool: v3.0*. Excel-Datei. Paul Scherrer Institut. <https://www.mobitool.ch/de/tools/mobitool-faktoren-v3-0-25.html?tag=5>
- Sacchi, R., Bauer, C. & Cox, B. L. (2021). Does Size Matter? The Influence of Size, Load Factor, Range Autonomy, and Application Type on the Life Cycle Assessment of

- Current and Future Medium- and Heavy-Duty Vehicles. *Environmental science & technology*, 55(8), 5224–5235. <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c07773>
- Schebek, L., Hanesch, S., Fischer, E., Tiffe, J., Wust, C. & Hofmann, K. M. (2021). 1.4 Ressourcenverbrauch und Digitalisierung. In R. W. Scholz, E. Albrecht, D. Marx, M. Mißler-Behr, O. Renn & V. van Zyl-Bulitta (Hrsg.), *Supplementarische Informationen zum DiDaT Weißbuch: Orientierungen Verantwortungsvoller Umgang mit Daten — Orientierungen eines transdisziplinären Prozesses* (S. 34–44). Nomos Verlagsgesellschaft mbH & Co. KG. <https://doi.org/10.5771/9783748912125-S11-4>
- Scholz, A. E., Trifonov, D. & Hornung, M. (2022). Environmental life cycle assessment and operating cost analysis of a conceptual battery hybrid-electric transport aircraft. *CEAS Aeronautical Journal*, 13(1), 215–235. <https://doi.org/10.1007/s13272-021-00556-0>
- Schröder, J. & Naumann, K. (2022). *Monitoring erneuerbarer Energien im Verkehr*. DBFZ Deutsches Biomasseforschungszentrum gemeinnützige GmbH. <https://doi.org/10.48480/19NZ-0322>
- Simonis, G. (Hrsg.). (2017). *UTB Politikwissenschaft: Bd. 8672. Handbuch globale Klimapolitik*. Ferdinand Schöningh.
- Spielmann, M., Scholz, R., Tietje, O. & Haan, P. de (2005). Scenario Modelling in Prospective LCA of Transport Systems. Application of Formative Scenario Analysis (11 pp). *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 10(5), 325–335. <https://doi.org/10.1065/lca2004.10.188>
- Steubing, B. & Koning, D. de (2021). Making the use of scenarios in LCA easier: the superstructure approach. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 26(11), 2248–2262. <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01974-2>
- Strathoff, P., Zumegen, C., Stumpf, E., Klumpp, C., Jeschke, P., Warner, K. L., Gelleschus, R., Bocklisch, T., Portner, B., Moser, L. & Hornung, M. (2022). On the Design and Sustainability of Commuter Aircraft with Electrified Propulsion Systems. In *AIAA AVIATION 2022 Forum*. American Institute of Aeronautics and Astronautics. <https://doi.org/10.2514/6.2022-3738>
- Textron Aviation. (2019). *Illustrated Parts Catalog: Model 1900D Airliner* [Technical Publications]. <https://ww2.txtav.com/TechnicalPublications/Downloads/Book?PN=129-590000-11>
- Thomassen, G., van Dael, M., van Passel, S. & You, F. (2019). How to assess the potential of emerging green technologies? Towards a prospective environmental and techno-economic assessment framework. *Green Chemistry*, 21(18), 4868–4886. <https://doi.org/10.1039/C9GC02223F>
- Thonemann, N. & Schulte, A. (2019). From Laboratory to Industrial Scale: A Prospective LCA for Electrochemical Reduction of CO<sub>2</sub> to Formic Acid. *Environmental science & technology*, 53(21), 12320–12329. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b02944>
- Thonemann, N., Schulte, A. & Maga, D. (2020). How to Conduct Prospective Life Cycle Assessment for Emerging Technologies? A Systematic Review and Methodological Guidance. *Sustainability*, 12(3), 1192. <https://doi.org/10.3390/su12031192>

- 
- UBA. (2019). *Nationale Trendtabellen für die deutsche Berichterstattung atmosphärischer Emissionen 1990 - 2018*. Umweltbundesamt.  
<https://www.umweltbundesamt.de/themen/luft/emissionen-von-luftschadstoffen>
- UBA. (2020). *Ökologische Bewertung von Verkehrsarten: Abschlussbericht*. Ressortforschungsplan des Bundesministerium für Umwelt, Naturschutz und nukleare Sicherheit (156/2020). Umweltbundesamt.  
<http://www.umweltbundesamt.de/publikationen>
- UNEP. (2011). *Recycling Rates of Metals – A Status Report: A Report of the Working Group on Global Metal Flows to the International Resource Panel*.  
<https://www.resourcepanel.org/reports/recycling-rates-metals>
- UNEP. (2020). *Emissions gap report 2020*. United Nations Environment Programme.  
<https://www.unep.org/emissions-gap-report-2020>
- United Nations (2015). Paris Agreement.  
[https://unfccc.int/sites/default/files/english\\_paris\\_agreement.pdf](https://unfccc.int/sites/default/files/english_paris_agreement.pdf)
- van der Giesen, C., Cucurachi, S., Guinée, J., Kramer, G. J. & Tukker, A. (2020). A critical view on the current application of LCA for new technologies and recommendations for improved practice. *Journal of Cleaner Production*, 259, 120904.  
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.120904>
- van Notten, P. W., Rotmans, J., van Asselt, M. B. & Rothman, D. S. (2003). An updated scenario typology. *Futures*, 35(5), 423–443. [https://doi.org/10.1016/S0016-3287\(02\)00090-3](https://doi.org/10.1016/S0016-3287(02)00090-3)
- Vandepaer, L., Panos, E., Bauer, C. & Amor, B. (2020). Energy System Pathways with Low Environmental Impacts and Limited Costs: Minimizing Climate Change Impacts Produces Environmental Cobenefits and Challenges in Toxicity and Metal Depletion Categories. *Environmental science & technology*, 54(8), 5081–5092.  
<https://doi.org/10.1021/acs.est.9b06484>
- Villares, M., Işildar, A., Mendoza Beltran, A. & Guinee, J. (2016). Applying an ex-ante life cycle perspective to metal recovery from e-waste using bioleaching. *Journal of Cleaner Production*, 129, 315–328. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.04.066>
- Villares, M., Işildar, A., van der Giesen, C. & Guinée, J. (2017). Does ex ante application enhance the usefulness of LCA? A case study on an emerging technology for metal recovery from e-waste. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 22(10), 1618–1633. <https://doi.org/10.1007/s11367-017-1270-6>
- WBGU. (2011). *Welt im Wandel: Gesellschaftsvertrag für eine Große Transformation*. Hauptgutachten (2., veränd. Aufl.). Wiss. Beirat der Bundesregierung Globale Umweltveränderungen (WBGU).
- Wernet, G., Bauer, C., Steubing, B., Reinhard, J., Moreno-Ruiz, E. & Weidema, B. (2016). The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21(9), 1218–1230.  
<https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8>

---

WWF/PwC. (2022). *Praxisleitfaden: Schritt für Schritt zur Transformationsumsetzung: Hilfestellung für Unternehmen auf dem Weg zur Paris-Kompatibilität*.  
<https://pathwaystoparis.com/toolbox/tool/>

Zargar, S., Yao, Y. & Tu, Q. (2022). A review of inventory modeling methods for missing data in life cycle assessment. *Journal of Industrial Ecology*, 26(5), 1676–1689.  
<https://doi.org/10.1111/jiec.13305>