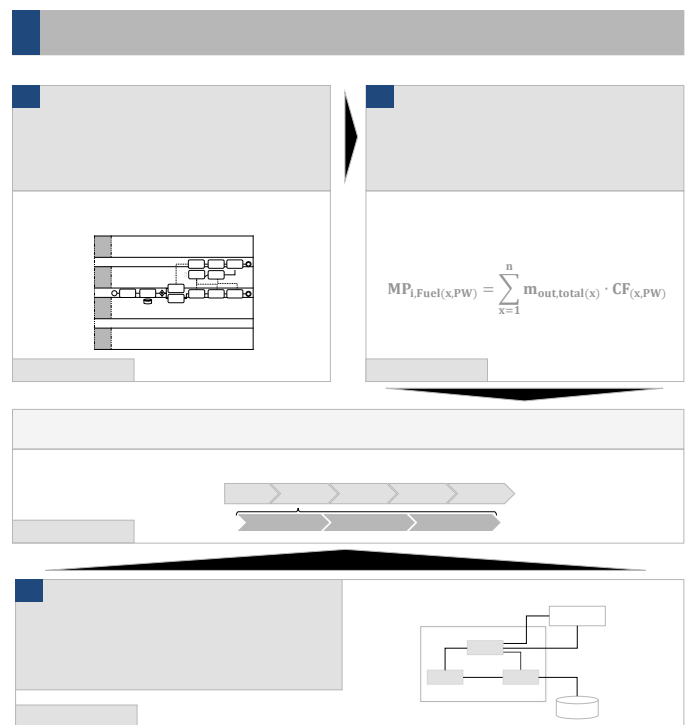


Systematik für die ökologische Bewertung von Flugzeugkabinen zur Integration in den Konfigurationsprozess unter Verwendung von Lebenszyklusdaten



Dennis Keiser

Systematik für die ökologische Bewertung von
Flugzeugkabinen zur Integration in den
Konfigurationsprozess unter Verwendung von
Lebenszyklusdaten

Vom Fachbereich Produktionstechnik
der
UNIVERSITÄT BREMEN

zur Erlangung des Grades eines
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)
genehmigte

Dissertation

von
M.Sc. Dennis Keiser

Erstgutachter: Prof. Dr.-Ing. Michael Freitag
(Universität Bremen)

Zweitgutachter: Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann
(Technische Universität Braunschweig)

Tag der mündlichen Prüfung: 17. Januar 2025

Danksagung

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am BIBA – Bremer Institut für Produktion und Logistik GmbH. In dieser Zeit habe ich von verschiedenen Personen in vielfältiger Weise Unterstützung erhalten, für die ich mich an dieser Stelle bedanken möchte.

Besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Freitag, Leiter des Fachgebiets Planung und Steuerung produktionstechnischer und logistischer Systeme an der Universität Bremen und Direktor des BIBA für die wertvollen Anregungen, das Vertrauen sowie die Förderung dieser Arbeit. Ebenso danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann, Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik an der Technischen Universität Braunschweig sowie Direktor des Fraunhofer-Instituts für Schicht- und Oberflächentechnik IST für das Interesse an dieser Arbeit und die Übernahme des Zweitgutachtens. Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Dieter Thoben danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes und die hilfreichen Hinweise während des Promotionsprozesses. Mein Dank gilt außerdem Frau Dr.-Ing. Sylvie Gavirey und den Herren Burak Vur und Lennart Lütjen für die Bereitschaft einen Teil der Prüfungskommission zu übernehmen. Darüber hinaus gilt allen Kollegen und ehemaligen Kollegen der Abteilung Robotik und Automatisierung mein großer Dank. Die Arbeitsatmosphäre, der Ansporn und die Freude während der gemeinsamen Projektarbeit waren für mich ein großartiges Umfeld, um die vorliegende Arbeit erfolgreich fertigzustellen. Weiterhin gilt den Projektpartnern der Airbus Operations GmbH, allen voran Herrn Dipl.-Ing. Matthias Reiß, mein Dank für das entgegengebrachte Vertrauen und die vielen gemeinsamen erfolgreichen Projekte. Ohne diese enge Zusammenarbeit wäre diese Arbeit so nicht möglich gewesen. Sowohl die Ergebnisse der Projekte als auch diese Arbeit zeigen, wie eine Brücke zwischen Forschung und Industrie geschlagen werden kann. Zudem sei hier auf die vielen studentischen Arbeiten hingewiesen. Ohne die herausragende Arbeit der Studierenden wäre die Bearbeitung des Themenfeldes so nicht möglich gewesen. Ich danke euch ganz herzlich für den Einsatz.

Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Familie und meinen Freunden. Sowohl meine Mutter, ihr langjähriger Lebenspartner, meine Geschwister, die Großeltern und die vielen weiteren Familienmitglieder haben mich entlang der Promotionszeit begleitet und standen mir stets mit aufmunternden Worten und einem offenen Ohr zur Seite. Gleiches gilt für die langjährigen Freunde in meinem privaten Umfeld. Meiner Partnerin Brit danke ich für ihre Geduld, die unglaublich tolle Unterstützung sowie die gemeinsamen Abende der Korrektur dieser Schrift. Danke!

Auch wenn mein Vater mich nur in den ersten Jahren meines Lebens begleiten durfte und die Erfolge seiner Kinder nicht mehr miterleben konnte, habe ich ihm sehr viel zu verdanken. Mit großer Dankbarkeit widme ich ihm diese Arbeit.

Zusammenfassung

Verkehrsflugzeuge werden auch für die Mobilität der Zukunft eine wichtige Rolle spielen und zur globalen Vernetzung beitragen. Im Hinblick auf die gesteckten Ziele im Bereich der ökologischen Nachhaltigkeit steht die gesamte Luftfahrtindustrie jedoch vor enormen Herausforderungen. Daher werden von den Flugzeugherstellern und deren Zulieferern zum einen völlig neuartige, langfristig orientierte Flugzeugkonzepte entwickelt. Zum anderen wird nach kurzfristigen Möglichkeiten zur Erreichung der ökologischen Ziele gesucht. Entsprechend werden bestehende Flugzeugtypen kontinuierlich inkrementell weiterentwickelt. Darüber hinaus besteht für Fluggesellschaften die Möglichkeit zur kundenindividuellen Konfiguration der Flugzeugtypen, welche Auswirkungen auf die ökologische Nachhaltigkeit hat. Dies trifft insbesondere für die Flugzeugkabine zu und ist daher von hoher Relevanz für die Fluggesellschaften. Die Operationalisierung der ökologischen Nachhaltigkeit kann durch integrierte Bewertungs- und Entscheidungshilfen innerhalb des Konfigurationsprozesses von Flugzeugkabinen erfolgen. Aus dieser Motivation heraus schlägt diese Arbeit eine Systematik für die ökologische Bewertung von Flugzeugkabinen zur Integration in diesen Prozess vor.

Hierzu wird in dieser Arbeit ein konzeptioneller Rahmen für die Integration der Systematik in den Konfigurationsprozess anhand von Forschungsfragen aufgespannt. Dieser bezieht die spezifischen Rahmenbedingungen sowie den Anwendungskontext der Flugzeugkabine mit ein. Hieraus ergeben sich für die vorliegende Arbeit drei thematische Schwerpunkte: Erstens die Ausgestaltung eines Prozessmodells zur Integration von Zuliefererdaten mit dem Ziel eine ausreichende Datengrundlage zu gewährleisten. Zweitens die Entwicklung einer spezifischen und parametrisierten Methodik zur ökologischen Bewertung von Flugzeugkabinen. Hierbei werden die Lebenszyklusdaten sowie die Spezifika der Luftfahrtindustrie in Form der Betriebsphase berücksichtigt. Drittens die Konzeptionierung eines Phasenmodells, welches die Synthese und Implementierung in den Konfigurationsprozess ermöglicht und hierbei insbesondere den kollaborativen Charakter dieses Prozesses berücksichtigt. Für die Entwicklung der Systematik orientiert sich die Forschungstätigkeit am Ansatz des Design Science Research und fokussiert für eine zielgerichtete Ausgestaltung der Artefakte insbesondere auf eine methodisch abgesicherte Anforderungsermittlung.

Das Ergebnis dieser Arbeit umfasst eine Systematik, welche unter Verwendung von Lebenszyklusdaten die ökologische Bewertung von Flugzeugkabinen innerhalb des Konfigurationsprozesses erlaubt. Die Systematik besteht aus einem Prozessmodell, einer parametrisierbaren Methode zur ökologischen Bewertung sowie dem Phasenmodell zur Synthese. Zudem wird eine softwaretechnische Umsetzung für die weitere Operationalisierung vorgestellt. Mit der abschließenden Analyse der Übertragbarkeit der Systematik leistet die vorliegende Arbeit ein Beitrag über den Anwendungskontext hinaus und trägt so zu weiteren Initiativen in Forschung und Praxis bei.

Abstract

Commercial airplanes will continue to play a crucial role in future mobility and contribute to global connectivity. However, the entire aviation industry faces significant challenges in achieving its environmental sustainability goals. To address these challenges, aircraft manufacturers and their suppliers are working on both entirely new, long-term aircraft concepts and short-term solutions to meet environmental targets. Existing aircraft models therefore being continuously improved. Furthermore, airlines have the opportunity to configure aircraft types to meet specific customer needs, particularly within the aircraft cabin, which can directly impact the environmental performance. Environmental sustainability can be operationalized through integrated assessment and decision-making tools within the configuration process of aircraft cabins. Based on this motivation, this thesis proposes a systematic for the environmental assessment of aircraft cabins for integration into this process.

For this purpose, this work proposes an integrated systematic for the environmental assessment of aircraft cabins. To achieve this, a conceptual framework is established in this thesis based on research questions. This framework considers the specific conditions and the application context of the aircraft cabin. Three main areas are derived and addressed in this work: First, the development of a process model for the integration of supplier data to ensure an adequate data foundation. Second, the creation of a specific and parameterized method for the environmental assessment of aircraft cabins, considering lifecycle data and the specifics of the aviation industry, particularly during the operational phase. Third, the conceptualization of a phase model that considers the implementation into the aircraft cabin configuration process, considering especially the collaborative nature of this process. In developing the systematic, the research activity is guided by the principles of Design Science Research and places a strong emphasis on a methodically sound requirement assessment, particularly to achieve a purposeful design of the artifacts.

The result of this work includes the systematic that allows the environmental assessment of aircraft cabins within the configuration process using lifecycle data. This systematic consists of the process model, an environmental assessment method with parameters and the phase model. Additionally, a software implementation for further operationalization is presented. By analyzing the transferability of this systematic, this work contributes beyond the immediate application context and contributes to further research and practical initiatives.

Inhaltsverzeichnis

Zusammenfassung	i
Abstract	ii
Inhaltsverzeichnis	iii
Abkürzungsverzeichnis	vi
Formelzeichen und Symbole	viii
1 Einleitung	1
1.1 Motivation.....	1
1.2 Zielstellung und Abgrenzung.....	3
1.3 Wissenschaftstheoretische Einordnung der Arbeit	4
1.4 Forschungsdesign	6
1.5 Methoden	8
1.6 Struktur der Arbeit.....	8
2 Grundlagen zum System Flugzeug sowie zu Konfigurationsprozessen	11
2.1 Lebenszyklen in der Luftfahrtindustrie.....	11
2.2 Aufbau der Wertschöpfungskette sowie Lebenszyklusdaten	13
2.3 Produktstruktur von Verkehrsflugzeugen	15
2.4 Modularisierung der Produktstruktur	17
2.5 Individualisierung und Konfiguration von Produkten	18
2.5.1 Konfigurationsprozesse	19
2.5.2 Herausforderungen und technische Unterstützung.....	20
2.6 Konfigurationsprozess in der Luftfahrtindustrie	22
2.6.1 Vorüberlegungen zur Konfiguration von Flugzeugkabinen.....	23
2.6.2 Konfigurationsprozess von Flugzeugkabinen	24
2.7 Zwischenfazit.....	26
3 Stand der Forschung zur Ökobilanzierung	28
3.1 Grundlagen zur Methode.....	28
3.1.1 Abgrenzung der Methode	28
3.1.2 Vorgehensweise.....	30
3.1.3 Methoden der Wirkungsabschätzung.....	35
3.1.4 Anwendungsfelder.....	38
3.1.5 Kritische Betrachtung der Methode.....	40
3.2 Ökobilanzen in der Luftfahrtindustrie.....	41
3.2.1 Analyse der Forschungsschwerpunkte nach Flugzeugsystemmodulen.....	42
3.2.2 Analyse der methodischen Vorgehensweise	43

3.2.3	Analyse bestehender spezifischer Methoden in der Luftfahrtindustrie.....	48
3.2.4	Spezifische methodische Herausforderungen für die Modellierung.....	50
3.3	Verfügbare luftfahrtspezifische Datenquellen zur Umweltbewertung.....	51
3.4	Zwischenfazit.....	54
4	Ableitung der Forschungsfragen sowie des konzeptionellen Rahmens.....	55
5	Potenzial-, Bedarfs- sowie Anforderungsanalyse.....	58
5.1	Potenzial- und Bedarfsanalyse.....	58
5.1.1	Potenzialanalyse des Anwendungsfalls.....	59
5.1.2	Bedarfsanalyse.....	62
5.2	Anforderungsanalyse.....	64
5.2.1	Anforderungen an das Prozessmodell zur Integration von Zuliefererdaten.....	64
5.2.2	Anforderungen an die Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode.....	68
5.2.3	Anforderungen an die Synthese mittels Phasenmodell.....	70
5.2.4	Anforderungen an die softwaretechnische Umsetzung.....	73
5.3	Zwischenfazit.....	74
6	Entwicklung der Gesamtsystematik.....	76
6.1	Ableitung von übergeordneten Systemgrenzen.....	76
6.2	Entwicklung des Prozessmodells zur Integration von Zuliefererdaten.....	78
6.2.1	Methodisches Vorgehen.....	80
6.2.2	Interaktionsmatrix entlang des Lebenszyklus.....	81
6.2.3	Ableitung von Prozessmodellvarianten und Abstraktion des Datenflusses.....	84
6.2.4	Entwicklung des Prozessmodells.....	88
6.2.5	Spezifische Hinweise zur Aufstellung der Sachbilanz.....	97
6.2.6	Zwischenfazit und Diskussion.....	98
6.3	Entwicklung der Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode.....	99
6.3.1	Methodisches Vorgehen.....	99
6.3.2	Konzeption der Methodik.....	100
6.3.3	Ziel und Untersuchungsrahmen sowie Eingrenzung.....	103
6.3.4	Sachbilanz der Treibstoffproduktion und Verbrennung.....	104
6.3.5	Wirkungsabschätzung Treibstoffproduktion und -herstellung.....	109
6.3.6	Aggregation mit Zuliefererdaten und Endmontage.....	111
6.3.7	Auswertung und Interpretation.....	112
6.3.8	Zwischenfazit und Diskussion.....	113
6.4	Synthese im Konfigurationsprozess mittels Phasenmodell.....	114
6.4.1	Methodisches Vorgehen.....	114
6.4.2	Konzeption des Phasenmodells.....	114
6.4.3	Fortlaufende Vorbereitung und Initiierung.....	115
6.4.4	Durchführung.....	117

6.4.5	Abschluss.....	118
6.4.6	Zwischenfazit und Diskussion	119
7	Softwaretechnische Umsetzung	120
7.1	Infrastruktur und Systemarchitektur.....	120
7.2	Vorüberlegungen zur Benutzeroberfläche sowie deren Struktur.....	122
7.3	Implementierung	123
7.4	Zwischenfazit und Diskussion	126
8	Anwendung und Evaluation	128
8.1	Anwendung	128
8.1.1	Zusammenfassung des Anwendungsfalls sowie dessen Datenbasis	128
8.1.2	Ergebnisse	130
8.2	Evaluation.....	133
8.2.1	Evaluation von Prozessmodell und Phasenmodell.....	134
8.2.2	Evaluation der Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode	139
8.2.3	Evaluation der softwaretechnischen Umsetzung	140
8.2.4	Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse	142
9	Schlussbetrachtungen	145
9.1	Zusammenfassung	145
9.2	Forschungsbeitrag und Forschungsfragen	147
9.3	Übertragbarkeit des entwickelten Ansatzes.....	149
9.4	Grenzen des entwickelten Ansatzes sowie kritische Reflexion	151
9.5	Ausblick	153
	Literaturverzeichnis	155
	Abbildungsverzeichnis	183
	Tabellenverzeichnis	186
	Anhang.....	188

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Bedeutung
AHP	Analytic Hierarchy Process
AIC	Aviation-Induced Cloudiness
APU	Auxiliary Power Unit
ATA	Air Transport Association of America
ATI	Affinity for Technology Interaction
BFE	Buyer-Furnished-Equipment
BPMN	Business Process Modell and Notation
B2B	Business-to-Business
CCD	Climb, Cruise, Descent
CDC	Customer-Definition-Centre
CF	Charakterisierungsfaktoren
DQR	Data Quality Rating
DSR	Design Science Research
EEA	European Environment Agency
EEIO	Environmental Extended Input Output Analysis
EF	Emissionsfaktoren
EMEP	Programms zur Überwachung und Bewertung von Luftschadstoffen
EP	Endpoint Indikatoren
EPA	Environmental Protection Agency
EPD	Environmental Product Declarations
EPK	Ereignisdiskrete Prozessketten
FCO	Fulfill Customer Order Process
FSC	Full-Service-Carrier
GWP	Global Warming Potential
HOV	Head of Version
ICAO	International Civil Aviation Organization
ILCD	International Reference Life Cycle Data System
LCA	Life Cycle Assessment
LCC	Low-Cost-Carrier
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
LCSA	Life Cycle Sustainability Assessment

LOPA	Layout of Passenger Accommodations
LTH	Luftfahrttechnisches Handbuch
LTO	Landing and Take-Off
MADM	Multi-Attribute Decision Making
MCDM	Multi-Criteria Decision Making
MODM	Multi-Objective Decision Making
MP	Midpoint Indikatoren
MRO	Maintenance, Repair, Overhaul
MVC	Model-View-Controller
OEM	Original Equipment Manufacturer
PCS	Product-Configuration-Systems
PKM	Passagierkilometer
PLM	Product-Lifecycle-Management
PRISMA	Preferred Reporting Items of Systematic Reviews and Meta-Analyses
PW	Perspektive zur Wirkungsabschätzung
SALSA	Search, Appraisal, Synthesis und Analysis
SFE	Seller-Furnished-Equipment
SD	Standardabweichung
SPSS	Sammeln, Prüfen, Sortieren und Subsumieren
SUS	System Usability Scale
TRACI	Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Environmental Impacts
UML	Unified Modeling Language

Formelzeichen und Symbole

Zeichen	Einheit	Bedeutung
$CF_{(x,PW)}$	-	Charakterisierungsfaktoren
$EF_{fuel(x)}$	-	Emissionsfaktoren
$EP_{(j,PW)}$	-	Endpoint Indikatoren
ff_{App}	kg/Sekunde	Kraftstoffdurchfluss Anflug
ff_{CO}	kg/Sekunde	Kraftstoffdurchfluss Steigflug
$ff_{Idle,}$	kg/Sekunde	Kraftstoffdurchfluss Rollzeit
$ff_{TO,}$	kg/Sekunde	Kraftstoffdurchfluss Startzeit
$l_{flight,total}$	km	Flugstrecke gesamter Lebenszyklus
$l_{flug(1)}$	km	Interpolationsvariable 1 - Unterer Wert, Flugstrecke
$l_{flug(2)}$	km	Interpolationsvariable 2 - Oberer Wert, Flugstrecke
$l_{flug,L}$	km	Flugstrecke Langstrecke
$l_{flug,M}$	km	Flugstrecke Mittelstrecke
$l_{flug(S,M,L)}$	km	Flugstrecke Kurz- Mittel-, Langstrecke
$l_{flug,S}$	km	Flugstrecke Kurzstrecke
$MF_{Subassembly}$	-	Multiplikationsfaktor für Kabinenmodule
$MP_{i,Endmontage(x,PW)}$	-	Midpoint Indikatoren Endmontage
$MP_{i,Fuel(x,PW)}$	-	Midpoint Indikatoren
$MP_{i,Fuel(x,PW)}$	-	Midpoint Indikatoren Treibstoffherstellung und -verbrauch
$MP_{i,Instandhaltung(x,PW)}$	-	Midpoint Indikatoren Instandhaltung und Wartung
$MP_{i,Produktion(x,PW)}$	-	Midpoint Indikatoren Produktion
$MP_{i,Recycling(x,PW)}$	-	Midpoint Indikatoren Recycling und Entsorgung
$MP_{i,Rohstoff(x,PW)}$	-	Midpoint Indikatoren Rohstoffgewinnung
$MP_{i,total(x,PW)}$	-	Midpoint Indikatoren gesamter Lebenszyklus
$MTE_{(j,PW)}$	-	Mid-to-Endpointfaktoren
$m_{fuel,Reserve}$		Gewicht Reservetreibstoff
$m_{fuelLife,Cabin}$	kg	Anteiliges Treibstoffgewicht Kabine gesamter Lebenszyklus
m_{Gall}	kg	Gewicht Bordküche
m_{GallIn}	kg	Gewicht Bordküchenelemente
m_{Lav}	kg	Gewichte Bordtoiletten
m_{Seats}	kg	Gewicht Sitze

$m_{\emptyset AC}$	kg	Durschnittliche Flugzeugmasse
m_{Cabin}	kg	Gewicht Kabine
$m_{FuelCCD,S,M,L}$	kg	Gewicht Treibstoff für Kurz-, Mittel-, Langstreckenflug CCD
$m_{PAX,total}$	kg	Gesamtes Passagier- und Gepächgewicht
m_{PAX}	kg	Durchschnittliches Passagiergewicht
m_{TOW}	kg	Maximale Startmasse Flugzeug
$m_{fuel,CCD(1)}$	kg	Interpolationsvariable 1 - Unterer Wert, Gewicht Treibstoff
$m_{fuel,CCD(2)}$	kg	Interpolationsvariable 2 - Oberer Wert, Gewicht Treibstoff
$m_{fuel,CCD,Life}$	kg	Gewicht Treibstoff gesamter Lebenszyklus CCD Phase
$m_{fuel,CCD,S,M,L}$	kg	Gewicht Treibstoff Reiseflug Kurz-, Mittel-, Langstrecke
$m_{fuel,CCD}$	kg	Gewicht Treibstoff Reiseflug
$m_{fuel,LTO,Life}$	Kg	Treibstoffgewicht gesamter Lebenszyklus LTO Phase
$m_{fuel,LTO}$	kg	Gewicht Treibstoff Start- und Landezyklus
$m_{fuel,Life}$	kg	Gewicht Treibstoff gesamter Lebenszyklus
$m_{fuel,reserve}$	kg	Gewicht Reservetreibstoff
$m_{fuel,total}$	kg	Gewicht Treibstoff inklusive „Taxi“-Treibstoff
$m_{out(x)}$	-	Emissionen abhängig von Treibstoff und Emissionsprodukt
$m_{out,burn(x)}$	-	Emissionen Treibstoffverbrennung abhängig von (x)
$m_{out,fueltotal(x)}$	-	Emissionen gesamter Lebenszyklus abhängig von (x)
$m_{out,production(x)}$	-	Emissionen Treibstoffherstellung abhängig von (x)
m_{STOW}	kg	Spezifisches Startgewicht Flugzeug
$NF_{(j,WT)}$	-	Normalisierungsfaktoren
$n_{Engines}$	-	Anzahl Triebwerke
$n_{Life,S,M,L}$	-	Anzahl Flugzykeln Kurz-, Mittel-, Langstrecke
n_{Zyklus}	-	Anzahl Flugzeugzyklen gesamter Lebenszyklus
$p_{Range,S,M,L}$	%	Verteilung von Kurz-, Mittel-, Langstreckenflügen
$S_{Fuel(j,WT,PW)}$	-	Single Score Treibstoffherstellung und -verbrauch
$Subassembly_{PKM,Cabin}$	-	Normiertes Ergebnis für Kabinenmodule
t_{Life}	min	Flugzeit gesamter Lebenszyklus
t_{App}	min	Zeit Anflug
t_{CO}	min	Zeit Steigflug

t_{Idle}	min	Rollzeit
t_{Life}	h	Flugstunden gesamter Lebenszyklus
$t_{Range,S,M,L}$	h	Flugstunden Kurz-, Mittel-, Langstreckenflüge
$t_{Subassembly}$	Jahre	Lebensdauer Kabinenmodul in Schnittstellendokument
t_{TO}	min	Startzeit
$t_{interpol,S,M,L}$	min	Interpolierte Flugdauer Kurz-, Mittel-, Langstreckenflüge
$W_{(j,WT)}$	-	Gewichtungsfaktoren
$CF_{(x,PW)}$	-	Charakterisierungsfaktoren
$EF_{fuel(x)}$	-	Emissionsfaktoren
$EP_{(j,PW)}$	-	Endpointindikatoren
ff_{App}	kg/Sekunde	Kraftstoffdurchfluss Anflug
ff_{CO}	kg/Sekunde	Kraftstoffdurchfluss Steigflug
ff_{Idle}	kg/Sekunde	Kraftstoffdurchfluss Rollzeit

Symbole

Symbol	Einheit	Bedeutung
CH ₄	-	Methan
CO	-	Kohlenstoffmonoxid
CO ₂	-	Kohlenstoffdioxid
H ₂ O	-	Wasser
HC	-	Kohlenwasserstoffe
N ₂ O	-	Distickstoffmonoxid
NH ₃	-	Ammoniak
NMVOC	-	Flüchtige Organische Verbindungen ohne Methan
NO _x	-	Stickstoffoxide
SO ₂	-	Schwefeldioxid
TSP	-	Natriumtrimethylsilylpropionat

1 Einleitung

Das einleitende Kapitel dieser Arbeit stellt im ersten Abschnitt die Motivation der vorliegenden Arbeit dar und zeigt anhand des aktuellen Bezugs sowie der Rahmenbedingungen die Relevanz des Themas. Ausgehend von der Motivation wird im darauffolgenden Abschnitt die Zielstellung des Forschungsvorhabens präsentiert. Zudem wird eine erste Eingrenzung des Betrachtungsgegenstandes vorgenommen und relevante Forschungsfelder identifiziert sowie gruppiert. Diese Vorüberlegungen bilden die Basis für die vorgenommene wissenschaftstheoretische Einordnung in Abschnitt 1.3, welche das gewählte Forschungsdesign im darauffolgenden Abschnitt motiviert (Abschnitt 1.4). Neben der Vorstellung des Forschungsdesigns werden die eingesetzten wissenschaftlichen Methoden entlang des Forschungsprozesses initial benannt und entsprechend verortet (Abschnitt 1.5). Abschließend wird in diesem ersten Kapitel der Aufbau dieser Schrift präsentiert.

1.1 Motivation

Verkehrsflugzeuge werden auch für die Mobilität der Zukunft eine entscheidende Rolle spielen und zur globalen Vernetzung beitragen (Abrantes et al. 2021). Dennoch steht die gesamte Luftfahrtindustrie vor enormen Herausforderungen, welche durch veränderte Rahmenbedingungen und neue Anforderungen induziert werden (Graham et al. 2014; Zhang et al. 2020). Bedingt durch den stark gestiegenen Kostendruck rückt erstens die wirtschaftliche Effizienz von Verkehrsflugzeugen entlang des gesamten Lebenszyklus weiter in den Fokus (Scheelhaase et al. 2022). Zweitens ist ein verstärkter Trend zu individualisierten Reisen auch in der Luftfahrtindustrie bemerkbar (Mortensen Ernits et al. 2022a). Drittens gelten die gesteckten Ziele im Hinblick auf die ökologische Nachhaltigkeit entlang der gesamten Wertschöpfungskette als die Kernherausforderung für die gesamte Luftfahrtindustrie (Ryley et al. 2020). So streben die internationalen Luftverkehrsvereinigungen bereits heute ein CO₂-neutrales Wachstum an (IATA 2021) und bereits in der vergangenen Dekade wurde die Verbesserung der Treibstoffeffizienz um jährlich 1,5 Prozent als Ziel formuliert (EASA 2019). Weiterhin sind von den öffentlichen Institutionen auf europäischer Ebene Nachhaltigkeitsziele für die Luftfahrtindustrie bis zum Jahr 2050 formuliert worden. Konkret zielen diese auf eine Senkung der Emissionen von 50 Prozent bis zum Jahr 2050 ab (EASA 2019). Neben dieser langfristig orientierten Betrachtungsweise auf regulatorischer Ebene steigt die gesellschaftliche Diskussionsbereitschaft im Hinblick auf eine nachhaltige Mobilität der Zukunft (Rice et al. 2020). Dies zeigt nicht zuletzt eine im Rahmen dieser Arbeit durchgeführten Befragung unter Flugpassagieren (Keiser et al. 2023b).

Diesen Entwicklungen begegnen die Flugzeughersteller sowie deren Zulieferer auf übergeordneter Ebene mit der Entwicklung von völlig neuen Flugzeugkonzepten sowie Antriebssystemen (Szirozak et al. 2020; Zhang et al. 2023). Ferner werden große Anstrengungen unternommen, um neuartige Treibstoffe zu entwickeln (Heyne et al. 2021; Okolie et al. 2023). Diese technologisch geprägten Ansätze sind jedoch langfristiger Natur und mit enormen technologischen Hürden und Risiken verbunden (Zhang et al. 2020). Daher werden auch bestehende, bereits entwickelte Flugzeugtypen inkrementell weiterentwickelt (Bravo et al. 2022). Dies bedingt sich zum

einen durch ein geringeres Risiko, da bestehende Flugzeugzertifizierungen sowie Infrastruktur zur Produktion weiterverwendet werden können (van Heerden et al. 2019). Zum anderen können aufgrund des langen Lebenszyklus von Flugzeugprogrammen so effizienzsteigernde Maßnahmen in die bestehenden Flotten der Flugzeughersteller implementiert werden. Die Flugzeugkabine als elementares Teilsystem von Flugzeugen nimmt bei diesen Bemühungen eine wichtige Rolle ein. Motiviert wird dies erstens durch die vergleichsweise kurzen Entwicklungszyklen für Komponenten der Flugzeugkabine (Bahns et al. 2013) sowie durch die Möglichkeit zur Nachrüstung während des Lebenszyklus (Laukotka und Krause 2023; Niță und Scholz 2011). Zweitens ist die Flugkabine von zentraler Bedeutung für die Markenbildung der Fluggesellschaften und gleichzeitig notwendige Voraussetzung für eine individualisierte Reise (Ackert 2013; Hall et al. 2013). Damit kommt der Flugzeugkabine eine Sonderrolle zu und ist folglich sowohl aus ökologischer als auch betriebswirtschaftlicher Sicht von hohem Interesse für alle Akteure.

Grundlage für die Umsetzung der ökologischen Potenziale innerhalb der Kabine sind transparente und integrierte Methoden zur Bewertung verschiedener Kabinenalternativen sowie deren Komponenten (Keiser et al. 2023a). Diese steigern die Akzeptanz und erhöhen zudem die Entscheidungssicherheit. Ferner werden von den Passagieren als Endkunden mittlerweile auch transparente und auf ökologischen Aspekten beruhende Entscheidungen innerhalb der Industrie erwartet (Keiser et al. 2023b). Diese Erwartungen der Passagiere lassen sich, wie in Abbildung 1 dargestellt, kausal von den Fluggesellschaften hin zu den Flugzeugherstellern überführen. Im Umkehrschluss bieten datenbasierte Bewertungsmethoden Möglichkeiten zur zielgerichteten Kommunikation. Flugzeughersteller werden unter diesen Rahmenbedingungen zunehmend Bewertungs- und Entscheidungshilfen für Fluggesellschaften zur Verfügung stellen müssen und diese zur Wettbewerbsdifferenzierung nutzen. In Kombination mit den gesteckten ökologischen Zielen sowie der Sonderrolle der Flugzeugkabine motiviert sich hieraus diese Arbeit aus einer praktisch anwendungsorientierten Perspektive.

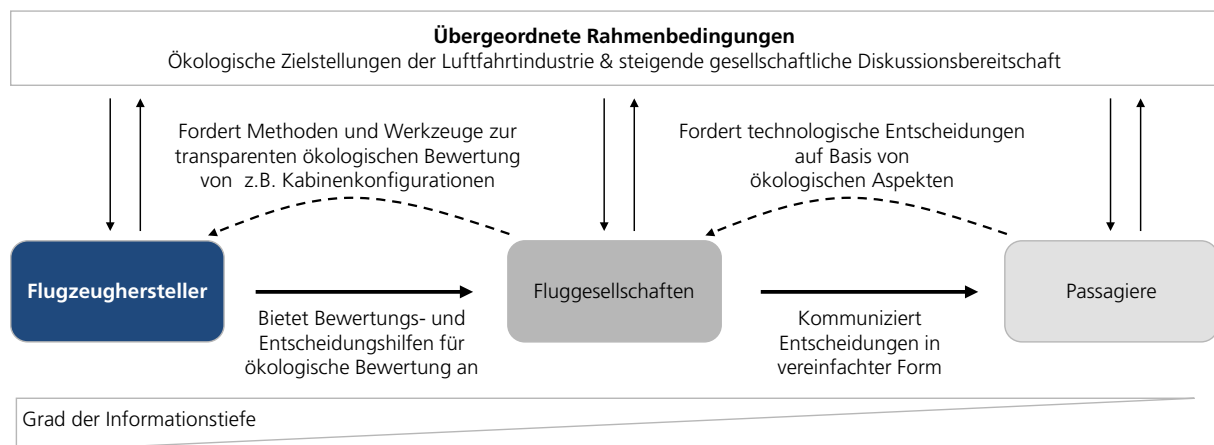


Abbildung 1: Kausale Ableitung der Motivation dieser Arbeit (angelehnt an Keiser et al. 2023b)

Die Operationalisierung von Bewertungs- und Entscheidungshilfen für Flugzeugkabinen lässt sich im gestaltungsbildenden Konfigurationsprozess der Flugzeugkabine verorten. Dieser Konfigurationsprozess zeichnet sich zunächst durch einen hohen Komplexitätsgrad aus, bietet jedoch gleichzeitig als Schnittstelle zwischen Flugzeugherstellern sowie Fluggesellschaften die Möglichkeit zur kurzfristigen ökologischen Optimierung bestehender Flugzeugtypen. Wie ökologische Aspekte mithilfe von Bewertungs- und Entscheidungshilfen in den Konfigurationsprozess integriert werden

können, ist bisher allerdings nicht untersucht. Erste Forschungsarbeiten stellen allgemein für komplexe Investitionsgüter den Bedarf zur Integration von ökologischen Aspekten in den Konfigurationsprozess fest (Badurdeen et al. 2018; Rousseau et al. 2020; Tang et al. 2017). Konkrete systematische Ansätze zur Umsetzung lassen sich in der Literatur jedoch nicht finden. Hier lässt sich somit eine übergeordnete Forschungslücke feststellen. Für die Luftfahrtindustrie im Speziellen lassen sich ferner keine integrierten Methoden oder Vorgehensweise für den Konfigurationsprozess der Kabine identifizieren (Keiser et al. 2023a). Bisherige Forschungsarbeiten fokussieren hier auf die Entwicklung von ökologischen Bewertungsmethoden beispielsweise während des Flugzeugvorentwurfs oder im Hinblick auf die Bewertung von neuartigen Technologien (Johanning 2017; Melo et al. 2020). Weiterhin besteht großer Forschungsbedarf im Hinblick auf eine strukturierte Datenerfassung entlang des Lebenszyklus von Verkehrsflugzeugen (Laukotka und Krause 2023). Die hier initial aufgezeigten Forschungsdesiderate motivieren diese Arbeit und werden im Zuge von Kapitel 2 und 3 detaillierter vorgestellt.

1.2 Zielstellung und Abgrenzung

Ziel dieser Arbeit ist die Entwicklung einer Systematik zur ökologischen Bewertung von Flugzeugkabinen innerhalb des Konfigurationsprozesses unter Verwendung von Lebenszyklusdaten. Im Ergebnis soll die Systematik als integriertes Werkzeug die Fluggesellschaften befähigen, verschiedene Produktkonfigurationen hinsichtlich der ökologischen Dimension zu bewerten. Aus Perspektive der Flugzeughersteller stellt die Integration einen weiteren Schritt in Richtung der Operationalisierung von ökologischen Metriken dar und trägt somit zur Bereitstellung von konkreten Maßnahmen zur Erreichung der gesteckten ökologischen Ziele bei.

Zur Erreichung dieser Zielstellung sind verschiedene Forschungsgegenstände zu untersuchen. Zunächst ist zu analysieren, wie notwendige Lebenszyklusdaten zur ökologischen Bewertung aufgenommen und bereitgestellt werden können. Darauf aufbauend ist die Aggregation der Daten und Verarbeitung in Form einer Methode zur ökologischen Bewertung von Flugzeugkabinen notwendig und stellt somit ein weiteres Teilziel dar. Darüber hinaus ist die Integration in den Konfigurationsprozess der Kabine für die Implementierung notwendig. Die Synthese und Integration in den Konfigurationsprozess ist somit als weiteres unterstützendes Teilziel zu formulieren. Ausgehend von der übergeordneten Zielstellung erfolgt in Kapitel 4 die Herleitung des konzeptionellen Rahmens sowie die Darstellung der forschungsleitenden Fragestellung für diese Arbeit.

Bedingt durch den interdisziplinären Charakter dieser Arbeit ist eine Synthese von Erkenntnissen aus verschiedenen Forschungsdisziplinen notwendig, wodurch ein Beitrag zu mehreren Forschungsfeldern geleistet wird. In Abbildung 2 wird das Thema dieser Arbeit in den Kontext der Forschungsfelder eingeordnet. Hierbei werden die Forschungsfelder nach folgender Systematik unterschieden: Zunächst sind die in dieser Arbeit adressierten Forschungsfelder benannt, für die ein Beitrag geleistet werden soll. Darauf aufbauend sind Forschungsbereiche dargestellt, die essenziell zur Erreichung der Forschungsziele sind sowie weitere hilfreiche Forschungsfelder.



Abbildung 2: Forschungsfeld und relevante angrenzende Forschungsfelder dieser Arbeit (Darstellungsform nach Blessing und Chakrabarti 2009)

Abschließend erfolgt neben der Einordnung der Forschungsfelder eine **Eingrenzung des Betrachtungsgegenstandes** auf Basis der Zielstellung sowie der dargelegten Motivation für diese Arbeit. Zunächst ist eine Abgrenzung dieser Arbeit durch die von Ilg zusammengeführte Klassifizierung von Flugzeugen möglich (Ilg 2015): Demnach ist eine Klassifizierung von Flugzeugen unter anderem nach deren Größe möglich. Im Rahmen dieser Arbeit werden ausgehend von dieser Klassifizierung ausschließlich zivile Großraumflugzeuge, welche in der kommerziellen Luftfahrt für die Beförderung von Passagieren eingesetzt werden, betrachtet. Die Eingrenzung auf Basis des Produkts lässt sich hier mit der Flugzeugkabine als zu untersuchendem Teilsystem von Flugzeugen noch weiter spezifizieren. Ausgehend von dem Ziel dieser Arbeit umfasst die Eingrenzung des Betrachtungsraums ferner eine methodische Perspektive: Das Nachhaltigkeitsdreieck wird allgemein durch die Dimensionen *Ökonomie*, *Ökologie* und *Soziales* aufgespannt. Im Rahmen dieser Arbeit wird ausschließlich die ökologische Perspektive betrachtet. Weitere Eingrenzungen werden im Zuge der Entwicklung beispielsweise durch Definition der betrachteten Systemgrenzen vorgenommen (siehe Kapitel 6.1).

1.3 Wissenschaftstheoretische Einordnung der Arbeit

Die wissenschaftliche Verortung der vorliegenden Arbeit erfolgt in diesem Abschnitt durch die von Ulrich und Hill vorgeschlagene Systematisierung der Wissenschaften (Ulrich und Hill 1976). Die aus der Wissenschaftstheorie stammende Systematik ermöglicht eine Gliederung und Zuordnung von wissenschaftlichen Disziplinen sowie Fragestellungen. Zunächst ist hierzu, wie in Abbildung 3 dargestellt, zwischen Formal- und Realwissenschaften zu unterscheiden. Als Formalwissenschaften werden Disziplinen bezeichnet, welche die Konstruktion von Zeichensystemen mit einem Regelwerk zur Verwendung ebendieser zum Gegenstand haben (Ulrich und Hill 1976). Zu den Formalwissenschaften zählen nach Ulrich und Hill etwa die Philosophie, Logik und Mathematik.

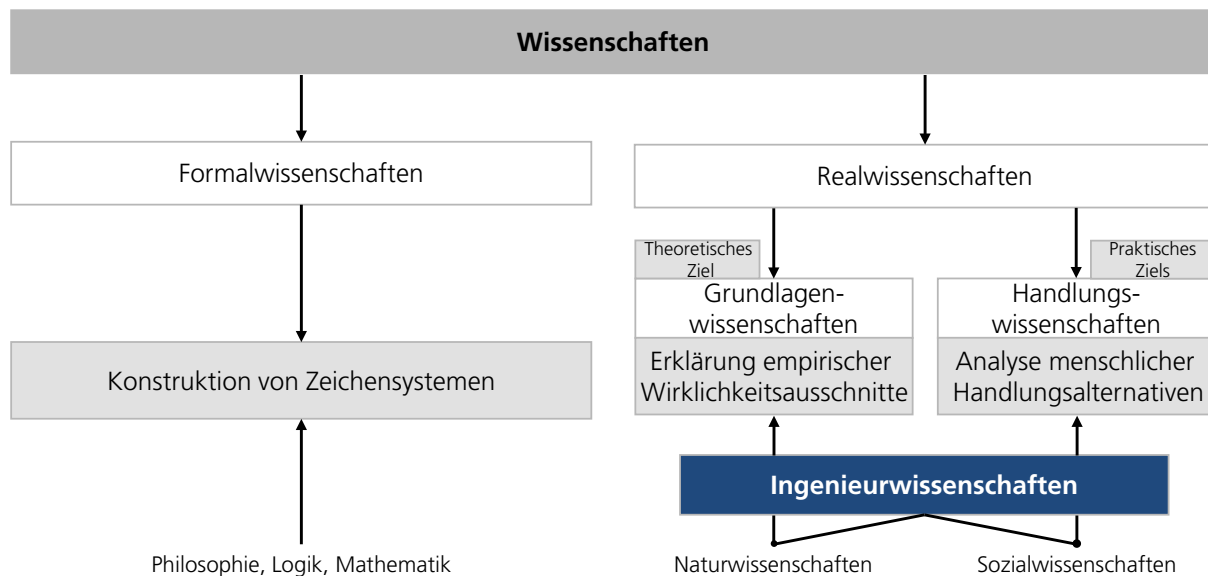


Abbildung 3: Wissenschaftstheoretische Einordnung der Ingenieurwissenschaften
(angelehnt an Ulrich und Hill 1976)

Derartige Wissenschaftsdisziplinen zeichnen sich durch die Beschäftigung mit abstrakten sowie geistig konstruierten Forschungsgegenständen aus und fokussieren zunächst nicht auf reale Objekte (Steinmetz 2004). Demgegenüber stehen die Realwissenschaften, welche sich mit Wirklichkeitsausschnitten beschäftigen (Schanz 1987). Entsprechend der eher praktischen bzw. realen Betrachtungsgegenstände sind für die Realwissenschaften auch die Begriffe empirische Wissenschaften oder Erfahrungswissenschaften gebräuchlich (Steinmetz 2004). Die Realwissenschaften lassen sich, je nach Zielstellung, weiter in Grundlagen- und Handlungswissenschaften aufgliedern. Die Grundlagenwissenschaften fokussieren auf eine theoretische Zielstellung und versuchen, Wirklichkeitsausschnitte empirisch zu erklären. Die Naturwissenschaften wie zum Beispiel Physik und Chemie lassen sich somit den Grundlagenwissenschaften zuordnen (Ulrich und Hill 1976). Praktische Zielstellungen werden in den Handlungswissenschaften untersucht. Gegenstand ist die Analyse menschlicher Handlungsalternativen zum Zwecke der Gestaltung von sozialen und technischen Systemen. Es werden sowohl Entscheidungsmodelle als auch Entscheidungsprozesse für die Anwendung im Kontext realer Systeme entwickelt (Helfrich 2016). Zu diesen angewandten Wissenschaften gehören im gesellschaftlichen Bereich die Sozialwissenschaften sowie die Betriebswirtschaftslehre. Im technischen Bereich der Handlungswissenschaften lassen sich die Ingenieurwissenschaften verorten (Ulrich und Hill 1976). Je nach Zielstellung kann die Ingenieurwissenschaft zudem den Grundlagenwissenschaften zugeordnet werden.

Ausgehend von der bereits definierten Zielstellung sowie dem Anwendungsfeld lässt sich diese Arbeit den Handlungswissenschaften zuordnen. **Fokussiert wird auf eine aus der Praxis stammende forschungsleitende Problemstellung, welche mit ingenieurwissenschaftlichen Methoden zu untersuchen ist.** Im folgenden Abschnitt wird auf Basis dieser Einordnung ein geeignetes Forschungsdesign definiert und erläutert.

1.4 Forschungsdesign

Ausgehend von der vorgenommenen wissenschaftstheoretischen Einordnung sowie der allgemeinen Teildefinition von Wissenschaft, welche wissenschaftliches Vorgehen und Arbeiten als systematisch, strukturiert und nachvollziehbar beschreibt (Schnell et al. 2011), wird in diesem Abschnitt das für diese Arbeit verwendete Forschungsdesign dargestellt. Die Auswahl eines geeigneten Forschungsdesigns vereinfacht die Erreichung eines Wissensziels (Prümmer 2020). Zudem zeigen Studien den positiven Effekt einer methodischen Vorgehensweise bei der Lösung von komplexen Problemstellungen (Ehrlenspiel und Meerkamm 2017).

Zur weiteren Strukturierung des Forschungsprozesses mit dem Ziel des wissenschaftlichen Erkenntnisgewinns folgt diese Arbeit dem Vorgehensmodell des **Design Science Research (DSR)**. Das problemlösungsorientierte, auf ingenieurwissenschaftlichen Methoden ausgerichtete Vorgehensmodell dient dem wissenschaftlich fundierten Erkenntnisgewinn und der Lösung eines aus der Praxis heraus definierten Problemraums. Es besteht aus sechs Schritten, welche zur Entwicklung von Artefakten und deren Evaluation iterativ durchlaufen werden (Peppers et al. 2007). Artefakte können im Rahmen des DSR sowohl Methoden als auch Konzepte darstellen. Der DSR-Prozess eignet sich hierbei im besonderen Maße für die praktisch ausgerichtete Forschung und stellt demnach einen geeigneten Ordnungsrahmen für diese Arbeit dar. Zudem ist die erfolgreiche Anwendung des DSR bei verschiedenen wissenschaftlichen Fragestellungen in unterschiedlichen Disziplinen hinreichend belegt (Frauchinger 2017). Neben dem Vorgehensmodell beschreiben Hevner et al. ferner sieben Leitlinien, welche im Rahmen dieser Arbeit berücksichtigt und im Zuge der kritischen Reflexion (siehe Abschnitt 9.3) aufgegriffen werden (Hevner et al. 2004).

Für das konkrete Vorgehen dieser Arbeit ist zunächst ein geeigneter Einstiegspunkt in den DSR-Prozess zu wählen. Je nach Betrachtungsgegenstand sowie Ziel sind vier potenzielle Einstiegspunkte möglich. Mit dem Ziel des nominellen Prozessablaufs wird die problemzentrierte Initiation als Einstiegspunkt gewählt und entsprechend sind alle sechs Schritte des DSR-Prozesses, teilweise iterativ, zu durchlaufen. In der ersten Phase erfolgt sowohl die Identifikation der Problemstellung als auch die Herleitung der Motivation zur Bearbeitung des Forschungsgegenstandes (Kapitel 1). Hierzu sind ferner die Grundlagen sowie der Stand der Forschung (Kapitel 2 und 3) darzustellen. Dies bildet die Grundlage für den Schritt der lösungsorientierten Zieldefinition und unter Berücksichtigung der Zieldefinition können ein konzeptioneller Rahmen dargestellt, die Forschungsfragen hergeleitet und die Artefakte definiert werden (Kapitel 4). Zudem erfolgen in dieser Phase zunächst die weitere Absicherung des Bedarfs sowie des Potenzials des Betrachtungsgegenstands (Abschnitt 5.1). Motiviert wird dies durch das im DSR-Prozess vorgesehene iterative Vorgehen. Darauffolgend werden unter Einsatz geeigneter Methoden Anforderungen an die Artefakte erhoben (Abschnitt 5.2). Die anschließende Phase des Designs und der Entwicklung stellt den Kern dieser Arbeit dar. Es werden auf Basis der aufgestellten Anforderungen die Artefakte entwickelt sowie das methodische Vorgehen zur Entwicklung ebendieser dargestellt (Kapitel 6). Die Demonstration und Operationalisierung der Artefakte erfolgt mittels einer softwaretechnischen Umsetzung, welche den abschließenden Entwicklungsgegenstand darstellt (Kapitel 7). Die Anwendung sowie Evaluation dient zur Sicherung und zum Nachweis der Problemlösung und zeigt mögliche Grenzen der Artefakte auf (Kapitel 8). Abschließend wird im Vorgehensmodell die Kommunikation genannt. Dies wird Rahmen dieser Arbeit durch wissenschaftliche Veröffentlichungen als

auch die eigentliche Dissertationsschrift sichergestellt. Abbildung 4 zeigt die Schritte des DSR und verortet die übergeordneten Betrachtungsgegenstände dieser Arbeit. Das beschriebene Forschungsdesign folgt damit dem wissenschaftstheoretischen Verständnis von Erkenntnis, wonach Erkenntnis mit Problemen beginnt und erst dann Beobachtungen oder das Sammeln von Daten und Tatsachen folgt (Popper 1975).

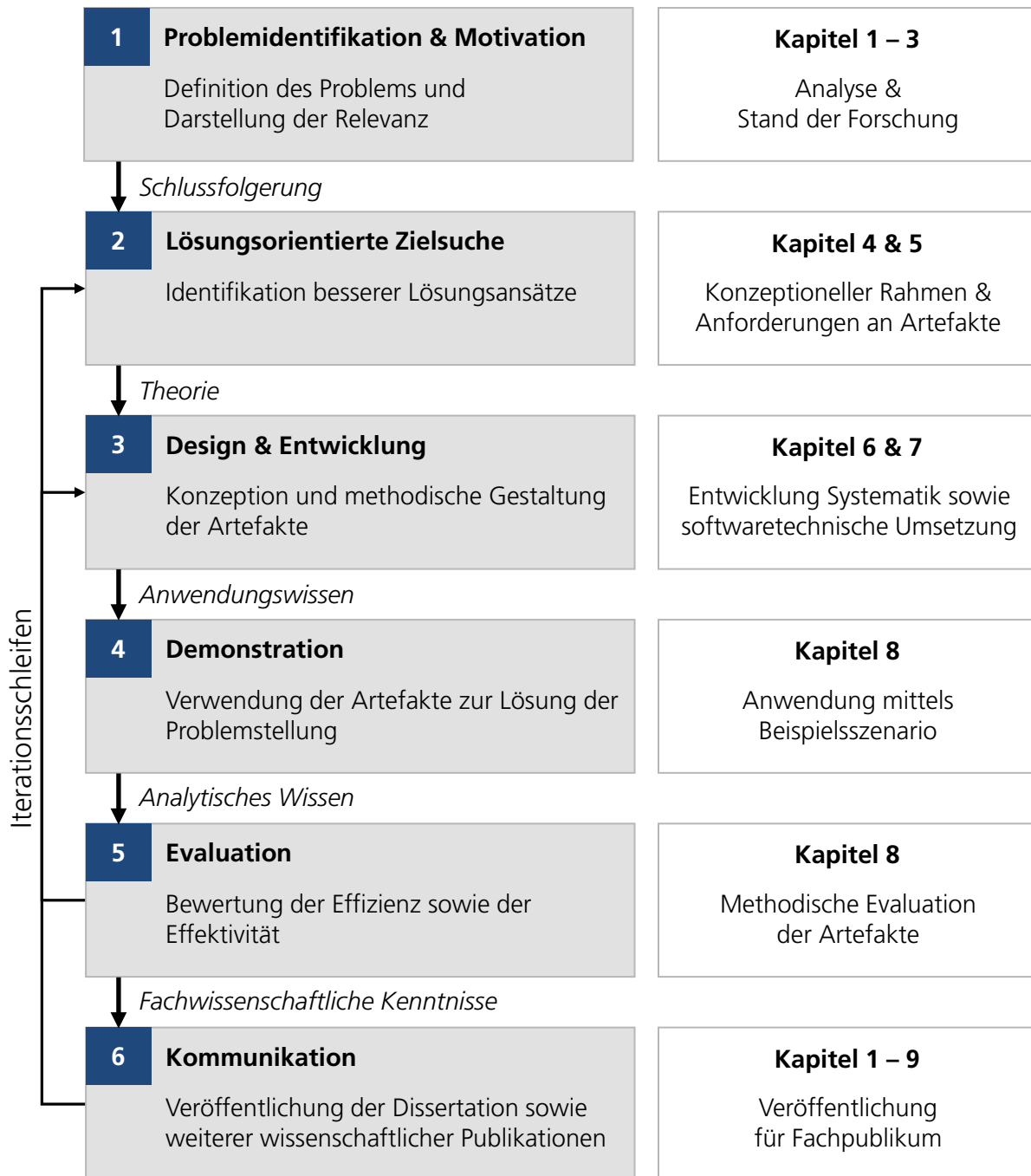


Abbildung 4: Schritte des DSR-Prozesses als Vorgehensmodell dieser Arbeit und Zuordnung der Kapitel (angelehnt an Peffers et al. 2007)

1.5 Methoden

Innerhalb des im vorherigen Abschnitt vorgestellten Forschungsdesigns erfolgt die Anwendung von wissenschaftlichen Methoden zur Erreichung der Zielstellung. In diesem Abschnitt wird daher ein Überblick über die verwendeten Methoden gegeben, das Ziel der Anwendung präsentiert und eine Verortung sowohl in den DSR-Prozess als auch die Kapitelstruktur dieser Arbeit vorgenommen. Die Übersicht ist in nachfolgender Tabelle 1 dargestellt. Eine detaillierte Vorstellung der Methoden erfolgt mit dem Ziel der besseren Einordnung in den Anwendungskontext in den jeweiligen Kapiteln. Die nachfolgende Übersicht ist entsprechend chronologisch aufgebaut.

Tabelle 1: Übersicht der verwendeten Methoden innerhalb dieser Arbeit

Methoden	Ziel der Methodenanwendung	DSR-Schritt	Kapitel
Befragung der Passagiere	Motivation der Forschungsarbeit und Nachweis des Bedarfs in der Zielindustrie	1	1
Systematische Literaturanalyse	Analyse des Standes der Forschung sowie Grundlage zur Ermittlung der Anforderungen	1	3
Multikriterielle Entscheidungsanalyse (AHP)	Potenzialbewertung des Anwendungsfalls	2	5
Workshops	Ermittlung von Anforderungen	2	5
Befragung Experten	Ermittlung von Anforderungen	2	5
Fokusgruppe	Ermittlung von Anforderungen	2	5
(Geschäfts-) Prozessmodellierung	Entwicklung Prozessmodell	3	6
Interaktionsmatrix	Entwicklung Prozessmodellvarianten	3	6
Methodisches Entwickeln (<i>angelehnt an VDI 2221</i>)	Entwicklung der Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode	3	6
Fallbeispiel/Szenario	Demonstration der Methodik	4	8
Experteninterview	Evaluation	5	8
Beitragsanalyse	Evaluation	5	8
Nutzerstudie	Evaluation	5	8
Morphologie	Bewertung Übertragbarkeit des Ansatzes	-	9

1.6 Struktur der Arbeit

Ausgehend von diesem einleitenden **Kapitel eins** und insbesondere des bereits vorgestellten Forschungsdesigns sowie der Zielstellung dieser Arbeit kann die Struktur dieser Arbeit dargestellt werden. Zur Erreichung der Zielstellung gliedert sich diese Arbeit in insgesamt neun Kapitel.

Kapitel zwei beschreibt zunächst notwendige Grundlagen zum System Flugzeug, zum Wertschöpfungsprozess in der Luftfahrtindustrie sowie die Grundlagen von Konfigurationsprozessen und den damit verbundenen Herausforderungen. Bedingt durch den Betrachtungsgegenstand dieser Arbeit fokussiert dieses erste Grundlagenkapitel primär auf die Flugzeugkabine sowie deren

Konfigurationsprozess. **Kapitel drei** widmet sich der Methode der Ökobilanzierung. Dazu werden zunächst die Grundlagen der Methode in Form einer Abgrenzung sowie der Vorgehensweise vorgestellt. Darauf aufbauend wird der Stand der Forschung von Ökobilanzen in der Luftfahrtindustrie anhand einer systematischen Literaturanalyse vorgestellt und analysiert. Das Kapitel schließt mit der Vorstellung notwendiger Datenquellen in der Luftfahrtindustrie sowie einem Zwischenfazit. Daran anschließend wird auf Basis der gewonnenen Erkenntnisse in **Kapitel vier** der konzeptionelle Rahmen dieser Arbeit hergeleitet und es werden die Forschungsfragen präzisiert. In diesem Kapitel werden folglich auch die zu entwickelnden Artefakte nach dem DSR-Prozess formuliert. Im **fünften Kapitel** erfolgt zur weiteren Absicherung des formulierten Forschungsgegenstandes zunächst eine methodisch abgesicherte Potenzialbewertung, zudem wird der Praxisbedarf mittels einer Bedarfsanalyse dargestellt. Darauf aufbauend werden die Anforderungen an die Artefakte systematisch erhoben und abschließend vorgestellt. Dieses Kapitel bietet somit die Grundlage für Kapitel sechs. Innerhalb des **sechsten Kapitels** erfolgt die Entwicklung der Gesamtsystematik. Das Kapitel beginnt dazu mit der Ableitung von Systemgrenzen. Anschließend wird das erste Artefakt, das Prozessmodell zur Integration von Zuliefererdaten, entwickelt. Darauf aufbauend wird die Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode für die Flugzeugkabine als zweites Artefakt dieser Arbeit entwickelt. Ferner wird die Synthese vorgestellt. Hierzu wird ein Phasenmodell zur Implementierung in den Konfigurationsprozess präsentiert. In **Kapitel sieben** wird das dritte zu untersuchende Artefakt dargelegt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde zur Operationalisierung der Gesamtsystematik ein Software-Demonstrator entwickelt. Der Demonstrator fokussiert insbesondere auf den ersten Nachweis der Machbarkeit.

Die Anwendung und Evaluation der entwickelten Artefakte stellen die Gegenstände von **Kapitel acht** dar. Zunächst erfolgt in diesem Kapitel die Anwendung der Ökobilanzmethode für eine beispielhaft konfigurierte und parametrisierte Flugzeugkabine. Daraufaufgehend werden die Artefakte evaluiert. Für die Planung der Evaluation wird das verwendete Vorgehensmodell vorgestellt und anschließend je Artefakt die methodische Vorgehensweise sowie die Ergebnisse der Evaluation präsentiert. Die Arbeit schließt mit den Schlussbetrachtungen in **Kapitel neun**. Das Kapitel fasst die Arbeit zusammen und beinhaltet die Untersuchung einer Übertragbarkeit des entwickelten Ansatzes. Ferner werden Grenzen dieser Forschungsarbeit dargestellt und das gewählte Vorgehen kritisch reflektiert. Den Abschluss bildet der Ausblick. Die nachstehende Abbildung 5 fasst die Struktur dieser Arbeit zusammen, skizziert die Inhalte der jeweiligen Kapitel und bildet den Abschluss dieses einführenden Kapitels.

1	Einleitung	
2	Grundlagen System Flugzeug und Konfigurationsprozesse	3
	<ul style="list-style-type: none"> • Lebenszyklus von Flugzeugen • Wertschöpfungskette und Lebenszyklusdaten • Produktstruktur von Flugzeugen • Individualisierungs- und Konfigurationsprozesse 	<ul style="list-style-type: none"> • Grundlagen zur Methode • Ökobilanzen in der Luftfahrtindustrie und Datenquellen
	Zwischenfazit	Zwischenfazit
4	Konzeptioneller Rahmen und Forschungsfragen	
5	Potential-, Bedarfs- sowie Anforderungsanalyse	
	Potentialanalyse des Anwendungsfalls sowie Bedarfsanalyse	Anforderungsanalyse je Artefakt
	Zwischenfazit	
6	Entwicklung Gesamtsystematik	
	Entwicklung des Prozessmodells zur Integration von Zuliefererdaten	Entwicklung der Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode
	Synthese zur Gesamtsystematik mittels Phasenmodell	
7	Softwaretechnische Umsetzung	
	Infrastruktur und Systemarchitektur	Benutzeroberfläche sowie Implementierung
	Zwischenfazit und Diskussion	
8	Anwendung und Evaluation	
	Prototypische Anwendung	
	Evaluation Prozessmodell und Phasenmodell	Evaluation Ökobilanzmethode
		Evaluation Benutzeroberfläche
9	Schlussbetrachtungen	

Abbildung 5: Struktur dieser Arbeit

2 Grundlagen zum System Flugzeug sowie zu Konfigurationsprozessen

In diesem zweiten Kapitel werden notwendige Grundlagen der in Kapitel 1 identifizierten Themengebiete dieser Arbeit dargestellt. Zunächst wird der typische Lebenszyklus in der Luftfahrtindustrie aufgezeigt (Abschnitt 2.1). Darauf aufbauend folgt eine Darstellung der Wertschöpfungskette in der Luftfahrtindustrie sowie die Definition des Begriffs der Lebenszyklusdaten (Abschnitt 2.2). Im Weiteren wird das Flugzeug anhand seiner Produktstruktur vorgestellt und eine Modularisierung eingeführt (Abschnitte 2.3 und 2.4). Abschließend wird der in dieser Arbeit betrachtete Konfigurationsprozess im Allgemeinen dargelegt (Abschnitt 2.5) und anschließend für Flugzeugkabinen spezifiziert (Abschnitt 2.6). Dieses Kapitel schließt mit einem ersten Zwischenfazit in Abschnitt 2.7.

2.1 Lebenszyklen in der Luftfahrtindustrie

Der Lebenszyklus im Kontext von Umweltbewertungen kann allgemein als der gesamte physische Prozess inklusive der Nutzungs- und Verwertungsphase verstanden werden. Damit umfasst er alle Phasen, welche umweltrelevante Vorgänge enthalten (Kloepffer 2008). Im Gegensatz zum weiter gefassten Forschungsfeld des Produktlebenszyklusmanagements (engl.: Product-Lifecycle-Management, kurz.: PLM) werden bei dem hier verwendeten Begriff des Lebenszyklus entsprechend keine angrenzenden Themengebiete aus dem PLM dargestellt. Das Produktlebenszyklusmanagement als weit gefasster Begriff berücksichtigt neben der hier gegebenen Definition für den Lebenszyklus auch weitere Bereiche (Herrmann 2009). Diese fokussieren insbesondere unternehmensinterne Prozesse wie beispielsweise Gegenstände des After-Sales oder des Produktionsmanagements. Ziele sind dabei einheitliche Datenmodelle und ein ganzheitliches Wissensmanagement (Westkämper 2013).

Dennoch lassen sich sowohl bei der Begriffsdefinition als auch der Beschreibung eines idealisierten Lebenszyklus für die Luftfahrtindustrie im Rahmen dieser Arbeit Überschneidungen zum PLM feststellen. So wird bei der ökologischen Bewertung auch in der Luftfahrtindustrie von einigen Autoren die Phase der Produktentwicklung als Teil des zu betrachtenden Lebenszyklus definiert (Ilg 2015; Johanning 2017). Berücksichtigung finden, wie in Abbildung 6 dargestellt, neben dem Flugzeug oftmals auch angrenzende Entitäten wie Flughäfen als notwendige Infrastruktur sowie der Lebenszyklus des Treibstoffes für den Betrieb von Flugzeugen (Melo et al. 2020). Für die Beschreibung der Luftfahrtindustrie lassen sich somit drei grundlegende Lebenszyklen darstellen: Erstens der des Flugzeugs, dessen Funktion darin besteht, Passagiere und Fracht zu transportieren. Zweitens der des Flughafens, der die notwendige Infrastruktur für die Abfertigung von Passagieren und Fracht bereitstellt und Starts- sowie Landungen ermöglicht (Postorino et al. 2019). Drittens der Lebenszyklus des Kraftstoffes, der die notwendige Energie für den Betrieb des Flugzeugs bereitstellt (Kroyan et al. 2022). Nachfolgend werden für alle drei Systeme die Lebenszyklen näher erläutert und insbesondere der Lebenszyklus des Flugzeugs als Kerngegenstand spezifiziert.

Der Lebenszyklus von Flughäfen beginnt mit der Gewinnung von Rohstoffen und der Produktion von Teilkomponenten und dem anschließenden Bau der Infrastruktur (Melo et al. 2020). Zudem kann der Transport von Komponenten als Teil des Lebenszyklus verstanden werden. Während der Betriebsphase werden notwendige Wartungs- und Reparaturarbeiten durchgeführt und der Flughafen wird als Infrastrukturentität betrieben (Greer et al. 2020). Abschließend erfolgen die Stilllegung und ein Recycling der Komponenten.

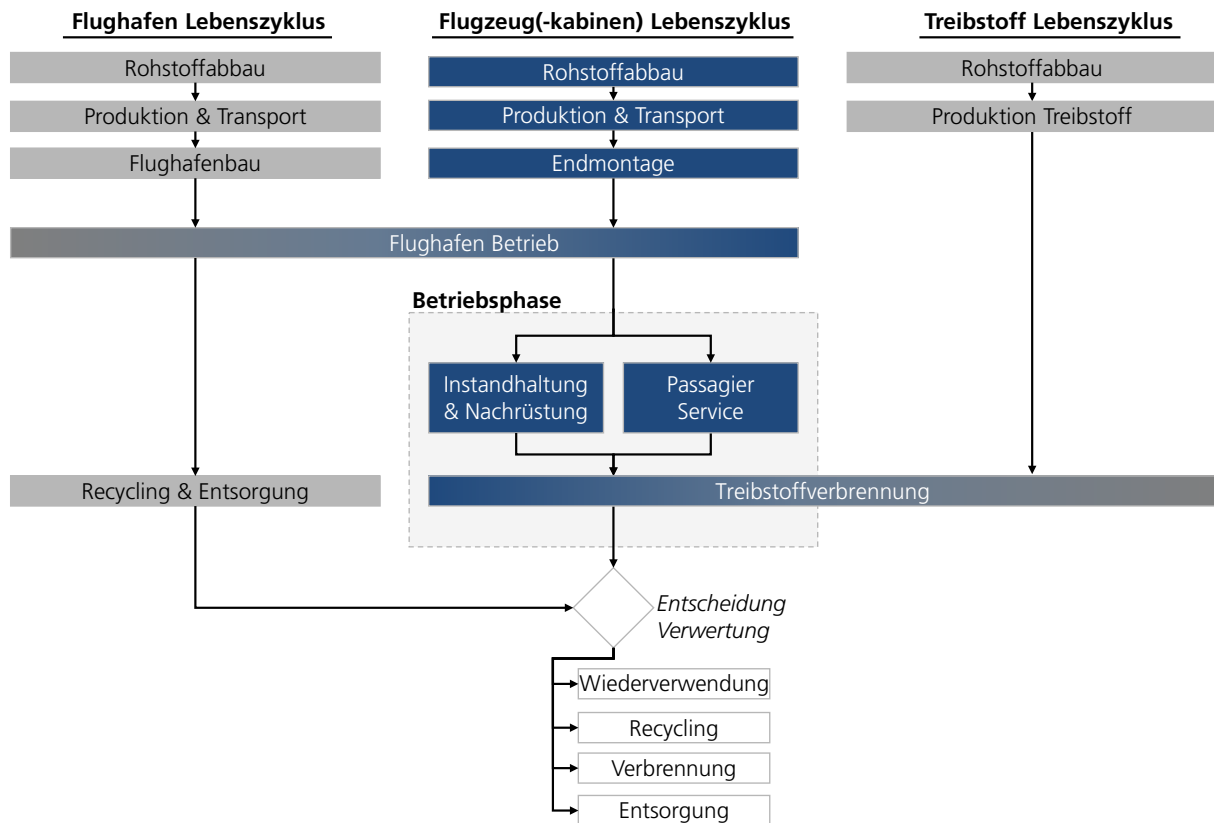


Abbildung 6: Lebenszyklen in der Luftfahrtindustrie (angelehnt an Keiser et al. 2023e; Melo et al. 2020)

Für Flugzeuge startet der Lebenszyklus idealisiert zunächst auch mit der Gewinnung von notwendigen Rohstoffen, welche im folgenden Schritt für die Produktion der notwendigen Komponenten verwendet werden. Inkludiert in diese Phase wird der Transport der Komponenten zur Endmontage. Diese dritte Phase ist der letzte Schritt vor der Betriebsphase und entsprechend ist hier die Schnittstelle zum Endkunden (Fluggesellschaft) zu verorten. Die anschließende Betriebsphase ist für den Lebenszyklus von Flugzeugen von besonderer Bedeutung. Dies bedingt sich erstens durch die hohen sicherheitstechnischen Anforderungen. Zweitens liegt die Lebensdauer von Flugzeugen bei durchschnittlich 25 Jahren (Elsayed et al. 2019). Drittens ist diese Phase für einen Großteil der Emissionen innerhalb des Lebenszyklus verantwortlich (siehe zum Beispiel Johanning 2017; Rupcic et al. 2023). Ausgehend von diesen Rahmenbedingungen lässt sich die Betriebsphase in weitere Teilbereiche untergliedern: Zum einen ist während der Betriebsphase die Wartung sowie Instandhaltung aller Teilsysteme notwendig (Rolinck et al. 2021). Zum anderen ist der Passagierservice während des Fluges als Teil des Lebenszyklus und als Besonderheit in der Luftfahrtindustrie zu verstehen. Ferner ist die eigentliche Treibstoffverbrennung als Teilmenge der Betriebsphase zu verstehen. Der hier beschriebene Lebenszyklus endet abschließend mit der Verwertung und dem Recycling des Flugzeugs (Scheelhaase et al. 2022). Je nach gegebener Flugtauglichkeit sowie ak-

tueller Marktlage können ausgemusterte Verkehrsflugzeuge jedoch zu Frachtflugzeugen umgebaut und so die Lebensdauer gestreckt werden (Sabaghi et al. 2015). Der dritte betrachtete Lebenszyklus stellt den Lebenszyklus der notwendigen Treibstoffe dar. Angefangen bei der Gewinnung der notwendigen Rohstoffe sowie der Produktion und Verteilung endet dieser Lebenszyklus mit der Verbrennung während der Betriebsphase des Flugzeugs.

2.2 Aufbau der Wertschöpfungskette sowie Lebenszyklusdaten

Ausgehend vom beschriebenen Lebenszyklus von Verkehrsflugzeugen ist die Wertschöpfungskette der Luftfahrtindustrie aufgebaut und wird im Folgenden näher beschrieben. Zunächst ist festzuhalten, dass es sich bei der Produktion und dem Betrieb von Verkehrsflugzeugen um ein komplexes Wertschöpfungsnetz handelt und die gesamte Luftfahrtindustrie als *Hightech-Branche* zu bezeichnen ist (Hinsch 2019). Der Vergleich zur Automobilindustrie zeigt sehr lange Entwicklungs- und Produktionszyklen einzelner Derivate sowie eine lange Lebensdauer (von Gleich et al. 2012). Ferner ist durch die Notwendigkeit der luftfahrtechnischen Zulassung und der großen Anzahl an Bauteilen in einem Verkehrsflugzeug (> 2 Millionen Bauteile) eine inhärente Produkt- und Prozesskomplexität gegeben (von Gleich et al. 2012; Yin et al. 2023). Ausgehend von diesen Randbedingungen zeigt sich bei den Flugzeugherstellern (engl.: Original Equipment Manufacturer; kurz: OEM) eine starke Konzentration auf Kernkompetenzen wie der Endmontage bzw. der Systemintegration sowie der damit verbundenen Steuerung der Lieferkette. Die Fertigungstiefe der OEMs sinkt damit immer weiter und es findet ein zunehmendes Outsourcing von Entwicklungsaktivitäten sowie der Produktion von Komponenten durch spezialisierte Zulieferer statt (Hinsch 2019). Im Umkehrschluss gewinnen die spezialisierten Zulieferer immer mehr an Bedeutung für die Entwicklung und Produktion. Dennoch bilden die beiden Flugzeughersteller Boeing und Airbus weiterhin ein bestehendes Duopol, welches durch die Übernahme der jeweils größten Hersteller kleinerer Passagierflugzeuge noch weiter gestärkt wurde (Röhl 2018). Die Flugzeughersteller bilden zudem die Schnittstelle zu den Fluggesellschaften. Diese sind die Betreiber der Flugzeuge und treten als Anbieter von Mobilität auf dem Endkundenmarkt auf. Zu beachten ist hier der Trend zur Auslagerung finanzieller Risiken und der Minimierung der notwendigen Kapitalkosten. Mit diesem Ziel werden Flugzeuge zunehmend über Leasingunternehmen, auch als *Lessors* bezeichnet, bezogen (Wandelt et al. 2023).

Nach der Inbetriebnahme des Flugzeugs sind entlang des Lebenszyklus zur Aufrechterhaltung der Flugfähigkeit umfangreiche Wartungs-, Reparatur- und Überholungsarbeiten notwendig (Ucler und Gok 2015). Hierzu greifen die Fluggesellschaften entweder auf interne Dienstleister zu oder beauftragen externe Servicedienstleister. Diese als MROs (Maintenance, Repair, Overhaul) bezeichneten Unternehmen bieten im After-Sales Markt notwendige Dienstleistungen an: Beginnend bei den vorgeschriebenen Instandhaltungsmaßnahmen bis hin zur Erneuerung der gesamten Flugzeugkabine. Für diesen Markt wird vor dem Hintergrund des allgemeinen Flottenwachstums weiteres Wachstum prognostiziert (Gróf und Kamtsiuris 2021). Neben den technischen Servicedienstleistungen sind für eine möglichst hohe Kundenzufriedenheit weitere Dienstleister für die Servicedienstleistungen während des Fluges notwendig (Rajaratnam und Sunmola 2021). Insbesondere die Bewirtung der Passagiere während des Fluges ist für die Fluggesellschaften hier von Bedeu-

tung. Die Bereitstellung der Speisen sowie notwendiger weiterer Materialien wird von sogenannten *Caterern* mit einer eigenen Lieferkette angeboten (Lin 2018). Den Trend hin zu einer stärkeren Individualisierung beim Endkunden wird auch künftig zu weiteren Wahlmöglichkeiten bei Speisen während des Fluges führen (Mortensen Ernits et al. 2022b). Dies wird zu Auswirkungen auf die Lieferkette haben, zum anderen werden bereits Wechselwirkungen mit Prozessen in der Flugzeugkabine untersucht (Mortensen Ernits et al. 2022a). Abschließend sei auf die Verwerter als letztes Glied in der Wertschöpfungskette der Luftfahrtindustrie hingewiesen (Keiser et al. 2023c). In nachfolgender Abbildung 7 ist die Wertschöpfungskette idealisiert und inklusive aller notwendigen Akteure dargestellt.

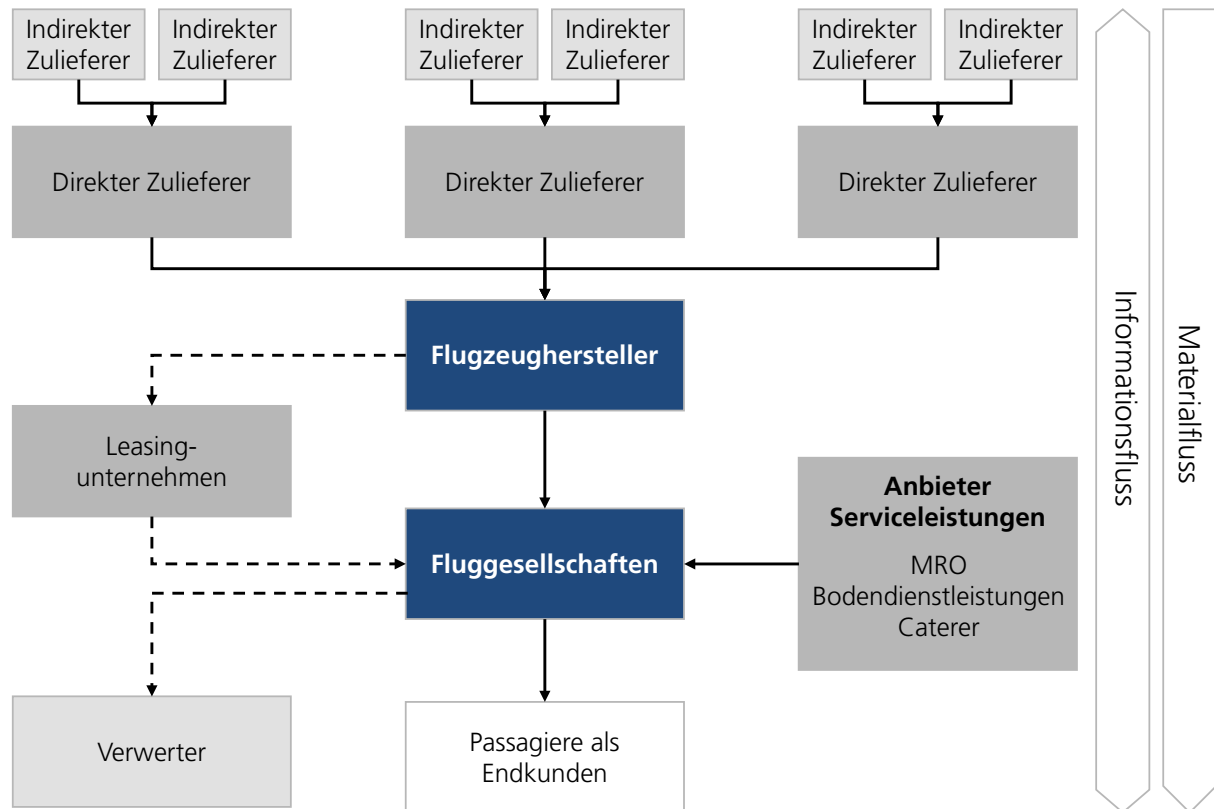


Abbildung 7: Struktur der Wertschöpfungskette in der Luftfahrtindustrie (angelehnt an Ghadge et al. 2018; Hinsch 2019; Tretheway und Markhvida 2014)

Für Bauteile der Flugzeugkabine ist das dargestellte Wertschöpfungsnetz bedingt durch Besonderheiten in der Entwicklung sowie der Beschaffung weiter zu spezifizieren. Im Hinblick auf die Bestandteile der Flugzeugkabine, wie beispielsweise Bordküchen und Sitze, stehen den Fluggesellschaften zunächst zwei Beschaffungsstrategien zur Auswahl: Zum einen können Komponenten der Kabine wie die weiteren Systeme des Flugzeugs über den Flugzeughersteller bezogen werden. Diese als *Seller-Furnished-Equipment* (SFE) bezeichnete Kategorie wird für Standardausrüstungen verwendet und basiert auf verhandelten Verträgen zwischen dem Flugzeughersteller und dessen Zulieferern (Ackert 2013). Zum anderen besteht für Fluggesellschaften die Möglichkeit direkt mit den Lieferanten der Kabinenkomponenten zu verhandeln. Somit besteht in diesem Fall entgegen der idealisierten Darstellung in Abbildung 7 eine direkte Verbindung von Zulieferern zu Fluggesellschaften. Diese so beschafften Komponenten werden als *Buyer-Furnished-Equipment* (BFE) bezeichnet und erfordern ein besonders hohes Maß an Koordination während des gesamten Prozesses (Richter und Witt 2017). Im Gegenzug bestehen für Fluggesellschaften und Zulieferer

Freiheitsgrade sowohl hinsichtlich der Vertragsgestaltung als auch der weiteren Individualisierung von Kabinenkomponenten (Richter und Witt 2017). Für die Kabine zeigen sich somit ein weiterer Komplexitätstreiber sowie eine Fragmentierung und Verteilung von Daten entlang des Lebenszyklus. Im Folgenden soll dies näher dargestellt werden.

Zunächst ist der Begriff *Lebenszyklusdaten* im Kontext dieser Arbeit näher zu definieren. Dies motiviert sich insbesondere durch die verschiedenen Verständnis- und Anwendungsebenen von Daten entlang des Lebenszyklus von Flugzeugen. So werden während des Fluges einer Boeing 787 bis zu 1000 Parameter der Turbinen gleichzeitig überwacht, sodass pro Flugstunde etwa 20 Tera-byte an Daten gespeichert werden (Badea et al. 2018). Diese Datenebene dient zur Steuerung sowie Überwachung des Flugzeugs und folgt nicht der hier zu fokussierenden Definition von Daten. Vielmehr soll im Rahmen dieser Arbeit folgende Definition gelten:

Daten werden im Rahmen dieser Arbeit als **Lebenszyklus- und Produktdaten** verstanden, deren Ziel die Modellierung der Umweltwirkungen in Sinne von Ökobilanzen ist.

Gemäß dieser Definition lassen sich im Verlauf des gesamten Flugzeuglebenszyklus relevante Daten zum Zwecke der Modellierung identifizieren. Beginnend mit den notwendigen Produktions- und Fertigungsprozessen für den Rohstoffabbau und die Produktion der Bauteile. Ferner ist es notwendig die Betriebsphase hinsichtlich des Nutzungsprofils zu modellieren. In der Luftfahrtindustrie ist damit ein durchschnittliches Streckenprofil notwendig. Zudem werden Flugzeuge kontinuierlich während des Betriebs gewartet und insbesondere die Kabine wird während der Lebensdauer eines Verkehrsflugzeugs mehrfach umgerüstet. Hierzu stehen jedoch oftmals keine Daten zur Verfügung (Laukotka et al. 2020). Für die letzte Phase des Lebenszyklus sind abschließend Recycling- und Wiederverwertungsquoten zu bestimmen.

Die Beschaffung dieser Daten ist eine der größten Herausforderungen bei der ökologischen Bewertung und nimmt bis zu 80 Prozent der Ressourcen in Form von Zeit und Kosten bei Modellierungen ein (Miah et al. 2018; Mieras et al. 2019). Diese Datenbeschaffung ist bedingt durch die komplexe Wertschöpfungskette sowie die speziellen Materialien und Fertigungsprozesse in der Luftfahrtindustrie besonders herausfordernd (Keiser et al. 2023e). In Kombination mit der Relevanz für die Zuverlässigkeit der Ergebnisse betont die Literatur immer wieder die Wichtigkeit der Datensammlung, konkrete Rahmenwerke werden jedoch oftmals nicht genannt (Saavedra-Rubio et al. 2022). In der Modellierungspraxis werden daher für die zugrundeliegenden Prozesse für zum Beispiel den Abbau der Rohstoffe sowie die Produktion Datenbanken verwenden. Diese Datenbanken sind von essenzieller Bedeutung für die Modellierung und repräsentieren Durchschnittswerte der Industrien in Bezug auf die generierten Emissionen (Bicalho et al. 2017). Dennoch sind für die Modellierung eine Vielzahl von Datenpunkten notwendig.

2.3 Produktstruktur von Verkehrsflugzeugen

Die Produktstruktur von Verkehrsflugzeugen ist bedingt durch die hohen technischen Anforderungen komplex, lässt sich jedoch übergeordnet anhand der Hauptkomponenten, welche für den

Flugbetrieb notwendig sind, darstellen. Diese Strukturierung der Flugzeugbaugruppen lässt sich angelehnt an die vorgeschlagene Gruppierung des Luftfahrttechnischen Handbuchs (LTH) vereinfacht darstellen und dient zur weiteren Eingrenzung. Das LTH gliedert Großraumflugzeuge zur Analyse der Masse auf oberster Produktebene in zehn Bereiche (Dorbath 2013): Die erste aufgeführte Hauptkomponente stellen die Flügelkomponenten dar, welche zum einen die eigentlichen Flügel beinhalten, aber auch weitere notwendigen technischen Komponenten inkludieren. Der zweite Bereich wird nach LTH als Rumpf bezeichnet und beschreibt den strukturellen Aufbau des Flugzeugs (Dorbath 2013). Die zur vertikalen und horizontalen Manipulation des Flugzeugs notwendigen Leitwerke werden getrennt als Höhenleitwerk und Seitenleitwerk aufgeführt, hier jedoch zusammengefasst und als Höhen- und Seitenleitwerk dargestellt. Weiterhin werden das Fahrwerk sowie die Triebwerksaufhängung jeweils als eigenständige Hauptkomponente dargestellt. Die siebte Hauptkomponente beschreibt das Triebwerk inklusive dessen Teilsysteme. Hauptbaugruppe acht fasst notwendige Flugzeugsysteme wie zum Beispiel die Hilfsturbine (*engl.*: Auxiliary Power Unit, kurz: APU) und Enteisungssystemen zusammen. Bereich neun, die Flugzeugausstattung, umfasst Ausstattungsgegenstände wie Toiletten und die Beleuchtung. Ferner jedoch auch technische Funktionsbauteile wie Bolzen zur Befestigung. Abschließend wird hier auf die Kategorie der Betriebselemente eingegangen. In dieser Kategorie fasst das LTH unter anderem die Passagiersitze und weitere Betriebselemente zusammen (Dorbath 2013). Die Übersicht der vorgestellten und für diese Arbeit vereinfachten Hauptkomponenten sind in Abbildung 8 dargestellt.

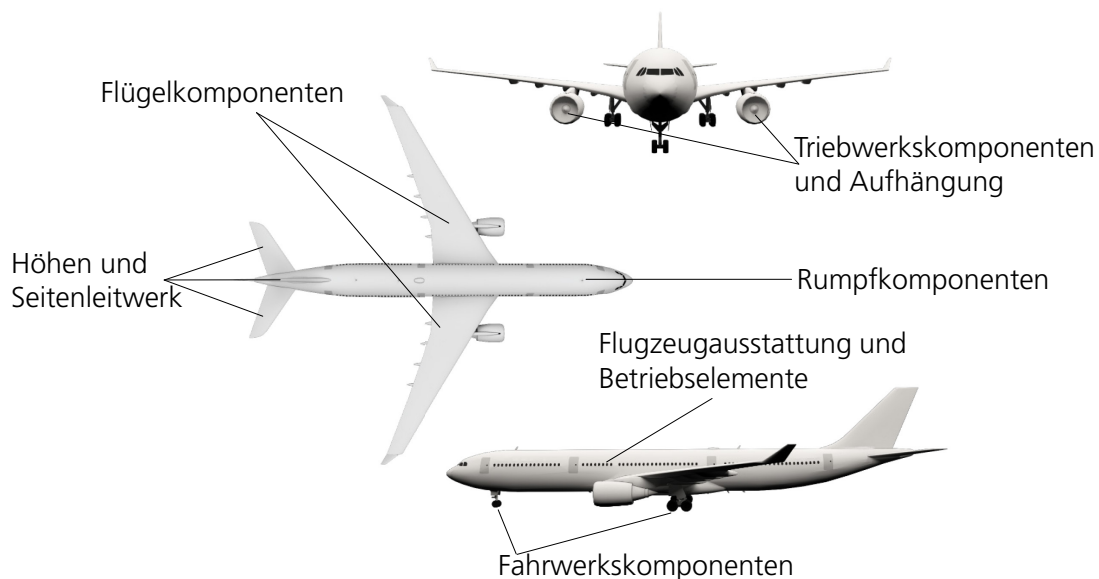


Abbildung 8: Gliederung von Verkehrsflugzeugen nach Hauptkomponenten
(eigene Darstellung angelehnt an Johanning 2017)

Zusammenfassend zeigt die erste Analyse der Hauptkomponenten nach dem LTH den Bedarf für eine weitere Strukturierung des Systems Flugzeug in dieser Arbeit. Dies bedingt sich zum einen durch die hier bisher fehlende Definition der Flugzeugkabine. **Teilkomponenten der Kabine finden sich in der Flugzeugausstattung sowie den Betriebselementen, eine klare Abgrenzung wird jedoch nicht vorgenommen.** Zum anderen ist der Detaillierungsgrad für eine Konfiguration bisher nicht ausreichend. Basierend auf dieser Motivation wird im folgenden Abschnitt auf weitere Möglichkeiten der Modularisierung und Strukturierung der Produktstruktur eingegangen.

2.4 Modularisierung der Produktstruktur

Für die weitere Modularisierung und Strukturierung von Verkehrsflugzeugen ist zunächst der Industriestandard innerhalb der Luftfahrtindustrie zur Unterteilung von Flugzeugsystemen zu nennen. Dieser wurde von der Air Transport Association of America (ATA) entwickelt und ist als ATA-Kapitel oder ATA-Nummernsystem bekannt (Olthoff und Hinsch 2013). Diese funktionspezifische Modularisierung von Flugzeugen findet sowohl in der Entwicklung und Konstruktion als auch bei der Wartung und Dokumentation Anwendung (Klußmann und Malik 2012). Die numerische Klassifizierung der Produktstruktur erlaubt eine Einteilung jedes einzelnen Bauteils bis auf granularer Ebene und erleichtert so die Kommunikation entlang der gesamten Wertschöpfungskette (Klußmann und Malik 2012). Fokus der Nomenklatur ist hier eindeutig die technische Beschreibung von Flugzeugen. Dennoch lässt sich auf oberster Ebene der ATA-Kapitel eine erste Eingrenzung im Hinblick auf die Flugzeugkabine treffen. Die Komponenten der Flugzeugkabine lassen sich demnach in den fünf ATA-Kapiteln 21, 23, 24, 25 sowie 53 verorten (Fuchs et al. 2022). Hierbei werden jedoch auch technische Funktionsbauteile, welche der Rumpfstruktur zuordnen sind (Verweis ATA-Kapitel 53) genannt. Für diese Arbeit ist im Folgenden insbesondere das ATA-Kapitel 25 Ausrüstung und Einrichtung (engl.: Equipment & Furnishings) relevant. Dieses Kapitel beschreibt die für Passagiere relevanten Kernelemente wie Sitze, Bordküchen und Toiletten. In weiteren Unterkapitel wird jedoch auch das Cockpit spezifiziert (Dassault Aviation 2000).

Im Gegensatz zur funktionellen Gliederung der ATA-Kapitel wird von Ilg eine hierarchische Modularisierung von Flugzeugen vorgeschlagen (Ilg 2015). Wie in Abbildung 9 dargestellt, werden vier Ebenen mit zunehmendem Detaillierungsgrad angenommen. Beginnend mit der Produktebene, welche zunächst den Flugzeugtyp (z. B. Airbus A350-900) definiert, beginnt die eigentliche Produktstruktur mit der Modul- und Submodulebene. Diese größte Ebene fasst, ähnlich der ATA-Struktur, größere Teilsysteme zusammen. Nach Ilg kann die Kabine zum Beispiel als ein solches Modul verstanden werden (Ilg 2015). Für die weitere Detaillierung der Module können sogenannten Submodule eingeführt werden. Beispielsweise besteht die Flugzeugkabine aus Submodulen wie Sitzen oder den Bordküchen. Ist ein weiterer Grad an Detaillierung für einzelne Submodule notwendig, werden Baugruppen und Bauteile aufgeführt. Diese als Bauteilebene bezeichnete Ebene ermöglicht die Zuordnung von Baugruppen und Bauteilen zu den Submodulen (Ilg 2015). Wird beispielhaft zur Erläuterung dieser Ebene erneut die Bordküche herangezogen, sind unter anderem Türen sowie Arbeitsflächen aufzulisten. Abschließend wird eine Prozessebene vorgeschlagen. Innerhalb dieser Ebene werden Prozess- und Materialinformationen dargestellt und somit eine produktionstechnische Perspektive eingenommen. Zusammenfassend bietet die hierarchische Modularisierung die Möglichkeit zur Auswahl eines passenden Detaillierungsgrades: Je nach Fragestellung können eine Produktebene fokussiert und entsprechende Informationen gesammelt werden. Mittels der ATA-basierten funktionellen Strukturierung lassen sich die Modul- und Submodule zudem sachlogisch definieren.

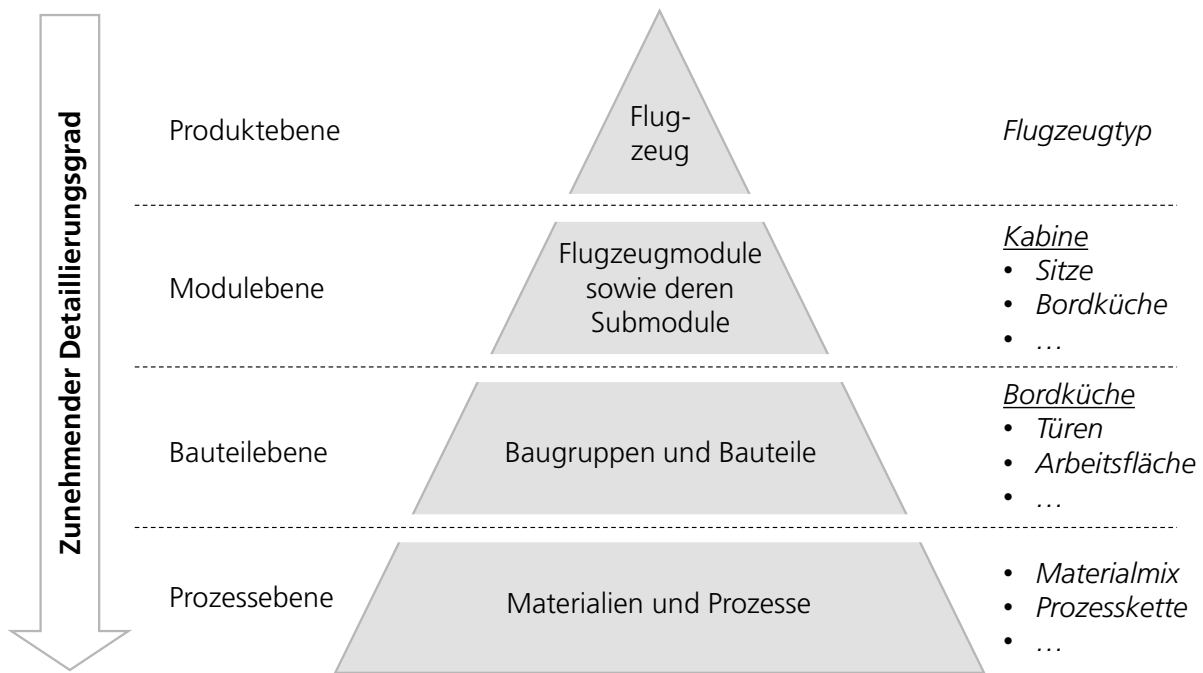


Abbildung 9: Hierarchische Gliederung eines Flugzeugtyps mittels Ebenen (angelehnt an Ilg 2015)

2.5 Individualisierung und Konfiguration von Produkten

Die Individualisierung von Produkten ist als wettbewerbsstrategisches Instrument zur Differenzierung bekannt und gewinnt weiterhin an Bedeutung (Guo et al. 2020; Piller 2004). Der insbesondere im Produktionsmanagement verwendete und erstmalig von Davis definierte Begriff der *Mass Customization* operationalisiert das strategische Konzept der Individualisierung von industriell produzierten Gütern und beschreibt die kundenindividuelle (Massen-)Produktion von Gütern sowie Dienstleistungen (Davis 1987; Piller 2007; Pine et al. 1993). Im Gegensatz zur handwerklichen Fertigung von Produkten fokussiert das *Mass Customization Konzept* stabile Prozessketten mit dem Ziel eine hohe Anzahl an verschiedener Produkten effizient in einem definierten Auswahl- und Lösungsraum für den Kunden bereitstellen zu können (Piller 2007). Für die erfolgreiche Umsetzung dieses Ansatzes sind verschiedenste kritische Erfolgsfaktoren in der Literatur beschrieben und durch Fallbeispiele dargestellt worden (Fogliatto et al. 2012). Aus produktionstechnischer Sicht gehören hierzu insbesondere flexible und rekonfigurierbare Produktions- und Montagekonzepte, welche weiterhin Gegenstand aktueller Forschungsarbeiten sind (Deng et al. 2023). Ferner sind alle Prozessketten inklusive der gesamten Supply Chain so auszulegen, dass eine vom Kunden ausgehende Komplexität überhaupt erst ermöglicht werden kann (Fornasiero et al. 2015). Darüber hinaus sind modulare Produktstrukturen bei der Produktentwicklung notwendig und ein unternehmensinternes Komplexitätsmanagement zwingend erforderlich (ElMaraghy et al. 2013; Koren et al. 2015).

Zentral für die erfolgreiche Umsetzung und damit die Steigerung der Wettbewerbsfähigkeit ist jedoch die Einbindung des Kunden in den Wertschöpfungsprozess (siehe unter anderem Fogliatto et al. 2012; Jost und Süsser 2020; Piller 2004). Die Integration ermöglicht die Anpassung des Produktes auf Basis der individuellen Kundenanforderungen und -bedürfnisse (Theilmann und Hukauf 2014). Diese Wechselbeziehung von Kunde und Anbieter wird in der Literatur auch als

Co-Creation oder *Co-Design* bezeichnet, ist jedoch nicht klar abgrenzt (Handrich und Heidenreich 2013). Je nach Definition greift der Kunde direkt in den Entwicklungsprozess ein und bestimmt so die Produktarchitektur mit. Auf Basis der strategischen Ausrichtung müssen Unternehmen somit entscheiden, welcher Grad der Integration zu wählen ist und wie groß die Freiheitsgrade des Kunden sind. Im Rahmen dieser Arbeit werden integrative Konzepte zur vollumfänglichen Eingliederung von Kunden nicht weiter betrachtet. Dies bedingt sich zum einen durch die Zielstellung dieser Arbeit, welche den Konfigurationsprozess fokussiert und die Entwicklungsprozesse nicht näher untersucht. Zum anderen bieten die gegebenen Rahmenbedingungen in der Luftfahrtindustrie im Vergleich zu anderen Industrien begrenzten Handlungsspielraum. In den folgenden Abschnitten wird dies näher untersucht und dargestellt. Notwendigerweise ist die Kundenintegration jedoch immer so effizient zu gestalten, dass keine Kostennachteile entstehen (Schenk et al. 2012).

Zusammenfassend bietet das Konzept der *Mass Customization* Potenziale zur Differenzierung und findet mittlerweile in verschiedensten Industriesektoren Anwendung (Modrak und Soltysova 2018). Kern für die erfolgreiche Umsetzung ist jedoch die Integration des Kunden. Der Grad der Integration differiert je nach Rahmenbedingung, Unternehmensstrategie und Industriesektor. Ist die Integration auf die Konfiguration der Produkte beschränkt, wird diese in Form eines strukturierten Konfigurationsprozesses umgesetzt. Ergebnis ist ein individualisiertes, auf die Kundenanforderungen angepasstes Produkt.

2.5.1 Konfigurationsprozesse

Die Phase der Konfiguration eines individualisierbaren Produkts im Sinne der *Mass Customization* kann als Prozess beschrieben werden, dessen Historie bis in die 1970 zurückgeht (Zhang 2014). Der Konfigurationsprozess als Folge der zunehmend divergierenden Kundenanforderungen ist damit schon vor dem Konzept der *Mass Customization* beschrieben worden, jedoch erst durch die steigende Anzahl an Varianten und Produkten immer weiter in den Fokus von Industrie und Forschung gerückt (Sabioni et al. 2021). Konzeptionell kann der Konfigurationsprozess wie in Abbildung 10 dargestellt und verstanden werden (Reichwald und Piller 2009). Der Prozess beginnt zunächst mit der Auswahl eines Basisproduktes durch den Kunden. An dieser Stelle ist oftmals bereits eine initiale Kaufentscheidung des Kunden getroffen und die grundlegenden Kundenanforderungen können durch das Produkt erfüllt werden (siehe Kapitel 2.6.2). Auf Basis dieser Kaufentscheidung beginnt der Konfigurationsprozess als gemeinschaftliche Aufgabe von Kunde und Anbieter. Hierbei werden in Form eines strukturierten Prozesses alle notwendigen (Sub-)Module des Basisproduktes konfiguriert. Während der Konfiguration der Module können iterative Rückschritte notwendig sein, da insbesondere bei komplexen Produkten Abhängigkeiten zwischen den Modulen bestehen können. Begleitend zur Konfiguration findet eine Plausibilitätsprüfung der Auswahl statt, sodass keine unzulässigen Konfigurationen umgesetzt werden (Reichwald und Piller 2009). Als Ergebnis wird ein Produkt, das den Kundenwünschen entspricht, an produktionsvorbereitende Abteilungen übergeben. Begleitend zur Konfiguration kann eine visuelle Produktdarstellung die Kommunikation zum Kunden vereinfachen und so die Effizienz des Gesamtprozesses steigern (Shafiee et al. 2023). Ferner lassen sich parallel interne Prozesse wie die Erstellung von Stücklisten integrieren.

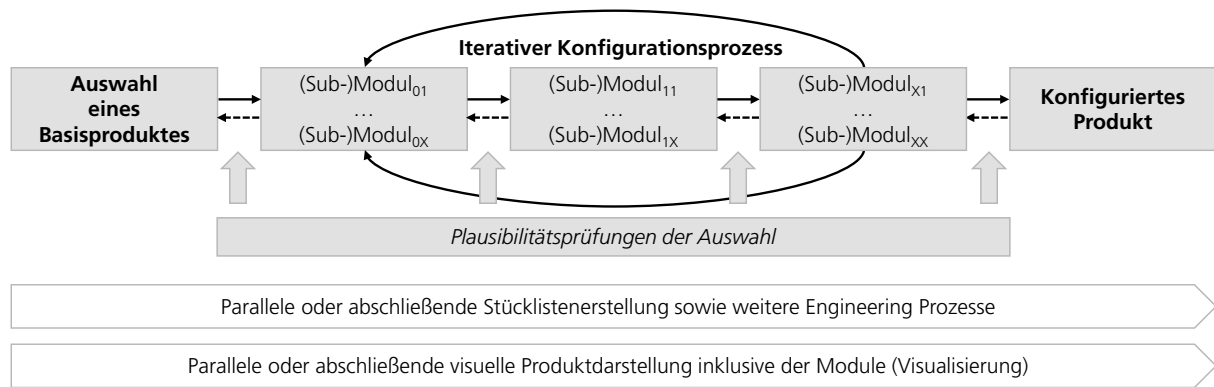


Abbildung 10: Allgemeiner Konfigurationsprozess auf Basis von Modulen (angelehnt an Reichwald und Piller 2009)

Reichwald und Piller weisen abschließend darauf hin, dass dieser Konfigurationsprozess möglichst kurz sein und sich im Vergleich zur handwerklich geprägten Individualfertigung nicht über Wochen erstrecken sollte (Reichwald und Piller 2009). Ausgehend von dieser Forderung sowie des beschriebenen idealisierten Konfigurationsprozesses beschreibt der nächste Unterabschnitt zunächst die Herausforderungen für Unternehmen bei der Umsetzung derartiger Prozesse und stellt technische Systeme zur Unterstützung vor.

2.5.2 Herausforderungen und technische Unterstützung

Die Herausforderungen bei der Umsetzung des beschriebenen Konfigurationsprozesses sind in der Forschung vielfach beschrieben und empirisch untersucht worden (siehe dazu unter anderem Haug et al. 2019; Kristjansdottir et al. 2018; Shafiee et al. 2020). Die Literatur fokussiert im Betrachtungsgegenstand von Konfigurationsprozessen insbesondere Herausforderungen im Zusammenhang mit der Entwicklung von sogenannten Produktkonfigurationssystemen (engl.: Product-Configuration-Systems, kurz: PCS). PCS stellen unterstützende Softwaresysteme dar, welche den Konfigurationsprozess begleiten und mittlerweile in vielen Unternehmen Anwendung finden (Felfering et al. 2014; Shafiee et al. 2020). Die Entwicklung derartiger Systeme erfordert bei variantenreichen Produkten zunächst hochkomplexes technisches sowie prozessbasiertes Wissen (Shafiee et al. 2017), bietet bei erfolgreicher Umsetzung jedoch auch große Potenziale (Gutai et al. 2023). Die Herausforderungen bei der Entwicklung und der Implementierung von PCS werden von Kristjansdottir in sechs Bereiche gegliedert: (1) softwaretechnische Herausforderungen, (2) Modellierung des Produktes, (3) organisatorische Herausforderungen, (4) Einschränkungen bei notwendigen Ressourcen, (5) Herausforderungen ausgehend vom Produkt sowie abschließend (6) den Wissenserwerb für die Entwicklung (Kristjansdottir et al. 2018).

Ausgehend vom Forschungsgegenstand dieser Arbeit werden die dem klassischen Projektmanagement zuzuordnenden Herausforderungen (3), (4) sowie (6) hier nicht näher beschrieben, vielmehr werden relevante Erkenntnisse aus den verbleibenden Bereichen dargestellt. Zunächst sei hier auf die softwaretechnischen Herausforderungen (1) näher eingegangen. Insbesondere wird die Herausforderung hinsichtlich der Entwicklung eines Systems mit hoher Benutzerfreundlichkeit weiter ausgeführt und ferner auf den eigentlichen Softwareentwicklungsprozess eingegangen (Kristjansdottir et al. 2018; Shafiee et al. 2020). Dies bedingt sich durch die Anforderungen, welche an PCS

gestellt werden: Zum einen sind die klassischen Anforderungen wie beispielsweise Kosteneffizienz und ein adäquates Nutzermanagement zu erfüllen. Zum anderen werden jedoch auch spezifische Anforderungen an PCS gestellt. Diese können von Shafiee et al. abgeleitet werden und beinhalten unter anderem die Möglichkeit zur Darstellung der Produktstruktur, eine hohe Flexibilität sowie die Integration von weiteren unternehmensinternen IT-Systemen beziehungsweise Datenbanken (abgeleitet von Shafiee et al. 2017). Die Notwendigkeit zur Modellierung des Produktes (2) stellt eine weitere hier betrachtete Herausforderung dar und lässt sich in die Bereiche Komplexität aufgrund eines fehlenden Überblicks über die Produktstruktur, Korrektheit der Konfiguration gemäß des Produktmodells sowie fehlenden Wissens in Bezug auf die Produktmodellierung zusammenfassen (Kristjansdottir et al. 2018). Das Produktmodell ist somit zwingend als Teil der Entwicklungsstrategie von PCS zu verstehen und mit technischen Modellierungssprachen wie UML (Unified Modeling Language) zu dokumentieren (Haug et al. 2012). Aufbauend auf und in Zusammenhang mit Herausforderung (2) werden abschließend Hürden ausgehend vom eigentlichen Produkt (5) genannt (Kristjansdottir et al. 2018). Die Herausforderungen im Produktbereich werden häufig sowohl mit der komplexen Produktstruktur als auch den kontinuierlichen Veränderungen und Anpassungen beschrieben (Mueller et al. 2022; Shafiee et al. 2020). Bei näherer Betrachtung dieser Herausforderungen wird deutlich, dass sich diese Schwierigkeiten bei der Umsetzung von PCS nicht immer scharf voneinander trennen lassen und insbesondere verschiedene Komplexitätstreiber zu beachten sind. Zielstellung ist dabei immer ein möglichst benutzerfreundliches System, das im Regelfall verschiedene Grundfunktionalitäten umsetzt.

Die Funktionalitäten von PCS können je nach Unternehmen, Strategie, Produkt und Industriesektor divergieren. Von Trentin et al. werden jedoch grundlegende Funktionen auf Basis der verfügbaren Literatur zusammenfassend dargestellt (Trentin et al. 2012): Die Kommunikation der Produktangebote an den Kunden, die Plausibilitätsprüfung sowie die Prüfung der Produktvarianten auf Vollständigkeit, Möglichkeiten zur Bereitstellung von Echtzeitinformationen wie Preis, Kosten, Lieferbedingungen sowie technische Merkmale und ferner die Unterstützung interner Prozesse wie die Erstellung von Angeboten und Produktinformationen (Trentin et al. 2012).

Erste Forschungsarbeiten stellen über diese Funktionalitäten hinaus jedoch auch den **Bedarf zur Integration von ökologischen Aspekten** fest. Zu nennen sind hier unter anderem zwei numerische Ansätze zur modellbasierten Optimierung bereits in der frühen Phase des Produktdesigns (Badurdeen et al. 2018; Tang et al. 2017). Ein weiterer Ansatz stellt einen kundenzentrierten Konfigurationsprozess für additive Fertigungsverfahren vor (Rousseau et al. 2020). Alle drei Beiträge fokussieren damit die Beeinflussung des Designprozesses (*Co-Creation*) und lassen sich nicht direkt in dem hier vorgestellten Konfigurationsprozess verorten. Dennoch zeigen die Forschungsarbeiten ein zunehmendes Interesse im Hinblick auf Möglichkeiten zur Berücksichtigung von Aspekten der Nachhaltigkeit im Kontext von *Mass Customization* und im Speziellen der Produktbeeinflussung.

2.6 Konfigurationsprozess in der Luftfahrtindustrie

Für die weitere Untersuchung des spezifischen Konfigurationsprozesses in der Luftfahrtindustrie sollen hier zunächst die grundlegenden Möglichkeiten zur Individualisierung von Flugzeugen dargestellt werden. Motiviert werden diese durch die starke Produktorientierung des Konfigurationsprozesses. Dieser ist wie bereits dargestellt stark vom Konfigurationsobjekt sowie den zu beachtenden Rahmenbedingungen abhängig. In der Luftfahrtindustrie sind bei der Möglichkeit zur Individualisierung zunächst die Restriktionen hinsichtlich der Zertifizierung und Zulassung von Großraumflugzeugen zu beachten (Eschen et al. 2020; Niță und Scholz 2009). Ausgehend von diesen Restriktionen lassen sich die Möglichkeiten zur Individualisierung eines Flugzeugs in zwei Bereiche gliedern (Ackert 2013): Der eine Bereich trägt zur Markenbildung der Fluggesellschaften bei und ist somit für deren Markenimage entscheidend. Hierzu gehört insbesondere die Flugzeugkabine als Ort des Passagiererlebnisses (Müller et al. 2013). Die Flugzeugkabine ist zudem neben der visuellen Markenbildung entscheidend für den Service während des Fluges (Mortensen Ernits et al. 2022b). Ferner kann die Lackierung von den Fluggesellschaften individuell gestaltet werden. Als weiterer Bereich sind Komponenten des Flugzeugs zu nennen, die den Flugbetrieb betreffen. Hier bestehen für die Flugzeughersteller unter Basis bestehender Industriestandards (siehe dazu etwa ARINC-Standards) Möglichkeiten zur Auswahl verschiedener Ausführungen und Zulieferer (Ackert 2013). Beispiele hierfür sind unter anderem Navigations- und Kommunikationssysteme. Die Auswahl in der Kategorie Flugbetrieb folgt dem strategischen Ziel des optimierten Ersatzteilmanagements. Folglich werden in den Flotten der Fluggesellschaften interne Standards etabliert (Ackert 2013).

Tabelle 2: Möglichkeiten zur Individualisierung von Flugzeugen (angelehnt an Ackert 2013)

Markenbildung	Flugbetrieb
<p>1) Kabine</p> <ul style="list-style-type: none"> • Sitze • Toiletten • Flugzeugküchen • Teppiche • ... <p>2) Lackierung</p>	<p>3) System Optionen</p> <ul style="list-style-type: none"> • Navigationssysteme • Kommunikationssysteme • ...

Zusammenfassend ist eine Individualisierung nach dem Konzept der *Mass Customization* in der Luftfahrtindustrie bisher nur begrenzt möglich. Dies bedingt sich durch die hohen Sicherheitsstandards und die damit verbundenen Zulassungsprozesse in der Luftfahrtindustrie. Möglichkeiten zur Differenzierung bieten sich für Fluggesellschaften zum einen durch die Lackierung und zum anderen insbesondere durch eine **individualisierte Kabine** (Müller et al. 2013). Innerhalb der Kabine bieten sich für die Fluggesellschaften Möglichkeiten zur individuellen Gestaltung sowie zur Anpassung auf das Betriebsmodell. Der dafür notwendige Konfigurationsprozess wird im Folgenden daher näher beschrieben, zunächst werden jedoch weitere Vorüberlegungen zur Kaufentscheidung und den unterschiedlichen Betriebskonzepten der Fluggesellschaften vorgestellt.

2.6.1 Vorüberlegungen zur Konfiguration von Flugzeugkabinen

Vor Beginn des eigentlichen Individualisierungs- und Konfigurationsprozesses wird von den Fluggesellschaften zunächst eine detaillierte Bewertung der Anforderungen auf Basis der strategischen Ausrichtung, des Routennetzwerks sowie der Zielkunden durchgeführt (Oehme 2017). Gegenstand dieser Anforderungsdefinition und der darauffolgenden Kaufentscheidung ist neben der Auswahl eines Flugzeugtyps insbesondere die Flugzeugkabine (Hall et al. 2013). Dies bedingt sich zum einen durch die im vorherigen Abschnitt bereits dargelegte Sonderrolle der Flugzeugkabine. Zum anderen ist die Auslegung der Kabine sowie deren Layout für die Positionierung am Markt und die Preisfindung von hoher Relevanz. Darüber hinaus hat die Auswahl des Layouts auch einen direkten Einfluss auf die Umweltbilanz und ist somit in dieser zu berücksichtigen (Keiser et al. 2023a). Nachfolgend werden daher zunächst die Auswirkungen der Marktpositionierung auf die Kabine näher erläutert.

Die Marktpositionierung von Fluggesellschaften und damit auch die Ausgestaltung der Flugzeugkabinen lässt sich grundlegend in zwei Kategorien gliedern: Die erste Gruppe bilden sogenannte Low-Cost-Carrier (LCC). Diese zeichnen sich durch ein Geschäftsmodell aus, dessen Fokus auf maximale Optimierung aller Prozess und den damit verbundenen Kostenvorteilen liegt (Bachwich und Wittman 2017; Dziedzic und Warnock-Smith 2016). Diese Kostenvorteile können dann durch entsprechende Ticketpreise an den Kunden weitergegeben werden. Die Kabinen von LCC folgen diesem Ansatz und fokussieren eine funktionale Auslegung, sodass die Kabineneffizienz in Form von Anzahl an Sitzen maximiert wird. Zudem werden in der Regel keine Mehrklassenlayouts von LCC umgesetzt (Chiambaretto und Combe 2023). Ferner ist der Service während des Fluges auf ein Minimum beschränkt oder ausschließlich gegen Aufpreis erhältlich. Trotz der Komforteinbußen für den Kunden ist dieses Geschäftsmodell in der Vergangenheit von vielen Fluggesellschaften erfolgreich umgesetzt worden und weiterhin von großer Bedeutung (Efthymiou und Christidis 2023). Diesem Geschäftsmodell steht das Konzept der sogenannten Full-Service-Carrier (FSC) gegenüber. Diese fokussieren vornehmlich den Komfort der Passagiere sowie einen guten Kundenservice (Bitzan und Peoples 2016). Die Kabinen von FSC bieten mit einer entsprechen geringeren Bestuhlung pro Flächeneinheit mehr Raum und Komfort für den einzelnen Passagier. Zudem bieten FSC mittels Mehrklassenlayouts für den Passagier weitere Wahlmöglichkeiten hinsichtlich des Komforts. Weiterhin sind die Komponenten der Kabine stark auf die Kundewünsche ausgelegt, sodass in die Sitze etwa Unterhaltungssysteme und weitere Komfortfunktionen integriert sind. Ferner ist das Angebot während des Fluges sehr breit und der Passagier kann zwischen verschiedensten Mahlzeiten und Getränken wählen (Magdalena und Bouzaima 2021). Diese auf Komfort ausgelegte Strategie führt zu deutlich komplexeren Kabinen sowie Prozessen während des Betriebs.

Neben den Vorüberlegungen zur Marktpositionierung der Fluggesellschaften sind die technische Perspektive sowie die der Umweltbilanz im Kontext der Flugzeugkabine zu berücksichtigen. Zunächst sind die technischen Innovationszyklen für die Kabine bzw. deren Komponenten deutlich kürzer als bei anderen strukturellen Flugzeugmodulen wie zum Beispiel für den Rumpf (Bahns et al. 2013). Dies bedingt sich insbesondere durch die Möglichkeit zur Integration neuartiger Konzepte in bestehende Flugzeugtypen, ohne dass eine völlige Neuentwicklung notwendig ist. Vo-

raussetzung für diese inkrementelle Weiterentwicklung ist jedoch die Berücksichtigung bestehender Standards. Beispiele für neuartige Kabinenkomponenten und Konzepte werden daher in Forschung und Praxis immer wieder diskutiert (siehe dazu u.a. Hall et al. 2013; Hanna et al. 2020, 2021; Mortensen Ernits et al. 2022a). Aus Perspektive der Umweltbilanz bietet die Kabine damit vergleichsweise **kurzfristige Potenziale** zur kontinuierlichen Verbesserung durch technische Innovationen. Die Entwicklung eines völlig neuen Flugzeugkonzepts ist hierzu nicht notwendig. Ferner können Anpassungen wie zum Beispiel die Änderung der Bestuhlung sofort umgesetzt und damit die Umweltbilanz verbessert werden (Tsai et al. 2014). Im Kontext des Konfigurationsprozesses ist diese Komplexität zu berücksichtigen, sodass zum einen der gesamte Lösungsraum zur Verfügung steht. Zum anderen jedoch auch ein transparenter und strukturierter Prozess erhalten bleibt.

2.6.2 Konfigurationsprozess von Flugzeugkabinen

Ausgehend von den dargelegten Vorüberlegungen zur Konfiguration von Flugzeugkabinen kann der Konfigurationsprozess zunächst in einem sequenziellen Ablauf verortet werden, welcher auch als sogenannter *Fulfill Customer Order Process* (FCO) in der Luftfahrtindustrie bezeichnet wird (Oehme 2017). Dieser aus fünf Schritten bestehende Prozess beschreibt den Prozess vom Beginn des Verkaufs- und Verhandlungsprozesses bis hin zur Auslieferung eines Flugzeugs. Ziel des Prozesses ist die zeit- und qualitätsgerechte Lieferung eines individualisierten und konfigurierten Flugzeugs an eine Fluggesellschaft (Oehme 2017). Hierzu beginnt der Prozess zunächst mit einer Verkaufskampagne des Flugzeugherstellers oder der Anfrage einer Fluggesellschaft. Gründe für Fluggesellschaften für den Kauf von neuen Flugzeugen können zum Beispiel die kontinuierliche Erneuerung der Flotte oder die Ausweitung des Flugroutennetzes sein (Oliveira et al. 2022). Gegenstand dieses ersten Schrittes sind Verhandlungen der beiden Vertragspartner auf Basis einer Standardspezifikation der Flugzeugtypen. Die Kabine wird während der Verhandlungen durch eine sogenannte LOPA (engl.: *Layout of Passenger Accommodations*) repräsentiert (Oehme 2017). Als LOPA wird ein Standardkabinenlayout bezeichnet, welches als Ergebnis von Schritt eins in den Flugzeugkaufvertrag einfließt. Mit dem Flugzeugkaufvertrag beginnt der zweite Schritt, die eigentliche Konfiguration und Individualisierung der Flugzeugkabine. Diese beginnt üblicherweise mit einem einleitenden Termin der notwendigen Teams von Fluggesellschaft sowie Flugzeughersteller (Oehme 2017) und endet mit einer sogenannten *Head of Version* (HOV). Die HOV bezeichnet die auf Basis der Kundenanforderungen spezifizierte Kabine und schließt den Konfigurationsprozess ab. (Burgin et al. 2018; Oehme 2017). Mit der HOV wird zudem der Flugzeugkaufvertrag finalisiert und kann zunächst nicht mehr angepasst werden. Dieser Schritt hin zu einer HOV wird in der Praxis auch als *Customization-Prozess* bezeichnet (Songbin et al. 2016). In Schritt drei werden notwendige vorbereitende Schritte des Flugzeugherstellers unternommen, um mit der Produktion und Montage beginnen zu können. Dies inkludiert unter anderem auch die notwendige Validierung der Konfiguration (Markusheska et al. 2022). Möglich sind hier iterative Rückschritte zu Schritt zwei. Als Ergebnis und notwendige Bedingung für die Produktion sind alle notwendigen Dokumente wie Stücklisten und Zeichnungen erstellt. Damit beginnt die Produktion und abschließend die Endmontage des Flugzeugs auf Basis der gewählten Spezifikationen. Nach der Endmontage wird der Übergabeprozess des Flugzeugs initiiert und Schritt fünf, die Auslieferung, beginnt. Hierzu stehen bei den Flugzeugherstellern Auslieferungszentren zur Verfügung. Der

letzte Meilenstein ist der Eigentumsübergang vom Hersteller auf die Fluggesellschaft. Der beschriebene FCO Prozess ist in Abbildung 11 dargestellt, im Folgenden wird der Konfigurationsprozess näher beschrieben.

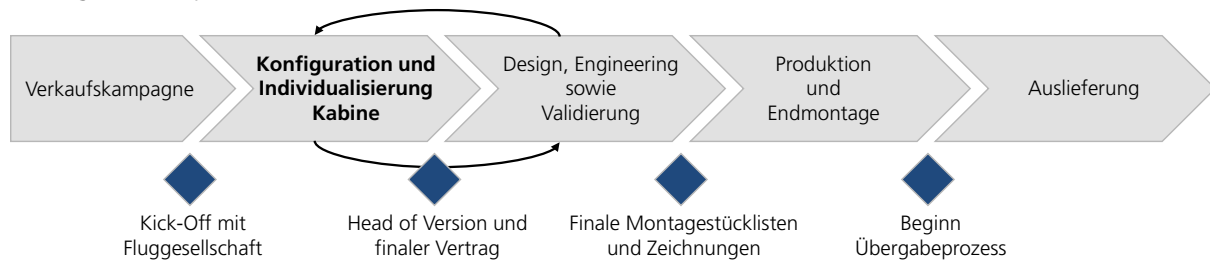


Abbildung 11: Verortung des Konfigurationsprozess der Flugzeugkabine im FCO-Prozess (angelehnt an Oehme 2017)

Wie bereits angedeutet ist es für die Fluggesellschaft bis weit nach der ersten Vertragsunterzeichnung möglich, Anpassungen an der Flugzeugkabine vorzunehmen (Richter und Witt 2017). Der Konfigurationsprozess zeichnet sich dabei durch eine hohe Interaktion von Fluggesellschaft und Flugzeugherstellern aus und ist bei beiden großen Herstellern von zivilen Verkehrsflugzeugen (Boeing, Airbus) ähnlich (Ma et al. 2013). Während des Konfigurationsprozesses kann die Fluggesellschaft zunächst mithilfe eines *Konfigurationsguides* und der Unterstützung des Flugzeugherstellers aus einem Katalog an Optionen für die Kabine auswählen (Calvo Narváez und Monroy 2009). Es ist jedoch auch möglich technische Änderungen vorzunehmen, die zusätzlich vom Flugzeughersteller oder den Zulieferern speziell entwickelt werden müssen (Richter und Witt 2017). Die Beschaffung der Kabinenbauteile erfolgt dabei entweder durch den Flugzeughersteller (SFE) oder wie in Abschnitt 2.2 dargestellt direkt durch die Fluggesellschaft (BFE). Unabhängig von der Beschaffungsart liegt der Konfigurationsprozess in der Gesamtverantwortung des Flugzeugherstellers. Bedingt durch den hohen Komplexitätsgrad des Konfigurationsprozesses integrieren die Hersteller mittlerweile technische Systeme in den Konfigurationsprozess (Fuchte 2014; Moerland-Masic et al. 2021), um zum einen effiziente interne Unternehmensprozesse sicherzustellen und zum anderen den Kundenkontakt zu optimieren. Zu diesem Zweck wurde von Airbus auch das Konzept des Customer-Definition-Centre (CDC) umgesetzt (Airbus Group 2019). Das CDC unterstützt den Konfigurationsprozess der Kabine und bietet die Möglichkeit zur Prüfung der definierten Spezifikation (Moerland-Masic et al. 2021). Der Konfigurationsprozess führt dazu, dass jede Head of Version als einzigartig bezeichnet werden kann und speziell auf Basis der Anforderungen der jeweiligen Fluggesellschaft konfiguriert wird (Bahns et al. 2013). Ein beispielhaftes Kabinenlayout ist in Abbildung 12 dargestellt.

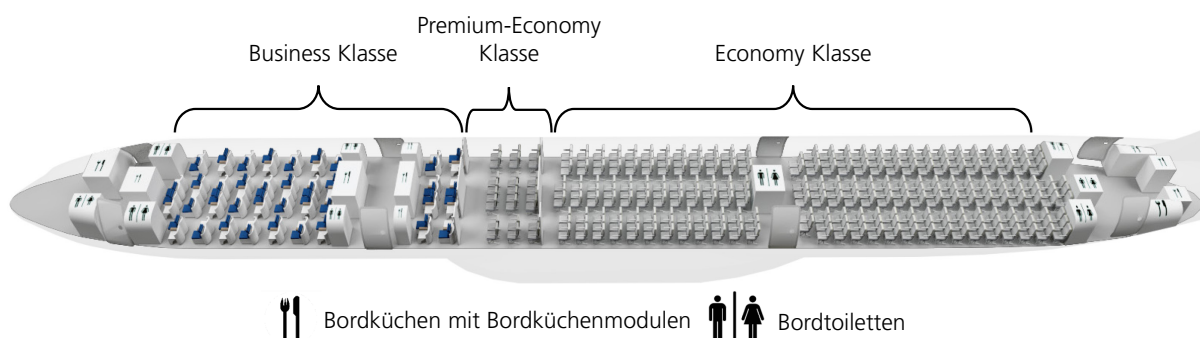


Abbildung 12: Beispielhafte Flugzeugkabine eines A350 (eigene Darstellung auf Basis einer konfigurierten Kabine mit Airbus SE 2023)

Zusammenfassend ist das Ergebnis und wichtiger Meilenstein des Konfigurationsprozesses die Head of Version einer Flugzeugkabine. Diese definiert das grundlegende Kabinenlayout (etwa die Anzahl der Sitze und Anzahl an Klassen) und alle weiteren Module sowie Submodule (zum Beispiel Bordküchen sowie deren Ausstattungen). Ferner sind die Zulieferer am Ende des Prozesses bestimmt. Die Konfiguration der Kabine ist im Lebenszyklus eines Flugzeuges hierbei nicht als einmaliges Ereignis, sondern vielmehr als wiederkehrende Aufgabe zu verstehen. Im Zuge von Kabinenumrüstungen (engl.: Retrofits) werden von den Fluggesellschaften oder Leasingunternehmen einzelne Komponenten oder sogar gesamte Kabinen erneuert (Laukotka und Krause 2023; Niță und Scholz 2011). Dieser Prozess kann, im Gegensatz zur initialen Konfiguration, unabhängig vom Hersteller durchgeführt werden und führt zu großen Herausforderungen beim Datenmanagement entlang des Lebenszyklus eines Flugzeuges (Laukotka et al. 2020)

2.7 Zwischenfazit

Als erstes Zwischenfazit dieser Arbeit lassen sich die Erkenntnisse aus diesem Kapitel in die drei Bereiche Lebenszyklus und Wertschöpfungskette, Grundlagen zum System Flugzeug sowie den beschriebenen Konfigurationsprozess gliedern.

Die **Wertschöpfungskette in der Luftfahrtindustrie** folgt der inhärenten Produkt- und Prozesskomplexität und ist in ein Wertschöpfungsnetz mit spezialisierten Zulieferern eingebettet. Im Zentrum der Wertschöpfungskette stehen, trotz der geringen Fertigungstiefe weiterhin die Flugzeughersteller mit einer direkten Schnittstelle zu den Fluggesellschaften. Die Beschaffung von Kabinenkomponenten ist hier als Ausnahme zu nennen, da bei den Komponenten, die nach der BFE-Strategie beschafft werden, direkte Verhandlungen von Zulieferern und Fluggesellschaften stattfinden. Der Lebenszyklus von Flugzeugen fokussiert insbesondere die Betriebsphase. Nach der Inbetriebnahme wird die Betriebsphase von Flugzeugen durch weitere spezialisierte Stakeholder wie MRO und Caterer flankiert. Diese werden von Fluggesellschaften beauftragt, um zum einen die Flugfähigkeit aufrechtzuerhalten und zum anderen die Erwartungen der Passagiere zu erfüllen. Entlang des gesamten Lebenszyklus fallen verschiedenste Daten an. Diese als Lebenszyklusdaten bezeichneten Datensätze beziehen sich im Zuge dieser Arbeit auf notwendige Daten zur Bewertung der Umweltbilanz. Herausfordernd ist hier, dass bisher kein zentraler Datenraum für derartige Daten existiert und die Daten dezentral von den Stakeholdern gespeichert und nicht oder nur bedingt ausgetauscht werden.

Das **System Flugzeug als komplexes technisches System** lässt sich anhand der Hauptkomponenten darstellen und gliedern. Hierzu stehen in der Literatur sowie der Praxis verschiedene Möglichkeiten zur Verfügung. Zunächst besteht die Möglichkeit zur Strukturierung anhand der jeweiligen Funktionen. Diesem Vorgehen folgt der ATA-Standard in der Luftfahrtindustrie. Als möglicher weiterer Ansatz wird in der Literatur eine hierarchische Modularisierung der Kabine vorgeschlagen. Das Flugzeug wird hierzu in Module und Submodule kategorisiert. Die Flugzeugkabine kann als ein solches Modul verstanden werden und deren Einbauten als sogenannte Submodule. In Kombination mit dem ATA-Kapitel 25 lässt sich für die weitere Entwicklung eine produktseitige Eingrenzung des Betrachtungsgegenstandes vornehmen.

Als abschließendes Zwischenfazit ist der **Konfigurationsprozess der Flugzeugkabine** zu nennen. Dieser lässt sich im Fulfill-Customer-Order Prozess der Flugzeugindustrie verorten und muss die Produktkomplexität sowie die Rahmenbedingungen der Luftfahrtindustrie abbilden. Ziel des Konfigurationsprozesses ist eine auf die Anforderungen der Fluggesellschaft individualisierte Kabine entsprechend dem Konzept der Mass Customization. Der Kabine kommt dabei eine besondere Rolle zu, da sie erstens von hoher Relevanz für die Markenbildung der Fluggesellschaften ist und zweitens vergleichsweise viele Freiheitsgrade zur individuellen Gestaltung und Anpassung von Flugzeugen ermöglicht. Der Konfigurationsprozess führt im Ergebnis zu individuellen Flugzeugkabinen auf Basis der strategischen Ausrichtung der Fluggesellschaften und berücksichtigt damit auch deren Geschäftsmodelle. Eine ökologische Bewertung der Konfiguration findet bisher nicht statt. Der allgemeine Stand der Forschung zu Konfigurationsprozessen von komplexen Produkten und Dienstleistungen zeigt jedoch erste Ansätze zur Integration von Umweltbilanzen.

3 Stand der Forschung zur Ökobilanzierung

In diesem Kapitel wird der Betrachtungsgegenstand der Ökobilanzierungen zunächst grundlegend dargestellt (Abschnitt 3.1). Zudem werden notwendige methodische Voraussetzungen für die weitere Arbeit geschaffen. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 3.2 der Stand der Forschung zu Ökobilanzierungen in der Luftfahrtanalyse systematisch analysiert und in Abschnitt 3.3 notwendige Datenquellen eingeführt. Dieses Kapitel schließt mit einem weiteren Zwischenfazit zum Stand der Forschung in Abschnitt 3.4.

3.1 Grundlagen zur Methode

Der Begriff der Ökobilanz wird im allgemeinen Sprachgebrauch auch als Umweltbilanz oder Lebenszyklusanalyse (engl.: Life Cycle Assessment; kurz: LCA) bezeichnet und fokussiert die ganzheitliche Analyse der Umweltwirkungen von Produkten und Dienstleistungen (Frischknecht 2020). Damit ist die Methode der Ökobilanzierung zunächst klar von dem aus der Betriebswirtschaft bekannten Begriff des *Produktlebenszyklus* abzugrenzen, welcher den Reifegrad eines Produkts bezogen, auf dessen Phase im Markt beschreibt und als Werkzeug unter anderem im Marketing verwendet wird (Döring 2007). Vielmehr ist die Methode der Ökobilanzierung ein transdisziplinäres Werkzeug deren Ursprünge sind in den späten 60er-Jahren des vergangenen Jahrhunderts verorten lassen (Viberg und Mattnrro 1996; Guinée et al. 2011). Motiviert wurden diese als Vorgänger zu bezeichnenden Methoden der heutigen Ökobilanz durch zunehmende gesellschaftliche Diskussionen im Hinblick auf Umweltverschmutzungen sowie Energie- und Ressourcenknappheit (Bjorn et al. 2018). Der heute im englischen bekannte Begriff des Life Cycle Assessments setzte sich in den 90er-Jahren durch (Viberg und Mattnrro 1996) und stellt zudem den Beginn einer Dekade von methodischer Konsolidierung und Standardisierung dar (Guinée et al. 2011). Notwendig wurde dies zum einen durch eine zunehmende Anwendung von Ökobilanzen sowie verwandter Methoden zur Analyse von Umweltwirkungen (Bjorn et al. 2018). Zum anderen wurden von Wissenschaftlern immer neue Methoden entwickelt, deren Vergleichbarkeit in der Ergebnisdarstellung bedingt durch eine fehlende Harmonisierung nur eingeschränkt gegeben war.

Heute stellt die Methode der Ökobilanz eine **wissenschaftlich anerkannte und in vielen Bereichen angewendete Methode** dar (Li et al. 2023). Ausgehend von der klassischen Ökobilanz wurden die Untersuchungsgegenstände, Ziele und Systemgrenzen in den vergangenen Jahren jedoch fortwährend erweitert und angepasst (siehe z.B.: Andes 2019; Samani 2023). Im folgenden Abschnitt wird daher zunächst eine Abgrenzung vorgenommen und darauf aufbauend die heute wissenschaftlich akzeptierte Vorgehensweise dargestellt.

3.1.1 Abgrenzung der Methode

Die Ökobilanz ist als eine von vielen zur Verfügung stehenden Methoden im Kontext der Bewertung von Umweltauswirkungen zu verstehen (Frischknecht 2020), entsprechend wird in diesem Abschnitt eine Einordnung und Abgrenzung zu verwandten Methoden beschrieben. Zur Einordnung der verschiedenen Instrumente und Methoden im Kontext der Nachhaltigkeitsbewertung

lassen sich die zwei Kriterien **Größe des Analyseobjektes** sowie die **bewertete Nachhaltigkeitsdimension** verwenden (siehe dazu u.a. Andes 2019; Frischknecht 2020; Zimmer 2016). Mit diesen beiden Kriterien als Achsen kann die in Abbildung 13 dargestellte Matrix aufgespannt werden. Hierbei ist für das Kriterium Größe des Analyseobjektes zunächst die *Produkt-, Dienstleistungs- sowie Prozessebene* zu nennen. Diese unterste Ebene beschränkt sich zumeist auf einzelne Unternehmen bzw. Produktsysteme und fokussiert im Regelfall keine größeren Netzwerke. Größere Netzwerke wie Branchen oder Gemeinden fallen in die zweite Ebene und werden als *Mesoebene* bezeichnet. Über dieser Ebene folgt eine *volkswirtschaftliche Analyseebene*, welche ganze Länder oder Region zum Analysegegenstand macht. Das Kriterium bewertete Nachhaltigkeitsdimension leitet sich aus dem Nachhaltigkeitsdreieck ab und gliedert sich in die Dimensionen *Ökologie, Ökonomie* und *Sozial*. In den Schnittmengen der beiden Kriterien lassen sich, wie dargestellt, Methoden und Werkzeuge zur Analyse einordnen.

Auf der volkswirtschaftlichen Ebene sowie der Mesoebene werden sogenannte *Top-Down-Ansätze* zur Modellierung verwendet. Diese zeichnen sich durch einen breiten Betrachtungsraum aus und bieten zumeist keine Möglichkeit zur detaillierten Analyse von Teilbereichen (Zimmer 2016). Durch den methodischen Einsatz von Input-Output-Analysen (engl.: Environmental Extended Input Output Analysis, kurz: EEIO bzw. SEIO) können für Branchen oder Regionen parametrisierbare Modelle entwickelt werden. Diese bieten unter anderem die Möglichkeit, besonders kritische Industrien zu identifizieren und können so für die politische Entscheidungsbildung genutzt werden. Derartige übergreifende Modelle werden von großen Organisationen oder Forschungseinrichtungen wie zum Beispiel dem Statistischen Bundesamt in Auftrag gegeben und erstellt (Andes 2019). Diese Ansätze fokussieren im Gegensatz zu produkt- und prozessorientierten Analysen somit keine einzelnen Unternehmen oder Produkte. Hierzu sind *Buttom-Up-Ansätze* notwendig, welche sich durch eine deutlich detailliertere Datenbasis auszeichnen und zumeist mit einer produkt- oder prozessbezogenen Fragestellung initiiert werden. Für die ökologische Dimension stellt die Ökobilanz weiterhin den methodischen Stand der Forschung dar. Für die ökonomische Dimension des Nachhaltigkeitsdreiecks kann die Lebenszykluskostenrechnung (engl.: Life Cycle Costing) Verwendung finden. Gegenstand derartiger Untersuchungen ist die Berechnung aller anfallenden Kosten über den gesamten Lebenszyklus (Korpi und Ala-Risku 2008). Integriert werden hier somit auch Kosten für Instandhaltung und Entsorgung. In der dritten Dimension ermöglichen Sozialbilanzen die Untersuchung von sozialen Auswirkungen. Dieses relativ junge Forschungsfeld ist von zunehmender Bedeutung, derzeit fehlt es jedoch noch an Standards und Richtlinien (Ramos Huarachi et al. 2020). Werden im Zuge einer Analyse alle drei Dimensionen untersucht, kann von einer Nachhaltigkeitsbewertung gesprochen werden (Kloepffer 2008). Diese, als Life Cycle Sustainability Assessment (LCSA) bezeichnete Methode aggregiert alle Teilergebnisse und ermöglicht einen holistischen Blick auf Produkte und Dienstleistungen (Backes und Traverso 2022).

	Ökologisch	Ökonomisch	Sozial
Volkswirtschaftliche Ebene	Umweltökologische Gesamtrechnungen	Volkswirtschaftliche Gesamtrechnungen	Sozialökologische Gesamtrechnungen
Mesoebene (z.B. Branchen, Regionen)	Ökologische Input-Output-Analysen (EEIO)	Input-Output-Analysen	Soziale Input-Output-Analysen (SEIO)
Produkt- Prozess- und Dienstleistungsebene	Ökobilanz	Lebenszykluskostenrechnung	Sozialbilanz

Abbildung 13: Übersicht der Dimensionen zur Bewertung der Nachhaltigkeit zur Einordnung und Abgrenzung der Ökobilanzmethode (angelehnt an Andes 2019; Guinée et al. 2011a; Zimmer 2016)

Zusammenfassend kann festgehalten werden, dass Ökobilanzen für die ökologische Bewertung von Produktsystemen geeignet und klar von anderen Methoden abzugrenzen sind. Zudem bietet die Ökobilanz die methodischen Grundlagen zur Erweiterung der Analysen in weitere Nachhaltigkeitsdimensionen.

3.1.2 Vorgehensweise

Im Zuge der Bemühungen zur Standardisierung und Harmonisierung von Ökobilanzen wurde die DIN EN ISO 14040-14044 Normenreihe entwickelt und kontinuierlich erweitert (DIN EN ISO 14040 2009; DIN EN ISO 14044 2006). Als Ergebnis hat sich die in Abbildung 14 dargestellte iterative und aus vier Schritten bestehende Vorgehensweise als Rahmen für die Durchführung von Ökobilanzen etabliert.

In der ersten Phase wird das Ziel und der Untersuchungsrahmen (engl.: Goal and Scope Definition) inklusive des zu betrachtenden Produktsystems festgelegt. Innerhalb der zweiten Phase erfolgt die Aufstellung der sogenannten Sachbilanz (engl.: Life Cycle Inventory; kurz: LCI). Innerhalb dieses Schrittes werden alle ein- und ausgehenden stofflichen und energetischen Flüsse des im vorherigen Schritt definierten Produktsystems ermittelt. In der dritten Phase wird die Wirkungsabschätzung (engl.: Life Cycle Impact Assessment; kurz: LCIA) vorgenommen, indem den Stoffflüssen Umweltwirkungen zugeordnet und hierdurch quantifiziert werden (DIN EN ISO 14044 2006). In der letzten Phase erfolgen die Auswertung und die Darstellung der Ergebnisse. Bedingt durch das iterative Vorgehen kann zum Beispiel auf Basis der Auswertung eine Anpassung oder Detaillierung der Fragestellung oder des Untersuchungsrahmens erfolgen (DIN EN ISO 14044 2006). Im Folgenden werden die eingeführten vier Phasen detailliert beschrieben, sodass notwendige methodische Grundlagen für die weitere Entwicklung der Artefakte gelegt sind.

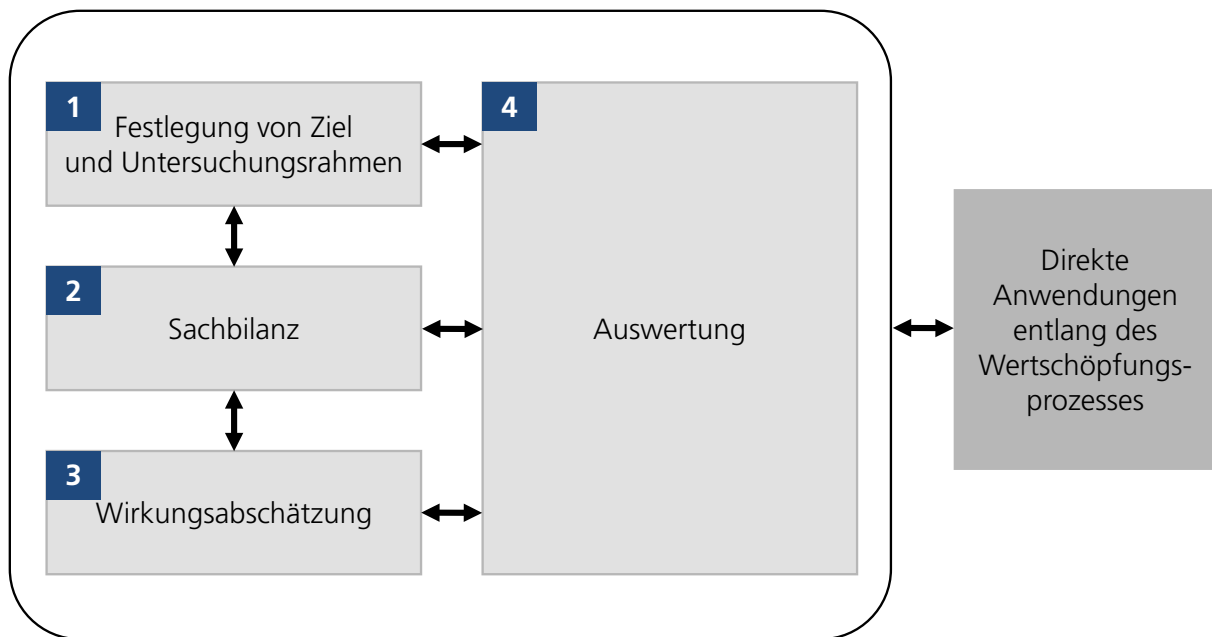


Abbildung 14: Vorgehen für Ökobilanzierungen nach DIN ISO (DIN EN ISO 14040 2009)

1) Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen. Als Grundlage für eine Ökobilanz ist eine präzise definierte Zielstellung inklusive des Umfangs der Untersuchung und der Grenzen notwendig. Die Zielstellung sollte klare Angaben zur Nutzung der Untersuchung sowie der Adressaten enthalten, sodass erstens eine Aufwandsschätzung vorgenommen werden kann und zweitens eine zielgerichtete Ergebnisdarstellung erfolgt (Ausberg et al. 2015). Überdies sind nach ISO 14044 verschiedene methodische Definitionen in der ersten Phase vorzunehmen (DIN EN ISO 14044 2006). Dazu gehört zum Beispiel die Definition einer funktionellen Einheit, die Auswahl der Allokations- und Wirkungsabschätzungsmethoden und die Definition der Anforderungen an notwendige Daten. Die **funktionelle Einheit** eines Produktsystems definiert die Leistungsmerkmale des untersuchten Systems eindeutig und macht einen Vergleich von verschiedenen Studien erst möglich (DIN EN ISO 14044 2006; Talbot 2004). Eine für Verkehrsmittel bzw. deren Treibstoffe übliche funktionelle Einheit stellt der Bezug zur Anzahl transportierter Personen oder Güter bezogen auf eine definierte Entfernung dar (Liu et al. 2023). Entscheidend bei der funktionellen Einheit ist zum einen die eindeutige Definition und zum anderen die Messbarkeit. Neben der funktionellen Einheit ist eine grundlegende Darstellung des Produktsystems Teil des zu definierenden Untersuchungsrahmens. Als Rahmen des Produktsystems gilt es, die **Systemgrenzen** der Analyse zu definieren. Im ersten Schritt muss hierzu festgelegt werden, welche Lebenszyklusphasen betrachtet werden sollen (Schrijvers et al. 2019). Idealerweise werden die Umweltwirkungen über den gesamten Lebenszyklus von der „Wiege“ bis zur „Bahre“ analysiert (Calisir et al. 2020). Zur Auswahl der zu berücksichtigenden Lebenszyklusphasen kann der von Schrijvers et al. idealisierte und generalisierte Produktlebenszyklus von Industrieprodukten verwendet werden (Schrijvers et al. 2019). Wie in Abbildung 15 dargestellt, besteht dieser aus sechs Teilphasen. Hierbei werden einzelne Phasen in der Ergebnisdarstellung oftmals zusammengefasst und ferner divergieren die Bezeichnungen je nach Produkt und Anwendungsfeld (siehe Kapitel 2.1). So wird die Phase der Nutzung in der Luftfahrtindustrie üblicherweise als Betriebsphase bezeichnet.

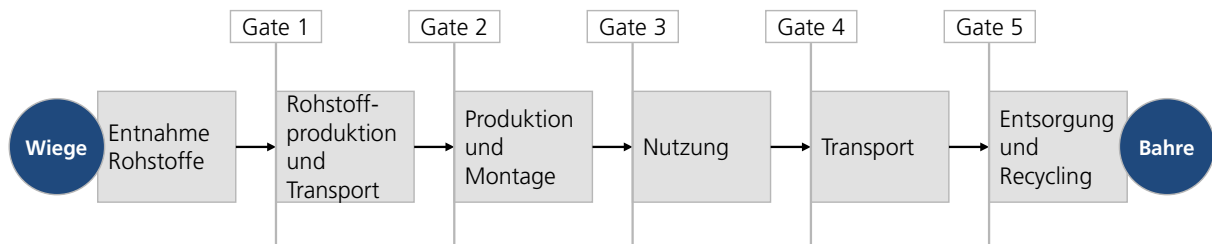


Abbildung 15: Allgemeiner und idealisierter Lebenszyklus von Produkten (angelehnt an Schrijvers et al. 2019)

Neben der vollständigen Bewertung über den gesamten Lebenszyklus (engl.: Cradle-to-Grave) klassifiziert Calisir et al. Ökobilanzen anhand der betrachteten Lebenszyklus Phasen in Cradle-to-Gate, Gate-to-Gate sowie Gate-to-Grave Studien (Calisir et al. 2020). Analysen, die einen Cradle-to-Gate Ansatz verfolgen, fokussieren auf die Prozesse der Rohstoffentnahme aus der Natur bis zur Transport-, Herstellungs-, Nutzungs- oder Distributionsphase. Der Gate-to-Gate Ansatz bezieht lediglich individuelle Teilbereiche des Lebenszyklus ein. Dabei können sowohl eine einzelne Phase als auch mehrere Phasen betrachtet werden, beispielsweise im Rahmen einer Betrachtung von der Herstellung eines Produktes bis zum Ende seiner Nutzungsphase (Gate 2 bis Gate 5). Abschließend erweitert der Gate-to-Grave Ansatz diese Betrachtung um die Entsorgung bzw. das Recycling. Grundsätzlich sollte immer die gesamte Erfassung des Lebenszyklus angestrebt werden, je nach Zielstellung der Ökobilanz sind Abweichungen jedoch möglich (DIN EN ISO 14040 2009). Ist das Ziel einer Ökobilanz beispielsweise die Bewertung und darauffolgende Optimierung der Produktionsprozesse im Hinblick auf deren Umweltwirkungen, kann die Fokussierung auf die Herstellung sinnvoll sein. Ein solcher Ausschluss von Lebenszyklusphasen oder auch einzelner Input- bzw. Outputströme muss nach ISO 14044 jedoch eindeutig begründet und dokumentiert werden (DIN EN ISO 14044 2006).

2) Sachbilanz. Das Ziel der Sachbilanz besteht darin alle Stoff- und Energieströme zwischen dem Produktsystem und seiner Umwelt zu bestimmen (Ausberg et al. 2015). Dies beinhaltet sowohl alle umweltschädlichen Stoffe, welche das System verlassen, als auch alle aus der Umwelt in das System eingebrachten Ressourcen (Jolliet et al. 2015). Im Kontext der Sachbilanz stellt das Produktsystem nach ISO 14044 die Zusammenfassung von Prozessmodulen mit Elementar- und Produktflüssen dar, welche den Lebensweg eines Produktes modellieren (DIN EN ISO 14044 2006). Produktflüsse stellen Produkte dar, welche aus einem anderen Produktsystem zugeführt oder an ein anderes Produktsystem abgegeben werden (Ausberg et al. 2015; DIN EN ISO 14044 2006). Elementarflüsse hingegen sind Stoff- oder Energieflüsse, welche ohne vorherige Vorbehandlung durch den Menschen aus der Umwelt entnommen bzw. ohne Vorbehandlung an die Umwelt abgegeben werden (Kranert 2017). Im Rahmen der Sachbilanz gilt es diese Flüsse zu identifizieren, eine entsprechende Datensammlung vorzunehmen und zu modellieren. Zudem ist in diesem Schritt die Datenvalidierung von besonderer Bedeutung. Bei komplexeren Produktsystemen kann es zu sogenannten Koppelprodukten innerhalb des Produktsystems kommen. Bei solchen Multifunktionsprozessen besteht ein Zuordnungsproblem der entstehenden Elementarflüsse, da die Elementarflüsse auf mehrere Produktflüsse aufgeteilt werden müssen (Ausberg et al. 2015). Zur Lösung dieses Allokationsproblems gibt es mehrere Ansätze. Ein Ansatz stellt die Erweiterung des Untersuchungsrahmens um die Herstellungspfade der Koppelprodukte dar. Dieser Ansatz wird als Systemerweiterung bezeichnet (Feifel et al. 2010). Die Ergebnisse des Hauptproduktes werden

den Umweltwirkungen aus dem Herstellungspfad des Koppelproduktes gegenübergestellt. Bei einer großen Anzahl an Koppelprodukten führt dies jedoch zu sehr unübersichtlichen Ergebnissen. Ist eine sinnvolle Systemerweiterung nicht möglich, wird eine Allokation mittels physikalischer Kriterien vorgenommen. In der Praxis handelt sich hierbei häufig um eine Allokation auf Basis der Masse (Feifel et al. 2010). Können physikalische Beziehungen nicht als Allokationsbasis verwendet werden, wird in der Regel der ökonomische Wert als Grundlage herangezogen (Ausberg et al. 2015).

In der praktischen Anwendung wird zur Erstellung der Sachbilanz zumeist eine Bilanzierungssoftware verwendet. Mit einer solchen Software ist es möglich das Produktsystem inklusive der Prozessmodule sowie die relevanten Flüsse zu modellieren und eine Berechnung der Elementarflüsse pro funktioneller Einheit des gesamten Produktsystems vorzunehmen (Hauschild et al. 2018). Zu den verbreiteten Softwares gehören Softwarelösungen wie SimaPro, GaBi und OpenLCA (Lüdemann und Feig 2014). Die detaillierte Modellierung des Produktsystems inklusive der Prozessmodule und den Stoffströmen, wie in diesem Kapitel vorgestellt, wird als prozessbasierter Ansatz bezeichnet (Facanha und Horvath 2006). Der Vorteil dieses Ansatzes liegt in der Möglichkeit einer sehr detaillierten Analyse des Produktsystems. Dies bedingt jedoch auch den Nachteil dieser Herangehensweise, da eine detaillierte Ausarbeitung und die dafür notwendige Datenerhebung einen großen Zeitaufwand und hohe Kosten mit sich bringen (Facanha und Horvath 2006). Eine Alternative stellen Input-Output Berechnungstools dar. Sie basieren auf hochaggregierten Wirtschafts- und Umweltdaten, um Elementarflüsse bzw. Umweltwirkungen zu schätzen. Der Vorteil dieser Tools im Vergleich zum prozessbasierten Ansatz besteht im geringeren zeitlichen und finanziellen Aufwand (Dallara et al. 2013). Diese Berechnungstools liefern jedoch ausschließlich durchschnittliche Werte über ganze Industriezweige hinweg, weshalb die generierten Ergebnisse weniger genau sind. Dies trifft im Besonderen bei Produkten zu, die in ihren Eigenschaften sehr vom durchschnittlichen Produkt der Branche abweichen (Dallara et al. 2013).

3) Wirkungsabschätzung. Im dritten Schritt, der Wirkungsabschätzung, werden die Umweltwirkungen basierend auf den Ergebnissen der Sachbilanz quantifiziert. Ziel ist es, eine umfassende Beurteilung aller Wirkungen zu ermöglichen und zu vergleichen (Ausberg et al. 2015). Hierzu erfolgt die Wirkungsabschätzung anhand von obligatorischen sowie weiteren optionalen Schritten: Im ersten Schritt werden zunächst **Wirkungskategorien** festgelegt. Wirkungskategorien repräsentieren wichtige Umweltthemen (z. B.: Klimawandel), denen direkte Ergebnisse aus der Sachbilanz in Form von Substanzen (hier z. B. Kohlenstoffdioxid; kurz: CO₂) zugeordnet werden können (Frischknecht 2020). Die Auswahl der Wirkungskategorien ist abhängig von Ziel- sowie Untersuchungsrahmen, wobei es in der Praxis oftmals im Zuge eines iterativen Vorgehens von Ökobilanzen zu Anpassungen kommen kann. Die anhand der Wirkungskategorie bereits vorgenommene Zuordnung von Substanzen zu Umweltwirkungen wird durch sogenannte **Charakterisierungsmodelle** systematisiert. Entsprechend sind im ersten Schritt geeignete Charakterisierungsmodelle vom Anwender auszuwählen. Mittels der Charakterisierungsmodelle lassen sich die Wirkungskategorien in **Wirkungsindikatoren** überführen. Diese lassen sich in Mid- und Endpoint Indikatoren unterscheiden. Midpoint Indikatoren sind problemorientiert und quantifizieren die potenzielle Wirkung einer Substanz bzw. Emission in Form von Äquivalenten (z. B. CO₂ Äquivalent). Endpoint Indikatoren dagegen sind schadensorientiert und orientieren sich an den sogenannten Areas of

Protection.). Nachdem im ersten Schritt die methodischen Grundlagen der Wirkungsabschätzung definiert wurden, kann im zweiten Schritt die eigentliche **Klassifizierung** der Sachbilanzergebnisse erfolgen, d. h. die ermittelten Substanzen werden mithilfe des gewählten Charakterisierungsmodells den Midpoint Indikatoren zugeordnet. Die Zuordnung einer Substanz zu verschiedenen Indikatoren ist hierbei möglich und durch die Charakterisierungsmodelle definiert. Der dritte und letzte obligatorische Schritt der Wirkungsabschätzung ist die **Charakterisierung**. Im Zuge dieser erfolgt eine Multiplikation der Substanzen bzw. Emissionen anhand einer Referenzsubstanz. Beispielsweise ist die Referenzsubstanz in der Wirkungskategorie Klimawandel und der Wirkungsindikator Treibhauspotenzial (engl.: Global Warming Potential; kurz: GWP) und damit wird erstens das Ergebnis in CO₂ Äquivalenten angegeben und zweitens sind für andere Substanzen, welche auch zum Klimawandel beitragen, Multiplikationsfaktoren zu definieren. Bei einem Zeithorizont von 100 Jahren im Charakterisierungsmodell wird der Substanz Methan (CH₄) beispielsweise der 25-fache Einfluss der gleichen Menge an Kohlendioxid zugesprochen, was in einem Multiplikationsfaktor (auch als Charakterisierungsfaktor bezeichnet) von 25 resultiert (Goedkoop und Huijbregts 2013). Die Summe aus der vorgenommenen Charakterisierung führt abschließend zu einem Ergebnis je Midpoint Indikator. Das grundlegende sequenzielle Vorgehen für die wichtigsten Schritte der Wirkungsabschätzung ist in Abbildung 16 veranschaulicht. Als vierter und optionaler Schritt besteht die Möglichkeit, die Interpretation und damit das Ziehen von Schlussfolgerungen mittels einer Normalisierung, Ordnung und Gewichtung zu erleichtern (Jolliet et al. 2015). Die **Normalisierung** ermöglicht es, ermittelte Wirkungsindikatoren in ein Verhältnis zu einer bestimmten Referenz zu setzen. Diese Referenz kann zum Beispiel das Treibhauspotential (CO₂ Äquivalent) von Deutschland pro Jahr sein. Weiterhin ist die **Ordnung** der Midpoint Indikatoren möglich. Dies kann zum Beispiel anhand des Zusammenschließens oder der Gruppierung erfolgen. Zudem wird die **Gewichtung** der einzelnen Wirkungsindikatoren optional innerhalb der Ökobilanz ermöglicht. Diese ermöglicht die Gewichtung der Wirkungsindikatoren gegeneinander und erfolgt durch Multiplikation mit einem Faktor (Huijbregts et al. 2017b).

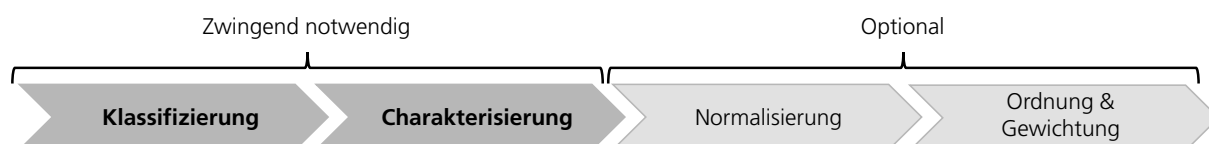


Abbildung 16: Schritte der Wirkungsabschätzung (angelehnt an Viera 2016)

Im Kontext der praktischen Anwendung der Wirkungsabschätzung werden die notwendigen Wirkungsindikatoren, Charakterisierungsmodelle sowie Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren durch die wissenschaftliche Gemeinschaft entwickelt, zusammengefasst und veröffentlicht. Diese als **Wirkungsabschätzungsmethoden** bezeichneten Datensätze und Richtlinien ermöglichen eine Vergleichbarkeit von Ergebnissen und erleichtern die Wirkungsabschätzung für den Anwender durch eine Standardisierung. In der Forschung existieren verschiedene Methoden zur Wirkungsabschätzung (siehe Unterabschnitt 3.1.3), wobei die ISO-Norm 14040 keine Methode vorschreibt. In Unterabschnitt 3.1.3 werden daher die wichtigsten Methoden der Wirkungsabschätzung vorgestellt. Zunächst erfolgen jedoch abschließende Erläuterungen zur letzten Phase der Ökobilanz.

4) Auswertung. Der letzte Schritt der Vorgehensweise stellt die Auswertung der Ergebnisse dar. Nach ISO 14044 wird die Phase der Auswertung in drei Phasen gegliedert (DIN EN ISO 14044 2006):

- Identifizierung der signifikantesten Parameter auf Grundlage der Ergebnisse von Sachbilanz und Wirkungsabschätzung
- Beurteilung der Ergebnisse anhand von Vollständigkeit, Sensitivität und Konsistenz
- Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen

Im Zuge der Identifizierung relevanter Parameter werden die Ergebnisse der Ökobilanz analysiert, um die Aspekte zu identifizieren, welche die größte Umweltrelevanz aufweisen, d. h. den größten Einfluss auf die Ergebnisse der Ökobilanz. Ein möglicher Ansatz stellt hierzu die Beitragsanalyse dar (DIN EN ISO 14044 2006). Sie betrachtet die anteiligen Beiträge etwa der Lebenszyklusphasen oder einzelner Systemkomponenten eines Produktes (Jolliet et al. 2015). Darauffolgend können zur Beurteilung von Vollständigkeit, Sensitivität und Konsistenz der Ergebnisse Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden (Frischknecht 2020). Mit Sensitivitätsanalysen lassen sich die Ergebnisse im Hinblick auf Datenunsicherheiten und deren Auswirkungen auf die Ergebnisse untersuchen. In der Forschung wird zu diesem Zweck bei Ökobilanzen auch auf Monte-Carlo-Simulationen zurückgegriffen (Ewertowska et al. 2017). Die aus der Wahrscheinlichkeitstheorie stammende Methode bietet die Möglichkeit, den gesamten Parameterraum zu variieren. Nachdem die Konsistenz der Ergebnisse überprüft wurde, erfolgt als letztes Element der Auswertung die Ableitung von Schlussfolgerungen, Einschränkungen sowie die Formulierung von Empfehlungen (DIN EN ISO 14044 2006). In der Praxis erfolgt dies oftmals in Form eines ausführlichen Berichts. Dieser subsumiert das methodische Vorgehen sowie die Erkenntnisse und wird dann an den Auftraggeber übergeben.

3.1.3 Methoden der Wirkungsabschätzung

Ausgehend von der beschriebenen Vorgehensweise für die Ökobilanzierung wird in diesem Unterabschnitt eine Übersicht von Methoden zur Wirkungsabschätzung gegeben. Beginnend mit den 1990er-Jahren wurden verschiedene Wirkungsabschätzungsmethoden entwickelt (Bjorn et al. 2018). Die erste Methoden, die mit den heute gängigen vergleichbar ist, wurde vom niederländischen Institut für Umweltwissenschaften an der Universität Leiden veröffentlicht und ermöglicht die Wirkungsabschätzung mit Midpoint Indikatoren (Heijungs et al. 1992). Die direkte Weiterentwicklung hieraus stellt die CML 2002 („Centrum voor Milieukunde“) Methode dar und fokussiert eine Wirkungsabschätzung mit ursprünglich 10 Midpoint Indikatoren, bietet jedoch keine schadensorientierte Betrachtung in Form von Endpoint Indikatoren an (Guinée et al. 2002). Eine weitere aus den Niederlanden stammende Wirkungsabschätzungsmethode ist die Eco-Indicator99-Methode (Goedkoop und Spriensma 2001). Die schadensorientierte Bewertung der Umweltwirkungen kann im Hinblick auf eine vereinfachte Kommunikation auf eine Kennzahl aggregiert werden. Weitere Methoden sind die TRACI-Methode (Tool for Reduction and Assessment of Chemicals and Other Environmental Impacts) sowie die IMPACT 2002+ Methode (Bare et al. 2003; Jolliet et al. 2003).

Als kombinierte Methode schlägt die Europäische Union das *International Reference Life Cycle Data System* (ILCD) vor (European Commission - Joint Research Centre 2010). Dieses Rahmenwerk stellt das Ergebnis eines Projekts zur Harmonisierung und der Ableitung von Empfehlungen für die Wahl von Midpoint und Endpoint Indikatoren dar.

Eine weitere kombinierte Methode ist die **ReCiPe-Methode** (Huijbregts et al. 2017b). Diese wurde in den Niederlanden entwickelt und wird kontinuierlich aktualisiert. Als kombinierter Ansatz aus der CML- und Eco Indicator-Methode werden bis zu 18 Midpoint Indikatoren und 3 Endpoint Indikatoren bereitgestellt. Zudem bietet ReCiPe Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren an. Hierbei wird dem Anwender eine auf Szenarien basierende Bewertung ermöglicht. Diese als Perspektiven bezeichneten Szenarien bilden drei verschiedene Zeithorizonte¹ ab: 20 Jahre (Individualist), 100 Jahre (Hierarchist) sowie 1000 Jahre und länger (Egalitär). In Abbildung 17 ist eine Übersicht der ReCiPe-Methode dargestellt. Die dargestellten Midpoint Indikatoren sind zudem in Anhang A.4 näher erläutert. Ferner zeigt die Abbildung die Möglichkeit zur Berechnung eines Single Scores, dessen Ziel die einfachere Kommunikation der Ergebnisse ist.

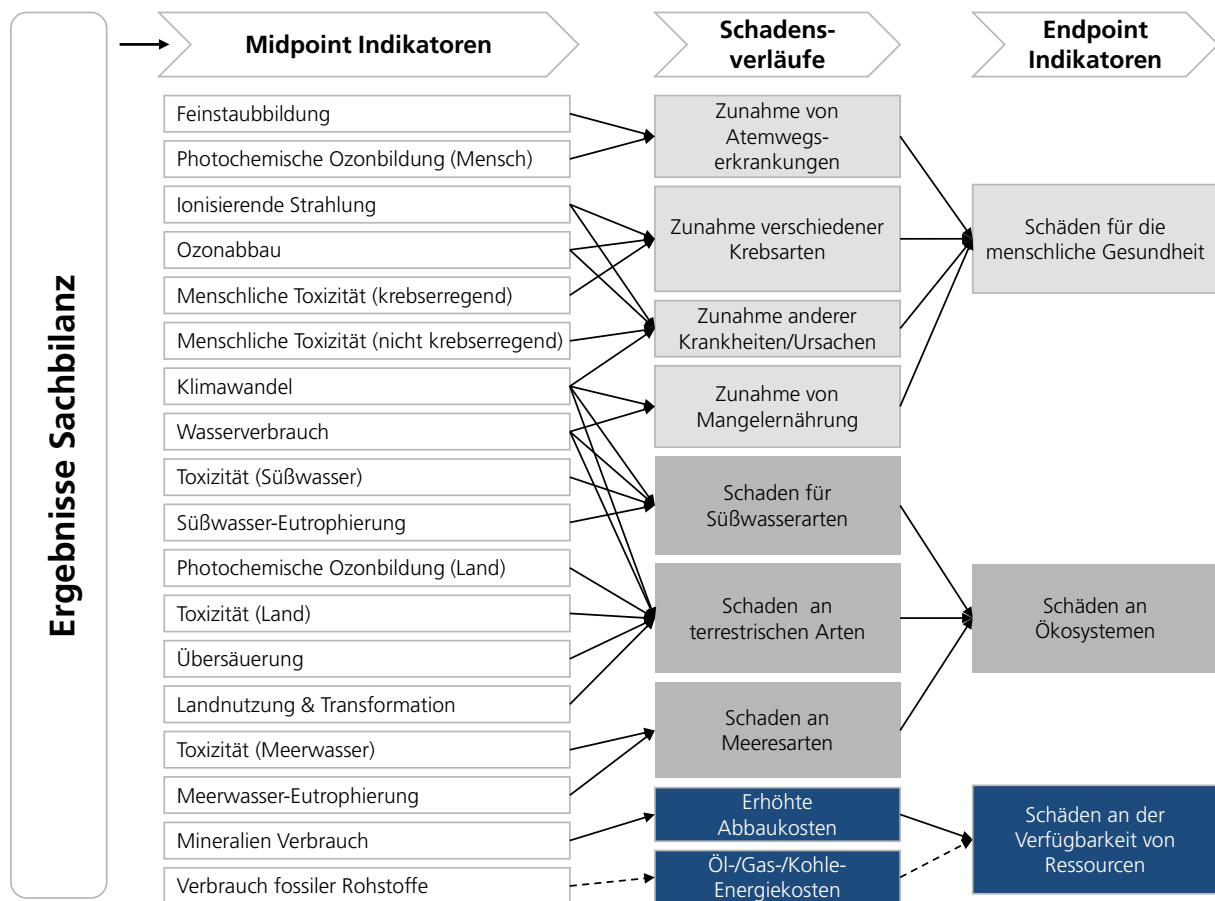


Abbildung 17: Übersicht über die ReCiPe-Methode 2016 V.1.1 mit 18 Midpoint Indikatoren (übersetzt und angelehnt an Huijbregts et al. 2017a)

Nachfolgende Tabelle fasst die genannten Wirkungsabschätzungsmethoden zusammen und beschreibt die Charakteristika jeder Methode. Neben den genannten Methoden existiert noch eine Vielzahl weiterer Möglichkeiten zur Wirkungsabschätzung. Hierzu sei auf die von Rodríguez und

¹ Grundlage hierzu ist die von Thompson entwickelte Kulturtheorie (Thompson et al. 1990)

Ciroth veröffentlichte Übersicht verwiesen, die in der folgenden Tabelle 3 dargestellt ist (Rodríguez und Ciroth 2014).

Tabelle 3: Übersicht von Methoden zur Wirkungsabschätzung
(angelehnt und erweitert an Ausberg et al. 2015)

Methoden	Beschreibung
CML 2002 (Guinée et al. 2002)	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung der ursprünglichen CML92 Wirkungsabschätzungsmethode • 10 Midpoint Indikatoren (mit späterer Erweiterung) • Bereitstellung von Faktoren zur Normierung, jedoch keine Gewichtung vorgesehen
Eco-Indicator 99 (Goedkoop und Spriensma 2001)	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung der Eco-Indicator 95-Methode • 11 Midpoint Indikatoren • 3 schadensorientierte Endpoint Indikatoren • Bereitstellung von Gewichtungsfaktoren • Möglichkeit zur Berechnung einer Kennzahl (Eco-Indicator-Points)
TRACI 2.0 (Bare et al. 2003)	<ul style="list-style-type: none"> • Weiterentwicklung der TRACI Methode aus dem Jahr 2002 • 10 Wirkungskategorien • Bereitstellung von Normalisierungsfaktoren
IMPACT 2002+ (Jolliet et al. 2003)	<ul style="list-style-type: none"> • 14 Midpoint Indikatoren • 4 Endpoint Indikatoren • Fokus auf Human- und Ökotoxizität
The International Reference Life Cycle Data System (ILCD) (European Commission - Joint Research Centre 2010)	<ul style="list-style-type: none"> • Kombinierte Methode aus einer Vielzahl von anderen Methoden • 12 Midpoint Indikatoren • 3 Endpoint Indikatoren • Bereitstellung von Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren
ReCiPe 2016 (v.1.1) (Huijbregts et al. 2017b)	<ul style="list-style-type: none"> • Kombinierte Methode aus CML 2001 und Eco-Indicator 99 • Aktualisierung der ReCiPe 2008-Methode • 18 Midpoint Indikatoren • 3 Endpoint Indikatoren • Bereitstellung von Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren • Möglichkeit zur Berechnung einer Kennzahl (Single Score)

Die Übersicht zeigt eine kontinuierliche Weiterentwicklung und Aktualisierung der Wirkungsabschätzungsmethoden. Hierdurch fließen auf der einen Seite die neuesten wissenschaftlichen Erkenntnisse in Ökobilanzen, auf der anderen Seite wird die Vergleichbarkeit erschwert und die Komplexität für den Anwender erhöht.

3.1.4 Anwendungsfelder

Für Ökobilanzen konnten im Laufe der kontinuierlichen Weiterentwicklung immer neue Anwendungsfelder entlang verschiedenster Industrien identifiziert und in die Anwendung gebracht werden (Frischknecht 2020; Keiser et al. 2023d). Für Unternehmen stellt sich hier zunächst die Frage, welche Anwendungsfelder in den verschiedenen innerbetrieblichen Funktionsbereichen denkbar sind und welche Zielstellungen adressiert werden können. Ausgehend von dieser Fragestellung wurde im Rahmen dieser Arbeit eine umfassende Literaturrecherche zu den möglichen Anwendungsfällen durchgeführt und veröffentlicht (Keiser et al. 2023d). Die Recherche fokussiert ausschließlich betriebliche Anwendungsfelder und untersucht keine weiteren Anwendungsmöglichkeiten in öffentlichen Institutionen oder der Politikberatung. Die Anwendung von Ökobilanzen in diesen Bereichen ist somit nicht Gegenstand der folgenden Darstellung. Als Ordnungsrahmen für die Recherche sowie zur Zuordnung der Anwendungsfelder und Zielstellungen wurde das von Porter entwickelte Modell der Wertschöpfungskette in produzierenden Unternehmen herangezogen und vereinfacht (Porter 1985). Das Modell eignet sich insbesondere für die modellhafte Beschreibung von produzierenden Unternehmen und ordnet die innerbetrieblichen Funktionsbereiche entlang primärer und sekundärer Aktivitäten ein². Als primäre Aktivitäten sind Produktion (1), Transport und Logistik (2), Marketing und Vertrieb (3) sowie Services definiert. Sekundäre Funktionen sind die Forschung und Entwicklung (4), die Beschaffung (5), das Personalmanagement (6) sowie Management und Verwaltung (7). Ausgehend von diesen innerbetrieblichen Funktionsbereichen wurde die in Tabelle 4 dargestellte Zuordnung der identifizierten Anwendungsfälle vorgenommen. Die Analyse der identifizierten Anwendungsfälle zeigt auf der einen Seite, dass in allen innerbetrieblichen Funktionsbereichen Möglichkeiten zur Nutzung von Ökobilanzen bestehen. Deutlich wird aber auch, dass direkte und konkrete Anwendungen insbesondere in den Bereichen wie Produktion, Marketing und Vertrieb sowie Forschung und Entwicklung zu finden sind.

Auf Basis der vorgenommenen Gliederung sowie der identifizierten Anwendungsfälle erfolgt in Abschnitt 5.1 eine Potenzialbewertung von Ökobilanzen bei Flugzeugherstellern. Ausgehend von der großen Ähnlichkeit der Wertschöpfungskette von Flugzeugherstellern mit den Funktionsbereichen nach Porter eignet sich die vorgenommene Strukturierung für die Bewertung hierbei in besonderem Maße (Beelaerts van Blokland et al. 2007).

² Mit dem Ziel der Vereinfachung wurde die interne und externe Logistik zusammengefasst. Zudem wurde der Bereich Service in (3) Marketing und Vertrieb berücksichtigt.

Tabelle 4: Identifizierte Anwendungsfälle und Ziele von Ökobilanzierungen.
Geordnet anhand des Wertschöpfungsprozesses von Porter (angelehnt an Keiser et al. 2023d)

Wertschöpfungsprozess (Porter)	Anwendungsfälle und Zielstellungen
(1) Produktion	<ul style="list-style-type: none"> • Identifizierung und Reduktion ökologischer Schwachstellen • Reduktion des Ressourcenverbrauchs (Rohstoffe, Betriebsstoffe, Energie) • Schaffung produktionsimmanenter Stoffkreisläufe • Integration eigener Recyclingprozesse • Betriebskontrolle durch Kennzahlenbildung, zur Dokumentation von Verbesserungen und zum Vergleich von Produktionsprozessen
(2) Transport und Logistik	<ul style="list-style-type: none"> • Aufdeckung ökologischer Schwachstellen in den Verteilersystemen • Vermeidung unnötiger Verpackungen für den Transport • Reduktion/Vermeidung innerbetrieblicher Transportwege (Intralogistik)
(3) Marketing und Vertrieb	<ul style="list-style-type: none"> • Informationen für Abnehmer, Handel und Verbraucher über Emissionen • Abbau von Akzeptanzproblemen der Abnehmerseite gegenüber der Anbieterseite • Kommunikation mit Umweltargumenten auf gesicherte Datenbasis stellen • Aufbau von Image des umweltorientierten Unternehmens, bzw. Erarbeitung einer besseren Umweltbilanz als die der Konkurrenz • Gewinnung neuer Kunden sowie Steigerung der Kundenbindung • Entscheidungshilfe für Kunden zwischen Produkten des eigenen Portfolios
(4) Forschung und Entwicklung	<ul style="list-style-type: none"> • Auswahl von Materialien und Rohstoffen mit geringerer Umweltauswirkung bei der Neu- und Weiterentwicklung auf Grundlage von Schwachstellen • Identifikation, Auswahl und Bewertung neuer Forschungsprogramme • Kostensenkung durch Verringerung des Rohstoff- und Energieeinsatzes • Erhöhung der Recyclingfähigkeit durch Minimierung der Materialvielfalt • Ermöglichung eines umweltgerechten Gebrauchs des Produktes • Optimierung der Produktlebensdauer durch Verlängerung der Materiallebensdauer
(5) Beschaffung	<ul style="list-style-type: none"> • Selektion von Lieferanten • Steigerung des Innovationsdrucks bei Lieferanten aufgrund der Verpflichtung zu ökologischen Standards • Überwachung von Lieferanten bezüglich der Einhaltung von Standards • Zusammenarbeit mit Lieferanten durch gemeinsamen Wissensaufbau • Identifizierung von ökologischen, zu verbessernden „Hot-Spots“ in der Lieferkette
(6) Personalmanagement	<ul style="list-style-type: none"> • Einsatz der Daten der Ökobilanzierung in internen Schulungsprogrammen • Sensibilisierung der Angestellten zu einem aktiven umweltschonenden Handeln
(7) Management und Verwaltung	<ul style="list-style-type: none"> • Optimierung der langfristigen strategischen Planung • Abschätzung der Auswirkung bei der Einführung staatlicher Umweltvorgaben • Unterstützung beim Aufbau von Umweltmanagementsystemen • Verbessertes Verständnis der Performance des eigenen Unternehmens • Bewertung industrieller Symbiosen (Identifikation geeigneter strategischer Partner)

3.1.5 Kritische Betrachtung der Methode

Nachdem in den vorherigen Unterabschnitten die Vorgehensweise, methodische Grundlagen sowie Anwendungsfelder von Ökobilanzen vorgestellt wurden, soll dieser Unterabschnitt zu einer kritischen Diskussion der Methode beitragen und Limitationen aufzeigen. Diese Limitationen und Herausforderungen sind als inhärent zu betrachten und somit unabhängig vom Anwendungskontext vorhanden, je nach Zielstellung jedoch von unterschiedlicher Bedeutung.

Als in der Praxis oftmals geäußerte Herausforderung ist der große **Bedarf sowie die Beschaffungskomplexität von Daten** zu nennen (Buxel et al. 2015). Die detaillierte Modellierung aller Lebenszyklusphasen erfordert verschiedenste Prozess- und Nutzerdaten, welche im Regelfall über verschiedene Unternehmen und Stakeholder verteilt sind (siehe Abschnitt 2.2). Die Erfassung von Daten ist entsprechend aufwendig und trotzdem bestehen je nach Ziel und Rahmen einer Ökobilanz Datenlücken (Miah et al. 2018). Bei der Durchführung von Ökobilanzen werden vor diesem Hintergrund bei fehlenden und nicht zu beschaffenden Daten Annahmen getroffen. Hieraus folgt eine gewisse **Subjektivität** und Unsicherheit, welche durch Sensitivitätsanalysen jedoch abgesichert werden können. Zudem können verschiedene Wirkungsabschätzungsmethoden (siehe Unterabschnitt 3.1.3) gewählt werden und die Normalisierung und Gewichtung ist als optionaler Schritt möglich (Pizzol et al. 2017). Diese Freiheitsgrade bei der Modellierung werden von den Normen und Richtlinien gestützt, welche keine dezidierten Vorgaben machen (Pryshlakivsky und Searcy 2013). Als Folge aus fehlenden Daten, Subjektivität sowie weiteren Effekten in der Praxis, wie Fehlern während der Modellierung, entstehen **Unsicherheiten bei den Ergebnissen** (Barahmand und Eikeland 2022). Bei Entscheidungsprozessen auf Basis von Ökobilanzergebnissen ist es daher wichtig, mögliche Unsicherheiten zu berücksichtigen und zudem Unsicherheitsquellen zu dokumentieren, sodass eine transparente Kommunikation ermöglicht wird. Hinsichtlich der **Kommunikation von Ökobilanzergebnissen** lässt sich zudem eine weitere Limitation feststellen: Bedingt durch die Anzahl an Wirkungsindikatoren (siehe Unterabschnitt 3.1.3) kann die Interpretation ebendieser schwierig sein. In besonderem Maße gilt dies für Nichtexperten (Buxel et al. 2015). Gleichzeitig führt die Fokussierung auf einzelne Umweltindikatoren zu starken Vereinfachungen und lässt die Komplexität von Umweltwirkungen außer Acht. Ein Ansatz, um möglichst alle Umweltwirkungen zu berücksichtigen und gleichzeitig die Kommunikation der Ergebnisse zu vereinfachen, sind die bereits eingeführten Single Scores (siehe Unterabschnitt 3.1.3). Dennoch stellt die Kommunikation der Ergebnisse eine Herausforderung dar und erfordert je nach Anwendungsfall und Publikum verschiedene Detailebenen. Abschließend sei aufbauend auf die Erkenntnisse aus Unterabschnitt 3.1.1 darauf hingewiesen, dass Ökobilanzen **ausschließlich ökologische Aspekte** betrachten und damit eine eindimensionale Sichtweise im Nachhaltigkeitsdreieck darstellen. Diese Limitation ist je nach Zielstellung durch die Integration von weiteren Bewertungsmethoden zu berücksichtigen.

Zusammenfassend stellt die Methode der Ökobilanz eine standardisierte und weltweit anerkannte Methode zur Quantifizierung von Umweltwirkungen dar (Frischknecht 2020; Kokare et al. 2023), ist jedoch nicht ohne Schwächen und Limitationen. Bei der Anwendung sind diese Herausforderungen individuell zu bewerten und entsprechend zu berücksichtigen.

3.2 Ökobilanzen in der Luftfahrtindustrie

Für die Analyse des Standes der Forschung im Kontext des Anwendungsbereichs dieser Arbeit wurde eine systematische Literaturanalyse durchgeführt, deren Ergebnisse veröffentlicht wurden (Keiser et al. 2023e). Methodisch folgt die Analyse dem Ansatz des *Scoping Reviews*, dessen Ziel unter anderem die Darstellung und Gegenüberstellung von verschiedenen Konzepten und methodischen Vorgehensweisen ist (Pollock et al. 2021). Zur Sicherstellung der systematischen Vorgehensweise wurde das in Anhang A.5.1 dargestellte SALSA-Rahmenmodell (Search, Appraisal, Synthesis und Analysis) und ergänzend dazu das *PRISMA-ScR* (Preferred Reporting Items of Systematic reviews and Meta-Analyses) angewendet (Booth et al. 2012; Page et al. 2021). Diese Erweiterung des *PRISMA-Statements* stellt eine Checkliste zur methodischen Absicherung von Scoping Reviews bereit und wird in der Forschung von verschiedenen Forschungsrichtungen verwendet.

Ausgehend von dieser Vorgehensweise wurden mit einem pilotierten Suchstring (Anhang A.5.1) im Februar 2022 1117 Artikel aus den Datenbanken von Scopus, Web of Science sowie IEEE extrahiert. Nach der Entfernung von Duplikaten sowie der Anwendung von Ausschlusskriterien konnte die Anzahl der relevanten Veröffentlichungen (Anhang A.5.2) deutlich reduziert und eine Kategorisierung auf Basis des bereits vorgestellten Lebenszyklus der Luftfahrtindustrie in Kapitel 2.1 vorgenommen werden. Mittels der durchgeführten Kategorisierung lässt sich die in Abbildung 18 dargestellte Analyse der Veröffentlichungen pro Jahr durchführen. Für diese erste quantitative Darstellung wurden 119 Veröffentlichungen berücksichtigt, beginnend mit einer ersten Veröffentlichung im Jahr 2001. Frühere Veröffentlichungen wurden nicht berücksichtigt, da die 14040 Normenreihe 2001 erstmalig veröffentlicht wurde und zu einer stärkeren Vergleichbarkeit von Ökobilanzen beigetragen hat. Ab 2016 zeigt sich ein deutlicher Sprung und steigender Trend der Veröffentlichungen. Die Betrachtung der Kategorisierung zeigt zudem eine Fokussierung auf Treibstoffe, insbesondere stehen hier alternative Treibstoffe sowie deren Herstellung im Fokus der Forscher (Keiser et al. 2023e). Demgegenüber stehen Untersuchungen des Flugzeuglebenszyklus sowie der Betriebsphase, in denen Bauteilen und Baugruppen untersucht werden. Die Anzahl der Veröffentlichungen steigt auch in dieser Kategorie über die Zeit deutlich an. In die Kategorisierung wurde für den relativen Vergleich auch der Lebenszyklus von Flughäfen berücksichtigt. Hier zeigt die Analyse ein vergleichsweise geringes Interesse und nur vereinzelte Veröffentlichungen.

Diese erste Analyse der Veröffentlichungen zeigt zusammenfassend erstens ein stark steigendes Interesse am Forschungsfeld Ökobilanzen im Anwendungsfeld der Luftfahrtindustrie und zweitens eine Fokussierung der aktuellen Forschung auf den Lebenszyklus von Treibstoffen. Dieses Ergebnis deckt sich zum einen mit den Ergebnissen von Melo et. al (Melo et al. 2020), zum anderen kann festgehalten werden, dass auch der gesamte Flugzeuglebenszyklus von zunehmendem Interesse ist.

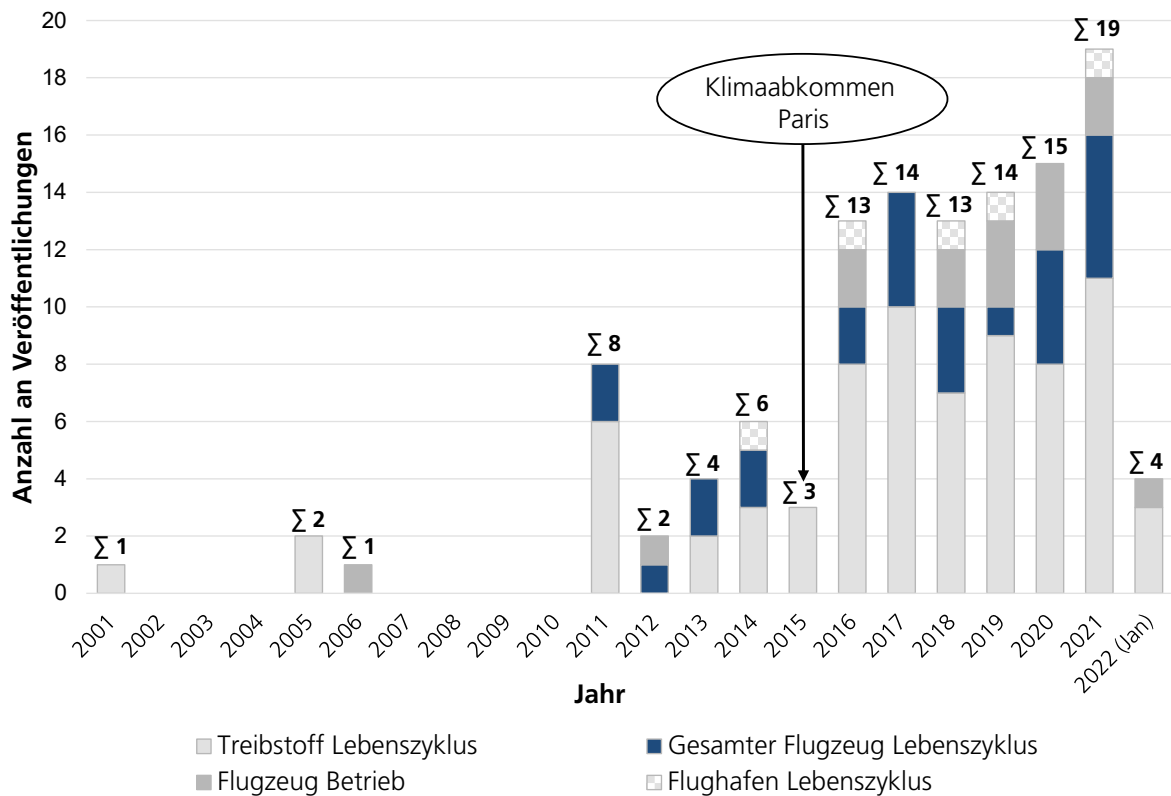


Abbildung 18: Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse: Veröffentlichungen pro Jahr sowie Kategorisierung auf Basis der Lebenszyklen (Keiser et al. 2023e)

Bedingt durch die Zielstellung dieser Arbeit wurden für die weitere qualitative Analyse Publikationen aus dem Bereich Treibstoff und Flughafen exkludiert, sodass eine Konzentration auf das System Flugzeug ermöglicht wird. Dies führt zu den in Anhang A.5.2 aufgeführten 45 Veröffentlichungen. Im nächsten Abschnitt werden Teilergebnisse der Detailanalyse dieser Beiträge vorgestellt. Weitere Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse sind zudem im benannten Anhang dokumentiert.

3.2.1 Analyse der Forschungsschwerpunkte nach Flugzeugsystemmodulen

Für die weitere Analyse und zur Identifizierung aktueller Forschungsschwerpunkte im Hinblick auf das System Flugzeug wurden die identifizierten Veröffentlichungen den Modulen von Verkehrsflugzeugen zugeordnet. Hierzu ist zunächst die im Stand der Forschung bereits eingeführte Gliederung nach Hauptsystemen wieder aufgegriffen worden (siehe Abschnitt 2.4.). Tabelle 5 zeigt das Ergebnis der Zuordnung.

Von den 45 analysierten Beiträgen konnten ausschließlich 20 Beiträge direkt einem Modul zugeordnet werden. Dies bedingt sich durch das Studiendesign der nicht zugeordneten Veröffentlichungen, welche zum Teil Materialien oder gesamte Flotten ohne Bezug zu konkreten Bauteilen bzw. Baugruppen modellieren. Für die zugeordneten Beiträge zeigt sich mit neun Beiträgen ein Schwerpunkt auf die Flugzeugkabine und im Speziellen das sogenannte *Interieur*. Dies ist auf die hohe Anzahl an Studien zu bio-basierten Faserverbundwerkstoffen in der Flugzeugkabine zurück-

zuführen (siehe u.a. Dong et al. 2018a; Vidal et al. 2018). Die besonders hohen Sicherheitsanforderungen und mangelnde Erfahrung hinsichtlich der Langzeitleistung und der mechanischen Eigenschaften von bio-basierten Faserverbundwerkstoffen haben dazu geführt, dass der Einsatz von bio-basierten Faserverbundwerkstoffen auf Innenkomponenten und sekundäre Strukturkomponenten fokussiert wurde, da diese geringeren Belastungen ausgesetzt sind (Bachmann et al. 2018). Eine weitere Hypothese für den Fokus speziell auf Paneele im Innenbereich liegt darin, dass diese Komponenten einfache Geometrien aufweisen und daher keine komplexen Weiterverarbeitungsschritte erfordern und darüber hinaus eine mögliche Industrialisierung im Vergleich zu komplexen Bauteilgeometrien mit weniger Hürden verbunden ist. Die weiteren Teilsysteme des Flugzeugs sind mit vergleichsweise wenigen Studien in der analysierten Literatur vertreten. Beispielsweise wurden für Turbinenschaufeln (Triebwerk) Ökobilanzen durchgeführt (Torres-Carrillo et al. 2020) ebenso wie für Rumpfstrukturen (Timmis et al. 2014). Zu Flügeln, Leitwerken wie auch dem Fahrwerk konnten nur wenige oder keine Veröffentlichungen zugeordnet werden.

Tabelle 5: Zuordnung der Veröffentlichungen nach Flugzeugsystemmodulen (angelehnt an Keiser et al. 2023e)

Modul	Auswahl analysierter Bauteile	Anzahl
Flugzeugkabine	Innenverkleidung (Paneele)	9
Triebwerk	Turbinenschaufel	4
Rumpf	Strukturelle Bauteile	4
Flügel	Gesamter Flügel	2
Leitwerke	Seitenleitwerk	1
Fahrwerk	-	0

Zusammenfassend zeigt die Analyse nach Flugzeugmodulen zum einen, dass viele Ökobilanzstudien (ca. 50 %) übergeordnete Fragen nach Materialien, Produktionsprozessen oder gesamten Flugzeugflotten adressieren. Zum anderen lässt sich ein Fokus auf die Flugzeugkabine festhalten.

3.2.2 Analyse der methodischen Vorgehensweise

Neben der Analyse nach Flugzeugsystemstruktur wurde der Literaturumfang insbesondere im Hinblick auf methodische Fragen untersucht. Ziel der methodischen Analyse ist es hierbei, für die spätere Entwicklung der Artefakte (siehe Unterabschnitt 5.2.2) erste Implikationen und abgesicherte Anforderungen abzuleiten. Folgende drei leitende Analysefragen wurden daher als Teilmenge der systematischen Literaturanalyse aufgestellt und werden nachfolgend beantwortet:

- Welche **funktionellen Einheiten** finden bei Ökobilanzen in der Luftfahrtindustrie Anwendung?
- Welche **Wirkungsabschätzungsmethoden** werden in der Luftfahrtindustrie verwendet?
- Wie ist die **Dokumentationsqualität** der analysierten Beiträge zu bewerten?

Funktionelle Einheit. Der Begriff der funktionellen Einheit wurde bereits in Unterabschnitt 3.1.2 eingeführt und eine erste Spezifizierung hinsichtlich der Nutzung bei Verkehrsmittel vorgenommen. Eine detaillierte Untersuchung hinsichtlich der funktionellen Einheiten in der Luftfahrtindustrie bietet folgerichtig dieser Unterabschnitt, dessen folgende Beschreibung auf den Erkenntnissen der systematischen Literaturanalyse beruhen. Die detaillierte Analyse ist hierzu in Anhang A.5.2 dokumentiert. Im Ergebnis zeigt sich für die Betriebsphase eine starke Fokussierung auf die funktionelle Einheit *Passagierkilometer* in der Luftfahrtindustrie. Weiterhin finden Varianten dieser Einheit Anwendung: Beim *Sitzkilometer* wird die Auslastung des Flugzeugs vernachlässigt und nur die Anzahl der potenziell möglichen Passagiere als Basis für die Normierung herangezogen. Neben der Betrachtung des reinen Passagierverkehrs werden für Analysen des Luftfrachtverkehrs Ökobilanzen mittels der funktionellen Einheit *Tonnenkilometern* durchgeführt (Facanha und Horvath 2006). Für weitere Fragestellungen im Zuge des Betriebs von Verkehrsflugzeugen wurden von Forschern individuelle funktionelle Einheiten verwendet: Für Wartungsprozesse wird in der Veröffentlichung von Söhret et al. die funktionelle Einheit als ein 30-minütiger Prozess definiert (Söhret et al. 2019). Eine weitere Studie untersucht die Prozess des Caterings während des Fluges und definiert hierzu das *Catering pro Passagier* als Referenz für vergleichende Analysen (Blanca-Alcubilla et al. 2020). Für die Bilanzierung der Fluggewohnheiten von Passagieren über einen bestimmten Zeitraum besteht zudem die Möglichkeit zur Definition einer Referenz. Severis et al. wählen in ihrer Studie dieses Vorgehen und stellen Ökobilanzen auf Basis von vier verschiedenen Reisezielen auf (Severis et al. 2019). Werden einzelne Bauteile über den gesamten Lebenszyklus bzw. über einzelnen Phasen des Lebenszyklus (Gate-to-Gate) modelliert, zeigen sich deutliche Abweichungen in der funktionellen Einheit. Hier wird oftmals das Bauteil sowie dessen definierte Funktion als Referenz verwendet. Ferner werden in einigen Studien zu Faserverbundwerkstoffen die zu ihrer Herstellung verwendeten Rohstoffe nach Fläche (m²), Volumen (m³) oder Masse (kg) angegeben (siehe u.a. Gkoloni und Kostopoulos 2021; Meng et al. 2017).

Die Analyse der gewählten funktionellen Einheiten zeigt, dass insbesondere die Referenz **Passagierkilometer** in der Forschung für den Vergleich des gesamten Flugzeugbetriebs verwendet wird. Werden einzelne Baugruppen oder Komponenten berücksichtigt, ist meist die Komponente selbst als funktionelle Einheit definiert. Dies kann aufgrund der mangelnden Vergleichbarkeit zu fehlerhaften Schlussfolgerungen führen, vereinfacht jedoch die Modellierung.

Wirkungsabschätzungsmethoden und Wirkungsindikatoren. Als einer der Kernfragen bei der Methode der Ökobilanz ist die Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethode (Unterabschnitt 3.1.3) auch im Anwendungsfeld Luftfahrtindustrie zu beachten. Die Ergebnisse hinsichtlich der angewendeten Wirkungsabschätzungsmethoden ist in Abbildung 19 dargestellt und basiert auf den bereits eingeführten Methoden zur Wirkungsabschätzung in Unterabschnitt 3.1.3. Die Abbildung zeigt die prozentuale Verteilung der 45 analysierten Beiträge in Bezug auf die gewählte Wirkungsabschätzungsmethode. Die dominierende Methode ist die ReCiPe-Methode, welche von 27 % der Autoren verwendet wurde. Dem folgt mit 11 % die Eco-Indicator 99-Methode. Weitere verwendete Methoden sind mit unter 10 % nur wenig repräsentiert.

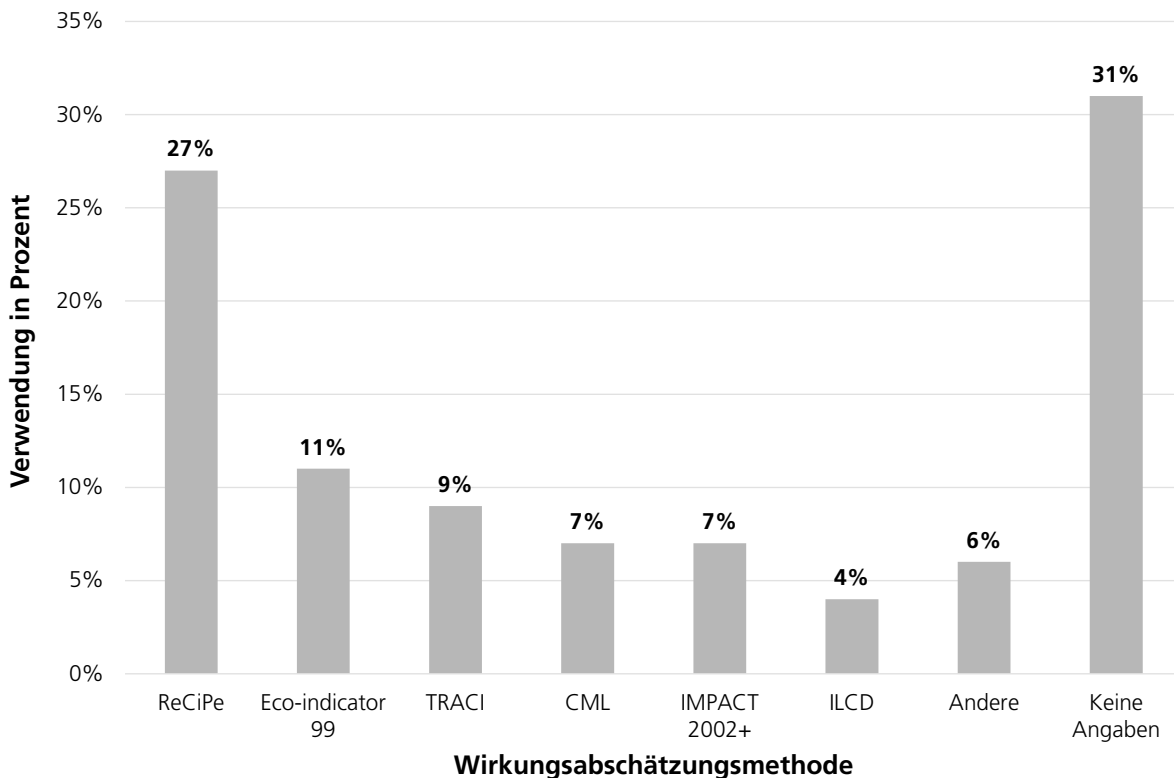


Abbildung 19: Ergebnisse der Analyse zu den verwendeten Wirkungsabschätzungsmethoden (Keiser et al. 2023e)

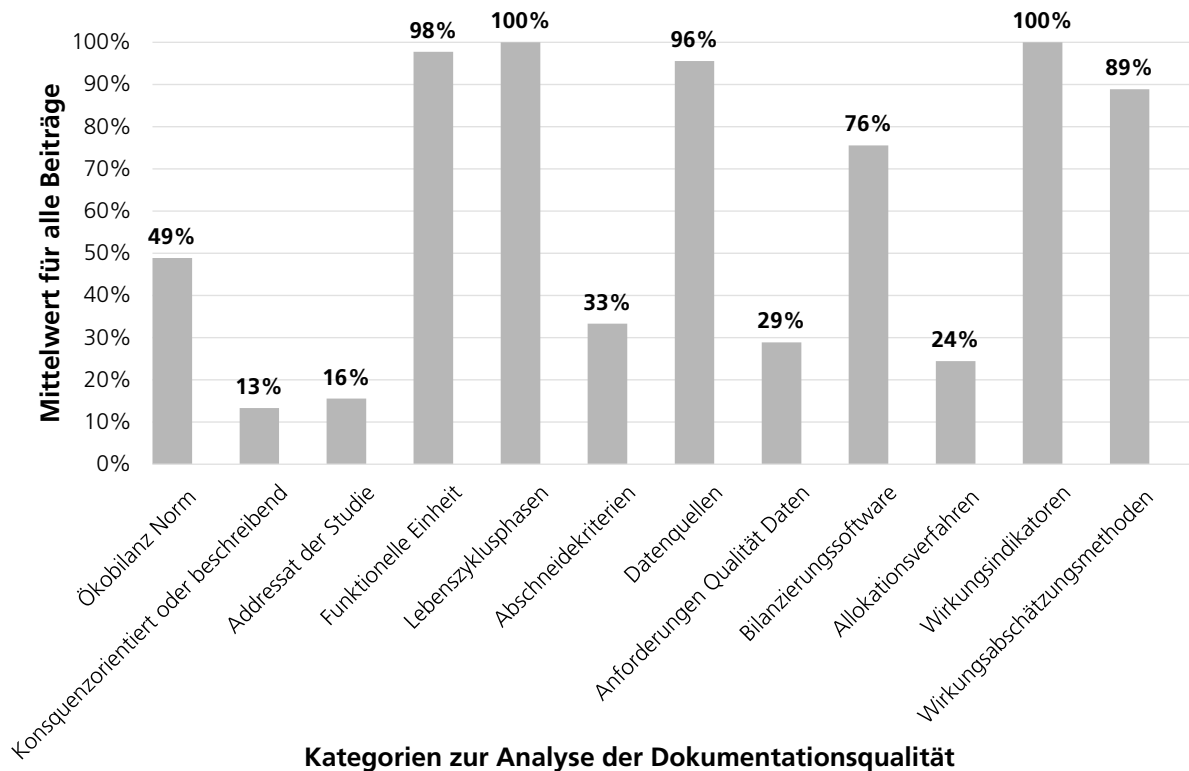
In 31 % der Artikel wird keine Methode zur Wirkungsabschätzung angegeben. Dies kann verschiedene Ursache haben. Zum einen wird in einigen der 14 Artikel keine vollständige Ökobilanz, sondern ausschließlich eine Analyse von Elementarflüssen durchgeführt (siehe u.a. Facanha und Horvath 2006). Zum anderen verweisen weitere Autoren ausschließlich auf andere Charakterisierungsmodelle, ohne die Wirkungsabschätzungsmethode zu nennen. Hierdurch zeigen sich erstens Schwächen in der Dokumentationsqualität und zweitens lässt sich durch die Analyse festhalten, dass die ReCiPe-Methode aktuell den Stand der Forschung in der Luftfahrtindustrie darstellt. Zwecks der Vergleichbarkeit und Reife der Methode empfiehlt es sich daher in der weiteren Konzeption auf die ReCiPe-Methode zurückzugreifen.

Dokumentationsqualität und Inhalte. Abschließend wurde im Zuge der systematischen Literaturanalyse untersucht, welche typischen methodischen Fragestellungen von den Autoren dokumentiert wurden. Die Analyse verfolgt im Zuge dieser Arbeit hierbei zwei Zielstellungen. Erstens kann aus der Analyse abgeleitet werden, welche methodischen Fragen zwingend in der Entwicklung der Methode Berücksichtigung finden müssen und zweitens lässt sich mit der Analyse eine Aussage über die Dokumentationsqualität und damit die Vergleichbarkeit der 45 Beiträge treffen. Als Grundlage für die Analyse dient ein entwickeltes Kategoriensystem, welches auf die ISO-Norm 14044 zurückgreift, da in der Norm Dokumentations- und Informationsbedarfe vorgeschlagen werden. Auf Basis der Norm wurden die folgenden 12 Kategorien für die Analyse definiert:

- 1) Ökobilanz Norm
- 2) Konsequenzorientiert („consequential“) oder beschreibend („attributional“)³
- 3) Adressat der Studie
- 4) Funktionelle Einheit
- 5) Lebenszyklusphasen
- 6) Abschneidekriterien
- 7) Datenquellen
- 8) Anforderungen Qualität Daten
- 9) Bilanzierungssoftware
- 10) Allokationsverfahren
- 11) Wirkungsindikatoren
- 12) Wirkungsabschätzungsmethoden bzw. Charakterisierungsmodelle

Ausgehend von diesem Kategoriensystem wurde eine binäre Bewertung für alle Beiträge und Kategorien in Form einer Inhaltsanalyse durchgeführt. Gegenstand der Inhaltsanalyse ist hierbei ausschließlich, ob Informationen für eine Kategorie gegeben sind oder nicht. Abbildung 20 zeigt je Kategorie den Mittelwert für alle 45 berücksichtigten Beiträge. Die Ergebnisse zeigen, dass in fast allen Beiträgen die gewählte funktionelle Einheit dargestellt und die jeweilige Auswahl begründet wird. Weiterhin werden Wirkungsindikatoren dokumentiert und zur Darstellung der Ergebnisse verwendet und Wirkungsabschätzungsmethoden genannt bzw. begründet, warum keine Wirkungsabschätzung vorgenommen wird. Ferner werden die berücksichtigten Lebenszyklusphasen sowie die verwendeten Datenquellen in fast allen Beiträgen genannt und dokumentiert. Überraschenderweise nennen nicht alle Beiträge die ISO 14040 oder 14044 als methodische Grundlage für die Durchführung von Ökobilanzen. Da die Norm bereits so weit verbreitet ist und zum Industriestandard gehört, nennen Experten die Norm nicht mehr explizit, verwenden diese aber dennoch. Außerdem fällt auf, dass die meisten Beiträge die Adressaten der Studien nicht explizit nennen. Eine genaue Definition der Adressaten zu Beginn von Ökobilanzstudien ist jedoch von großer Bedeutung für die Präsentation der Ergebnisse, da eine zielgerichtete Kommunikation von Ökobilanzergebnissen aufgrund der methodischen Komplexität eine besondere Herausforderung darstellt (Unterabschnitt 3.1.5). Ebenso werden in vielen Beiträgen Abschneidekriterien, Anforderungen an die Daten sowie Allokationsverfahren im Produktsystem nicht weiter diskutiert. Dadurch wird die Vergleichbarkeit von Studien sowie die Reproduzierbarkeit der Studien für Dritte erschwert.

³ Im Rahmen der beschreibenden Ökobilanzierung wird die Frage aufgeworfen, welcher Teil einer Umweltbelastung auf bestimmte Produkte oder Prozesse zurückgeführt werden kann. Hingegen befasst sich die konsequenzorientierte Ökobilanzierung mit den Auswirkungen eines bestimmten Entscheidungsschrittes, beispielsweise der Wahl von Produkt A statt Produkt B oder der Optimierung eines Prozesses (Frischknecht 2020)



Kategorien zur Analyse der Dokumentationsqualität

Abbildung 20: Bewertung der Dokumentationsqualität. Mittelwerte für alle 45 analysierten Beiträge (Keiser et al. 2023e)

Mittels der entwickelten Bewertungsmethode auf Basis des Kategoriensystems lässt sich zudem die Dokumentationsqualität einzelner Beiträge über alle Kategorien hinweg berechnen. Zudem wird eine Bewertung über alle Beiträge und Kategorien hinweg ermöglicht. Diese weiterführenden Auswertungen sowie die Bewertung der einzelnen Beiträge sind hierzu in Anhang A.5.2 zu finden. Für die weitere Entwicklung in Kapitel 5 lassen sich aus der systematischen Literaturliteraturanalyse folgende Kernerkenntnisse zusammenfassen:

- 1) Die funktionelle Einheit **Passagierkilometer** stellt den Stand der Forschung in der Luftfahrtindustrie für vergleichende Ökobilanzen dar.
- 2) Die **ReCiPe-Methode** stellt die anerkannteste und am weitesten verbreitete Methode zur Wirkungsabschätzung in der Luftfahrtindustrie dar.
- 3) Die Analyse der Dokumentationsqualität stützt die Relevanz dieser beiden Kategorien und diese methodischen Gesichtspunkte sind zwingend zu dokumentieren.
- 4) Weiterhin sind die **Lebenszyklusphasen** sowie das Thema der **Datenquellen** in der folgenden Entwicklung von hoher Bedeutung.

3.2.3 Analyse bestehender spezifischer Methoden in der Luftfahrtindustrie

Neben der Durchführung von einzelnen Ökobilanzstudien werden zunehmend spezifische Ökobilanzmethoden für die Luftfahrtindustrie entwickelt. Diese Methoden erlauben etwa die Berücksichtigung des Missionsprofils von Flugzeugen während der Betriebsphase. Zu den an Wissenschaftler adressierten Methoden gehört die von Johanning entwickelte Methode zur Integration von Ökobilanzen in den Flugzeugentwurf (Johanning 2017; Johanning und Scholz 2013). Die Methode berücksichtigt den gesamten Lebenszyklus von Verkehrsflugzeugen und verfolgt damit einen Cradle-to-Grave Ansatz. Zudem werden alle Teilsysteme des Flugzeugs in der Methode berücksichtigt und es wird eine vereinfachte Parametrisierung der Kabine vorgesehen. Prototypische Anwendung findet der entwickelte Ansatz bei dem Entwurf eines Turbopropflugzeuges sowie dem Vergleich von Wasserstoff und elektrisch angetriebenen Verkehrsflugzeugen (Johanning 2017). Ein weiterer methodischer Ansatz zur ökologischen Bewertung von Luftfahrtsystemen wurde von Ilg entwickelt (Ilg 2015). Die vorgeschlagene EnAvi-Methode (engl.: Environmental Assessment of Aviation Systems) ermöglicht auf Basis vereinfachter Dateneingaben die ökologische Bewertung von luftfahrtspezifischen Prozessketten und Materialien. Das entwickelte Vorgehen fußt auf dem klassischen Rahmenwerk von Ökobilanzierungen, es wird jedoch ausschließlich die Produktion von Bauteilen und Baugruppen analysiert (Ilg 2015). Ausgehend von dem wachsenden Interesse der Passagiere werden neben diesen vollumfänglichen Methoden zunehmend öffentlich zugängliche Rechner zur Berechnung von Flugemissionen entwickelt (atmosfair gGmbH 2016; IATA 2022; ICAO 2018; Myclimate gGmbH 2019). Diese webbasierten Rechner verwenden vereinfachte Berechnungsverfahren und ermöglichen auf Basis weniger Benutzereingaben das Darstellen von Ergebnissen. Ziel dieser Methoden ist die einfache Ergebnisdarstellung für Endkunden, welche einzelnen Flugreisen hinsichtlich deren Emissionen bewerten wollen. In Tabelle 6 werden die identifizierten Methoden mittels einer diskreten Skala mit fünf Merkmalsprägungen bewertet und verglichen. Die fünfstufige Skala bietet eine ausreichende Differenzierung bei gleichzeitiger Bewertungsrobustheit und eignet sich daher für Vergleiche dieser Art (Dawes 2008). Die Visualisierung erfolgt mittels sogenannter Harvey-Balls. Die Bewertung wird entsprechend der Zielstellung dieser Arbeit in folgenden drei Dimensionen durchgeführt: Erstens wird analysiert, inwieweit eine Parametrisierung der Eingabeparameter ermöglicht wird. Zweitens wird untersucht, ob die Flugzeugkabine konfigurierbar ist. Drittens werden methodische Punkte wie die gewählten Systemgrenzen, Datenquellen (Integration von Daten der Wertschöpfungskette) sowie die Darstellung der Ergebnisse analysiert.

Tabelle 6: Vergleich von spezifischen Methoden zur Umweltbewertung in der Luftfahrtindustrie (angelehnt an Keiser et al. 2023a)

Legende zur Bewertung		Bewertungskriterien					
		Auswahl Flugzeugtyp	Parametrisierung Missionsprofil	Konfigurierbarkeit Kabine	Gesamter Lebenszyklus als Systemgrenze	Integration Daten Wertschöpfungskette	Ergebnisdarstellung mittels Umweltindikatoren
<p>○ Ausprägung nicht vorhanden</p> <p>◐ Ausprägung sehr niedrig</p> <p>◑ Ausprägung niedrig</p> <p>◒ Ausprägung hoch</p> <p>◓ Ausprägung sehr hoch</p> <p>* <i>Webbasierte Emissionsrechner</i></p>							
Methoden	(Johanning 2017)	◓	◑	◑	◓	○	○
	(Ilg 2015)	○	◑	○	◑	○	◒
	(EUROCONTROL 2021)	◓	◓	○	○	○	◑
	(ICAO 2018)*	○	◓	○	○	○	◑
	(Myclimate gGmbH 2019)*	○	◓	○	○	○	◑
	(atmosfair gGmbH 2016)*	◓	◓	○	○	○	◑
	(IATA 2022)*	◓	◓	○	○	○	◑

Die Analyse der identifizierten Methoden zeigt zunächst deutlich den Bezug zum Endkunden bei den Emissionsrechnern. Diese verfolgen ausschließlich die Quantifizierung der CO₂-Emissionen für die Betriebsphase und es wird damit eine eindimensionale Analyse der Umweltwirkungen verfolgt. Demgegenüber stehen die Methoden von Johanning und Ilg, welche durch die Darstellung verschiedener Umweltindikatoren weitere Umweltwirkungen ausweisen. Weiterhin ermöglicht keiner der analysierten Methoden eine detaillierte Konfiguration und Parametrisierung der Kabine. Anwender der Methoden sind somit nicht in der Lage, verschiedene Kabinenelemente bzw. Layouts aktiv zu beeinflussen. Ferner wird in keiner der Methoden eine Vorgehensweise zur Integration von Daten aus der gesamten Wertschöpfungskette beschrieben. Die Analyse zeigt jedoch auch eine auf den Nutzer fokussierte Methodenentwicklung. Die starke Vereinfachung der webbasierten Emissionsrechner motiviert sich durch fehlendes Expertenwissen der Passagiere und durch das Ziel der einfachen Verständlichkeit. Die identifizierten vollumfänglichen Methoden fokussieren einen hohen Detailgrad hinsichtlich der verwendeten Daten und ermöglichen eine mehrdimensionale Ergebnisdarstellung. Die Anwendung derartiger Methoden liegt entsprechend auf Expertenebene und ist im industriellen Umfeld zu verorten.

Abschließend sei auf Methoden und Modelle hingewiesen, welche die Emissionen von Flotten bzw. der Luftfahrtindustrie in Summe modellieren (z.B. Lee et al. 2021) bzw. Treibstoffe miteinander vergleichen (z.B. Rojas-Michaga et al. 2023). Diese wurden bedingt durch den Fokus dieser Arbeit im Rahmen der hier vorgestellten Analyse nicht berücksichtigt.

3.2.4 Spezifische methodische Herausforderungen für die Modellierung

Für die Modellierung der Umweltwirkungen während der Betriebsphase sind die verursachten Umweltwirkungen durch die Verbrennung und Herstellung des Treibstoffes zu berücksichtigen. Die Phase des Fluges ist dabei nicht als homogener Prozess zu betrachten, sondern vielmehr in verschiedene Phasen zu gliedern. Wie in Abbildung 21 dargestellt kann ein Flugzyklus zunächst in die zwei übergeordneten Phasen Landung und Start (engl.: Landing and Take-off; kurz: LTO) sowie den Reiseflug mit der Unterteilung in Steigflug, Reiseflug sowie Sinkflug (engl.: Climb, Cruise, Descent; kurz CCD) gegliedert werden. Die CCD-Phase wird hierbei mit einer Höhe von 3000 Fuß von der LTO-Phase abgegrenzt (Mensen 2013).

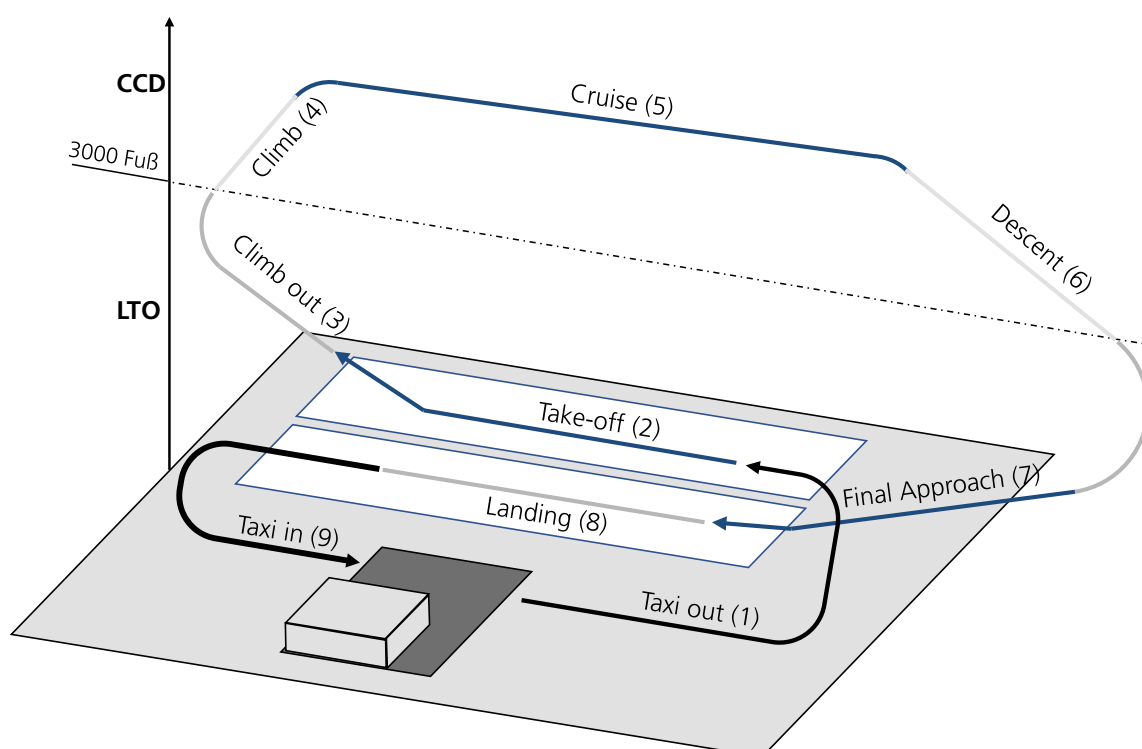


Abbildung 21: Phasen eines Flugzyklus gegliedert nach LTO- und CCD-Phase
(angelehnt an EUROCONTROL 2016)

Bedingt durch den großen Einfluss der Treibstoffverbrennung sowie der Unterschiede innerhalb der Phasen ist die detaillierte Modellierung ebendieser zu empfehlen. Hieraus ergeben sich verschiedene Herausforderungen für die Modellierung. Zunächst sind notwendige Datenquellen zu identifizieren und für die Phasen realitätsnahe Annahmen zu treffen. Zu nennen sind hier unter anderem die jeweilige Dauer für die Rollvorgänge, das Starten, den Steigflug sowie den Anflug. Aus der Perspektive der Umweltwirkungen ist ferner die höhenabhängige Wirkung von Emissionen zu berücksichtigen (Mahashabde et al. 2011). Die höhenabhängige Wirkung beschreibt vereinfacht die unterschiedliche Auswirkungen von Emissionen, je nachdem in welcher Höhe diese emittiert werden. Diese luftfahrtspezifischen Randbedingungen müssen bei der Berechnung der Umweltwirkung von Flugzeugen methodisch berücksichtigt werden und bringen eine zusätzliche Komplexität in die Modellierung (Rupcic et al. 2023).

3.3 Verfügbare luftfahrtspezifische Datenquellen zur Umweltbewertung

Für die Umweltbewertung in der Luftfahrt sind spezifische Datenquellen notwendig. Herausfordernd für die Modellierung und Berechnung der Umweltwirkungen sind im Kontext von Flugzeugen insbesondere die Betriebsphase mit der Verbrennung von Treibstoffen sowie die Herstellung der Treibstoffe. Dieser Abschnitt gibt daher zunächst einen Überblick über notwendige Daten und präsentiert eine Übersicht über Quellen und Institutionen, welche als Quellen Verwendung finden können. Der Bedarf an Daten lässt sich für die Betriebsphase dazu in drei Bereiche kategorisieren:

- **Daten für spezifische Treibstoffverbräuche von Verkehrsflugzeugen**, um auf Basis von Missionsprofilen den Treibstoffverbrauch z.B. für den gesamten Lebenszyklus berechnen zu können.
- **Emissionen bei der Treibstoffverbrennung**, um auf Basis des Treibstoffverbrauchs Umweltwirkungen berechnen zu können.
- **Emissionen bei der Treibstoffproduktion**, um auf Basis des Treibstoffverbrauchs Umweltwirkungen berechnen zu können.

Für die notwendigen Datensätze hinsichtlich der Treibstoffverbrennung ist zunächst die im vorherigen Abschnitt eingeführte Unterteilung der Flugphase von Verkehrsflugzeugen zu beachten. Entsprechend der Unterteilung nach Landing and Take-off-Phase (LTO-Phase) sowie der Climb, Cruise and Descent-Phase (CCD-Phase) stehen verschiedene öffentlich zugängliche Datenbanken zur Verfügung. Von der europäischen Umweltagentur (EEA) wurde im Rahmen des Programms zur Überwachung und Bewertung von Luftschadstoffen (EMEP) ein Leitfaden inklusive der Verbrauchswerte von allen üblichen Verkehrsflugzeugen entwickelt (European Environment Agency 2019). Die Datenbank basiert auf Daten aus dem Jahr 2019 und enthält Verbrauchswerte sowohl für die LTO- als auch für die CCD-Phase. Als weitere Institution, welche Verbrauchswerte in der Luftfahrtindustrie veröffentlicht, ist die internationale Luftfahrtorganisation (engl.: International Civil Aviation Organization; kurz: ICAO) zu nennen. In einer von der ICAO bereitgestellten Datenbank werden für übliche Triebwerke in der zivilen Luftfahrt Verbrauchswerte für die LTO-Phase dokumentiert (ICAO 2021). Hier zeigt sich ein Unterschied zur bereits eingeführten Datenbank: Während die Daten der EEA den Flugzeugtyp (z.B. Airbus A350) angeben, basieren die Daten der ICAO auf Triebwerkstypen (z.B. Rolls-Royce Trent XWB). Dennoch können beide Datensätze zur Modellierung des Treibstoffverbrauchs verwendet werden.

Um auf Basis des Treibstoffverbrauchs die Umweltwirkungen berechnen zu können, sind zweitens Daten notwendig, welche der Verbrennung von Flugzeugkerosin⁴ entsprechende Emissionen (z.B. CO₂) zuordnen und quantifizieren. Hierzu bieten verschiedene Institutionen Daten an, welche ergänzend verwendet werden können. Das britische Ministerium für Wirtschaft, Energie und Industriepolitik, die amerikanische Umweltschutzbehörde (EPA) sowie auch das deutsche Umweltbundesamt stellen Emissionsfaktoren für die Verbrennung von Kerosin und anderen Energieträgern bereit. Komplementär dazu werden von der ICAO in der bereits eingeführten Datenbank Emissionsfaktoren für Kohlenwasserstoff (HC), Kohlenstoffmonoxid (CO) sowie Stickstoffoxide (NO_x)

⁴ In der Praxis wird Flugzeugkerosin üblicherweise als Jet A-1 bezeichnet. Hierbei handelt es sich um den Handelsnamen für den heute gebräuchlichen Treibstoff in der zivilen Luftfahrt.

bereitgestellt. Neben den direkten Umweltwirkungen der Verbrennung stellen die Emissionen, verursacht durch die Treibstoffproduktionen einen signifikanten Faktor für die Berechnung der Umweltwirkungen dar. Für die Modellierung können zum Beispiel Daten von der europäischen Union sowie vom amerikanischen Ministerium für Energie verwendet werden (European Commission 2018; National Energy Technology Laboratory (NETL) 2005). In folgender Tabelle sind die identifizierten und dargestellten Datenbanken sowie Datenquellen zusammenfassend aufgeführt.

Für die spätere Entwicklung der Methode zur Berechnung der Umweltwirkungen in Abschnitt 6.3 werden die hier eingeführten Datenquellen wieder aufgegriffen und verwendet. Die genutzten Datenquellen wurden in der nachfolgenden Tabelle mit einem Asteriskus (*) markiert

Tabelle 7: Übersicht identifizierter Datenquellen zur Umweltbewertung von Verkehrsflugzeugen (angelehnt an Keiser et al. 2023a)

	Institution	Name	Beschreibung
Spezifischer Treibstoffverbrauch	Europäische Umweltagentur (EEA) im Rahmen des Programms zur Überwachung und Bewertung von Luftschadstoffen (EMEP)* (European Environment Agency 2019)	Luftschadstoffemissionen Leitfaden für das Inventar 2019 (EMEP/EEA)	<ul style="list-style-type: none"> Datenbank enthält Verbrauchswerte für die LTO- und CCD-Phase von allen üblichen Verkehrsflugzeugen Letzte Aktualisierung 2019
	Internationale Zivilluftfahrtorganisation (ICAO)* (ICAO 2021)	ICAO-Datenbank für Triebwerksemissionen von Flugzeugen	<ul style="list-style-type: none"> Enthält für gängige Flugzeugtriebwerke Verbrauchswerte, (Motorenspezifisch für die LTO-Phase angegeben) Standardisiertes Verfahren sowie laufende Aktualisierung Daten werden von Triebwerksherstellern an ICAO übermittelt
Emissionen Treibstoffverbrennung	Britisches Ministerium für Wirtschaft, Energie und Industriepolitik & für Umwelt* (Government Digital Service United Kingdom 2021)	Berichterstattung über Treibhausgase: Umrechnungsfaktoren 2022	<ul style="list-style-type: none"> Daten zu Emissionen von Kerosin Berechnungsmethode für Emissionen von Fahrzeugen Letzte Aktualisierung 2022
	Deutsches Umweltbundesamt (Graichen et al. 2010)	Überarbeitung des Emissionsinventars des Flugverkehrs	<ul style="list-style-type: none"> Detaillierte Emissionsfaktoren für Kerosin Letzte Aktualisierung 2010
	Internationale zivile Luftfahrtorganisation (ICAO)* (ICAO 2021)	ICAO-Datenbank für Triebwerksemissionen von Flugzeugen	<ul style="list-style-type: none"> Enthält auch die Umweltauswirkungen der Treibstoffverbrennung Ausschließlich Daten für LTO-Phase
	Amerikanische Umweltschutzbehörde (EPA) (U.S. EPA 2018)	Treibhausgas-Emissionsfaktoren Hub	<ul style="list-style-type: none"> Detaillierte Emissionsfaktoren für Kerosin
Emissionen Herstellung	Europäische Union* European Platform on Life Cycle Assessment (European Commission 2018)	Plattform für Ökobilanzen	<ul style="list-style-type: none"> Bereitstellung von Emissionsfaktoren für die Herstellung von Kerosin
	Amerikanisches Ministerium für Energie. Nationales Labor für Energietechnologie* (National Energy Technology Laboratory (NETL) 2005)	Lebenszyklus-Inventardaten - Prozesseinheit: Kerosin auf Erdölbasis Jet Fuel Energieumwandlungsanlage	

3.4 Zwischenfazit

Das Zwischenfazit zum Stand der Forschung von Ökobilanzen lässt sich in zwei Bereiche gliedern: Zunächst wird nachfolgend allgemein ein Fazit zur Methode der Ökobilanzierung dargestellt. Darauf aufbauend kann auf Basis der Erkenntnisse der systematischen Literaturanalyse ein Fazit im Hinblick auf deren Anwendung in der Luftfahrtindustrie gezogen werden.

Die Methode der Ökobilanzierung gilt in Forschung und Praxis als anerkannte Methode zur Modellierung von Produkten, Prozessen sowie Services und lässt sich dabei klar von anderen wissenschaftlichen Methoden abgrenzen. Die Vorgehensweise wird durch ein vierphasiges Vorgehen, dessen Standardisierung maßgeblich durch die DIN EN ISO Reihe 14040 – 14044 vorangetrieben wurde, geprägt. Die vier Schritte sind: Festlegung von Ziel und Untersuchungsrahmen, Aufstellen der Sachbilanz, Wirkungsabschätzung sowie abschließend die Auswertung. Für die Wirkungsabschätzung stehen verschiedene Methode zur Verfügung. Bei der Auswahl einer Methode sind die beschriebenen Unterschiede im Rahmen dieses Kapitels zu beachten. Die Anwendungsfelder sowie Zielstellungen von Ökobilanzen lassen sich entlang des gesamten Wertschöpfungsprozesses sowie unabhängig von spezifischen Branchen verorten. Trotz der vielfältigen Anwendungsfelder bestehen bei der Anwendung weiterhin Herausforderungen. Zu nennen sind hier unter anderen die großen Herausforderungen bei der Datenbeschaffung, die Unsicherheit der Ergebnisse sowie deren Kommunikation.

Für das Anwendungsfeld der Luftfahrtindustrie lässt sich festhalten, dass Ökobilanzen zunehmend an Bedeutung gewinnen und die Anzahl an wissenschaftlichen Veröffentlichungen kontinuierlich steigt. Die bisherige Anwendung von Ökobilanzen fokussiert entweder auf das Gesamtflugzeug oder auf spezifische Bauteile. Die Flugzeugkabine als Modul eines Verkehrsflugzeuges wurde bisher nicht untersucht und keine methodische Unterstützung zur Modellierung ebendieser entwickelt. Bisherige Methoden fokussieren damit nicht explizit die Flugzeugkabine als Betrachtungsgegenstand. Ferner fehlt es an integrierten Prozessmodellen, um die Ökobilanzen als Teil der Geschäftsprozesse zu etablieren. Erste Ansätze dazu finden sich bei der Integration in den Flugzeugentwurf. Der hier betrachtete Konfigurationsprozess der Flugzeugkabine wurde bisher jedoch nicht im Hinblick auf die Integration von Ökobilanzen untersucht. Schließlich sei in diesem Zwischenfazit die Modellierung der Betriebsphase als besondere Herausforderung genannt. Hierfür bedarf es der in diesem Kapitel beschriebenen Datenquellen, um die Umweltwirkungen adäquat modellieren zu können.

4 Ableitung der Forschungsfragen sowie des konzeptionellen Rahmens

In diesem Kapitel wird auf Basis der in Abschnitt 1.2 dargelegten Zielstellung sowie der Erkenntnisse aus den Kapiteln 2 und 3 der konzeptionelle Rahmen dieser Arbeit hergeleitet. Grundlage für den Ansatz zur Lösung der Zielstellung stellen Forschungsfragen dar. Die Forschungsfragen motivieren die zu entwickelnden Artefakte, welche schließlich zur Gesamtsystematik zusammengeführt werden. Als Ergebnis dieses Kapitels stellt Abbildung 22 den Gesamtkontext dieser Arbeit durch Verbindung von Forschungsfragen, Artefakten sowie deren Interaktion dar. Ferner bildet dieser konzeptionelle Rahmen die notwendige Voraussetzung für die folgende Anforderungsanalyse (siehe Abschnitt 5.2), da Anforderungen erst an ausreichend skizzierte Systeme formuliert werden können (Schwinn 2011).

Ausgehend von der Zielstellung dieser Arbeit, welche die Entwicklung einer Systematik für die ökologische Bewertung von Flugzeugkabinen zur Integration in den Konfigurationsprozess unter Verwendung von Lebenszyklusdaten darstellt, kann die zentrale und **forschungsleitende Fragestellung** dieser Arbeit formuliert werden:

Wie kann eine systematische und prozessintegrierte ökologische Bewertung innerhalb des Konfigurationsprozesses von Flugzeugkabinen erfolgen?

Die Lösung dieser zentralen Forschungsfrage erfolgt im Rahmen dieser Arbeit mithilfe des Rahmenwerks von Ökobilanzen und unter besonderer Berücksichtigung der anwendungsorientierten, ingenieurwissenschaftlichen Forschung. Hierdurch werden die aufgezeigten Forschungsfelder aus Abschnitt 1.2 adressiert. Für den Forschungsprozess gliedert sich die zentrale Forschungsfrage in weitere Betrachtungsgegenstände mit dezidierten Forschungsfragen: Zentral für die ökologische Bewertung von Produkten ist zunächst eine ausreichende Datenbasis. Diese nimmt einen Großteil der Ressourcen ein und ist eine der Kernherausforderungen bei Ökobilanzen (Unterabschnitt 3.1.2). In der Luftfahrtindustrie ist dies vor dem Hintergrund der komplexen Wertschöpfungskette als besondere Hürde zu beurteilen (Abschnitt 2.1). Dies zeigt nicht zuletzt auch der formulierte Forschungsbedarf im Hinblick auf eine strukturierte Datenerfassung entlang des Lebenszyklus von Verkehrsflugzeugen (Keiser et al. 2023e; Melo et al. 2020; Rolinck et al. 2021). Hieraus motiviert kann der erste Betrachtungsgegenstand mittels folgender konkretisierter Forschungsfrage innerhalb der Systematik formuliert werden:

1. Wie können die notwendigen Lebenszyklusdaten standardisiert für den gesamten Lebenszyklus von Flugzeugkabinen erfasst und aggregiert werden, sodass eine ausreichende Datenbasis für die Ökobilanzierung besteht?

Dieser erste Baustein des konzeptionellen Rahmens adressiert somit eine der typischen Herausforderungen im Kontext der praktischen Anwendung von Ökobilanzen und ist zudem weiterhin Gegenstand aktueller Forschungen. Das hieraus resultierende Artefakt stellt den ersten zu erforschenden Gegenstand in Form eines **Prozessmodells zur Integration von Zuliefererdaten** dar.

Dieses Prozessmodell zielt auf eine Integration von Zulieferern bei der Ökobilanzierung ab und soll erstens eine ausreichende Datenbasis sicherstellen und zweitens eine Modellierung des gesamten Lebenszyklus (*Cradle-to-Grave*) ermöglichen. Dieses erste Artefakt ist zudem der Input für den nächsten Baustein der Systematik.

Der zweite Betrachtungsgegenstand fokussiert die ökologische Bewertung des hier untersuchten Produktsystems. Dieser stellt die Flugzeugkabine von zivilen Großraumflugzeugen dar (Abschnitt 1.2). Die Analyse bestehender Ökobilanzmethoden in der Luftfahrtindustrie zeigt, dass die Konfigurierbarkeit und Individualisierbarkeit von Flugzeugkabinen bisher nicht ausreichend berücksichtigt wurde (Unterabschnitt 3.2.3). Dieses hohe Maß an Konfigurierbarkeit ist für die Luftfahrtindustrie jedoch einzigartig (Unterabschnitt 2.6.1) und ermöglicht eine direkte Beeinflussung der Umweltwirkungen (Abschnitt 1.1). Mit dem Ziel, die ökologische Bewertung von Flugzeugkabinen direkt in den Konfigurationsprozess zu integrieren, ist die zweite Forschungsfrage im Rahmen dieser Arbeit zu beantworten:

2. Wie kann die Ökobilanz von Flugzeugkabinen mittels einer parametrisierbaren Methodik vereinfacht werden, sodass eine direkte Integration in den Konfigurationsprozess ermöglicht wird?

Für die Beantwortung dieser Forschungsfrage lässt sich entsprechend des DSR-Prozesses ein weiteres Artefakt definieren: Eine **parametrisierbare Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode für Flugzeugkabinen**. Diese Methodik muss zum einen die Besonderheiten im Hinblick auf die Betriebsphase in der Luftfahrtindustrie (Unterabschnitt 3.2.4) berücksichtigen und zum anderen die Module einer Flugzeugkabine (Abschnitt 2.4) abbilden können. Darüber hinaus ist die inhärente Komplexität von Ökobilanzen (Unterabschnitt 3.1.5) nicht außer Acht zu lassen.

Ein dritter Betrachtungsgegenstand adressiert die Ergebnisse aus dem Stand der Forschung zu Konfigurationsprozessen. Die Analyse zeigt, dass Konfigurationsprozesse mittels softwaretechnischer Systeme (PCS) unterstützt werden und die Entwicklung derartiger Systeme Gegenstand aktueller Forschung ist (Unterabschnitt 2.5.2). Für die Operationalisierung der Systematik erscheint die Untersuchung einer möglichen softwaretechnischen Umsetzung zum einen vor diesem Hintergrund sinnvoll. Ferner bedingt sich der dritte Bereich der Forschungsaktivitäten innerhalb dieser Arbeit durch die Komplexität von Flugzeugkabinen sowie die inhärente Komplexität von Ökobilanzen. Darüber hinaus ist der Konfigurationsprozess durch eine starke Kollaboration der Flugzeughersteller mit den Fluggesellschaften geprägt und die Nutzung von IT-Systemen unterstützt bei entsprechender Auslegung sowohl die Eingabe von Daten als auch die direkte Darstellung der Ergebnisse. Hieraus motiviert sich die dritte Forschungsfrage dieser Arbeit:

3. Wie kann die Systematik zur ökologische Bewertung von Flugzeugkabinen in ein Produktkonfigurationssystem integriert werden, sodass die Operationalisierung ebendieser unterstützt wird?

Aus dieser Forschungsfrage folgt das dritte Artefakt dieser Arbeit in Form einer **softwaretechnischen Umsetzung** der Systematik. Die Synthese zur Gesamtsystematik und damit die Adressierung der forschungsleitenden Fragestellung erfolgt durch die Integration der entwickelten Artefakte in den Konfigurationsprozess der Kabine. Konkrete Forschungsarbeiten zur Integration von

Ökobilanzen in den Konfigurationsprozess der Luftfahrtindustrie existierten bisher nicht (Unterabschnitt 2.5.2). Die Synthese im Rahmen dieser Arbeit leistet daher auch hier einen Beitrag zum Forschungsgegenstand. Wie im konzeptionellen Rahmen dargestellt erfolgt die Synthese durch ein unterstützendes integriertes Phasenmodell. Gegenstand dieses Phasenmodells sind die notwendigen Tätigkeiten der beteiligten Akteure. Dennoch stellt dieses Phasenmodell lediglich eine notwendige Bedingung für die Implementierung dar und ist nicht Kerngegenstand dieser Arbeit.

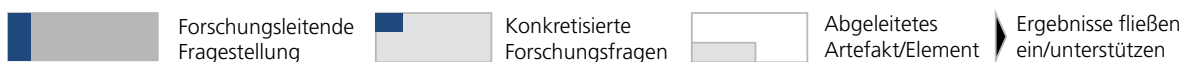
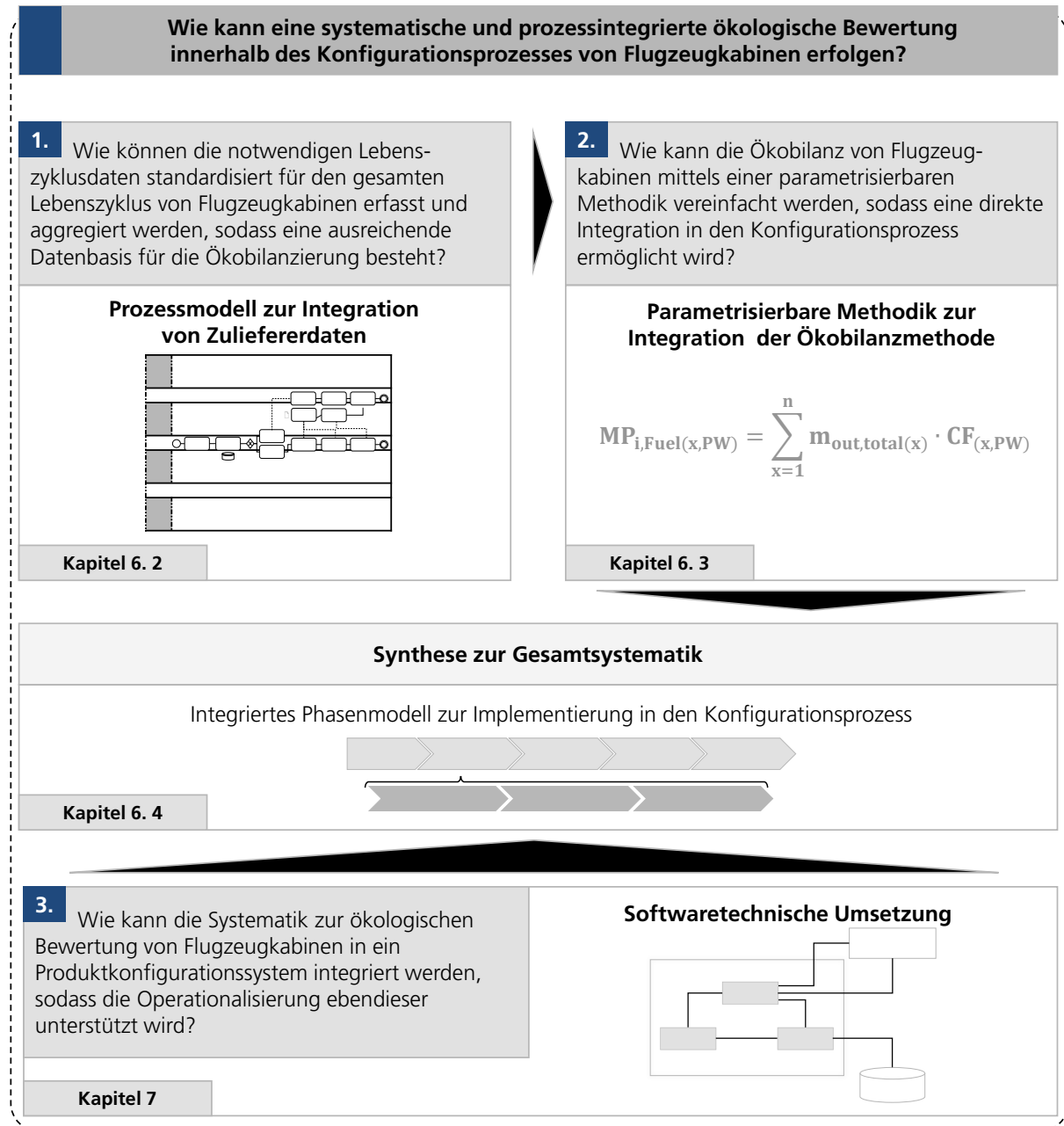


Abbildung 22: Konzeptioneller Rahmen dieser Arbeit

5 Potenzial-, Bedarfs- sowie Anforderungsanalyse

Basierend auf dem in Kapitel 4 entwickelten konzeptionellen Rahmen für eine Systematik zur Integration einer ökologischen Bewertung in den Konfigurationsprozess der Flugzeugkabine stellt dieses Kapitel zum einen eine weitere Analyse von Anwendungsfällen für Ökobilanzen mit dem Ziel dar den identifizierten Anwendungsrahmen des Forschungsgegenstandes mehrdimensional abzusichern (Abschnitt 5.1). Zum anderen werden in Abschnitt 5.2 Anforderungen an die zu entwickelnden Artefakte und Elemente ermittelt. Zur Anforderungsermittlung soll die aus der ISO 9000 stammende Auffassung von Anforderungen gelten: Demnach stellen Anforderungen die *Erfordernis oder Erwartung, das oder die festlegt, üblicherweise vorausgesetzt oder verpflichtend* ist, dar (DIN EN ISO 9000 2015). Wie in Abbildung 23 dargestellt werden für beide Teilbereiche sowohl qualitative als quantitative Methoden verwendet.

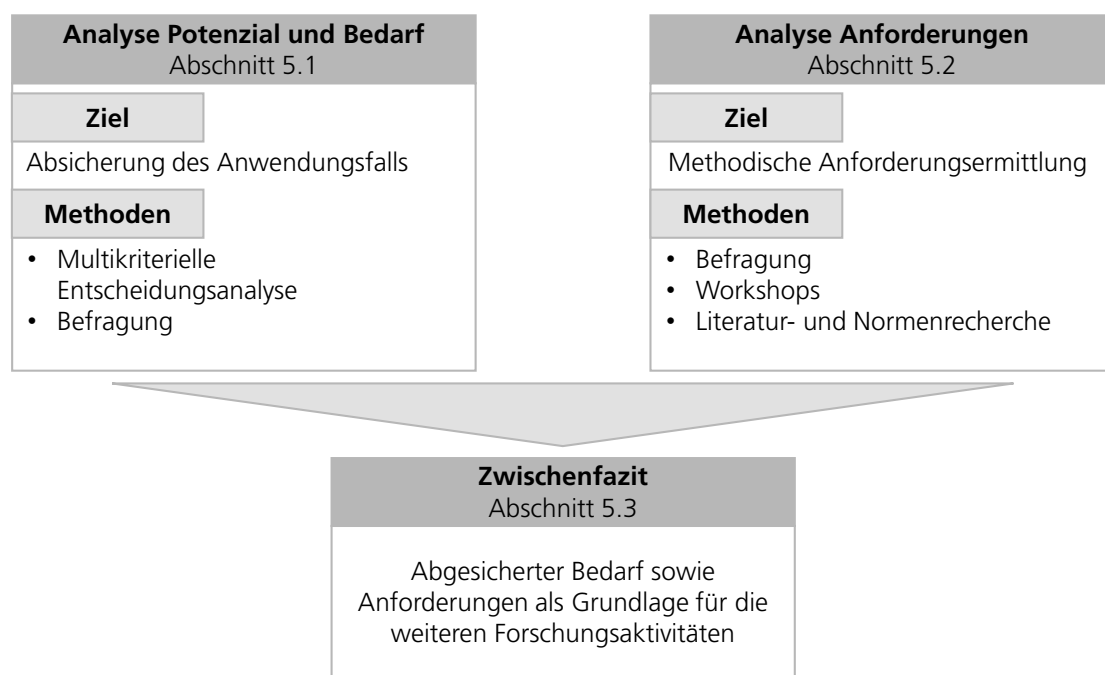


Abbildung 23: Vorgehen zur Analyse des Anwendungsfalls sowie zur Anforderungsanalyse

Nachfolgend werden der gewählte Methodeneinsatz sowie die daraus generierten Erkenntnisse dargestellt. Das Kapitel schließt mit dem Fazit zur Untersuchung des Anwendungsfalls sowie der Anforderungsermittlung und Analyse.

5.1 Potenzial- und Bedarfsanalyse

Erfolgreiche Entwicklungs- und Forschungsarbeiten erfordern neben der wissenschaftlichen Fundierung ein ausgeprägtes strategisches Verständnis für wirkende Einflussfaktoren im Anwendungskontext. Hierzu ist erstens der Stand des Wissens in Kapitel 2 und 3 dargestellt und analysiert worden. Zweitens erfolgt in diesem Abschnitt eine Analyse des Anwendungsfalls. Bedingt durch die Komplexität der Wertschöpfungs- und Stakeholderstruktur (Abschnitt 2.2) in der Luftfahrtindustrie fokussiert die hier durchgeführte keine vollumfängliche Analyse ebendieser. Gegenstand ist insbesondere die Absicherung des Potenzials zur Einführung von Ökobilanzen im Konfigurati-

onsprozess bei Flugzeugherstellern. Entsprechend ist die folgende Analyse und Potenzialbewertung aus Sicht von Flugzeugherstellern durchzuführen. Darauf aufbauend wird in diesem Kapitel zur weiteren Absicherung des Anwendungsfalls eine Befragung von Fluggesellschaften vorgestellt (siehe Unterabschnitt 5.1.2).

5.1.1 Potenzialanalyse des Anwendungsfalls

Die Analyse des Potenzials hinsichtlich der Anwendung von Ökobilanzen innerhalb des Konfigurationsprozess der Flugzeugkabine kann aufgrund der Vielzahl an Einflussfaktoren, möglichen alternativen Anwendungsfeldern für Ökobilanzen bei Flugzeugherstellern und Bewertungskriterien als multidimensionales Entscheidungsproblem betrachtet werden (Keiser et al. 2023d). Hieraus ergibt sich die Motivation zur Anwendung von Methoden der multikriteriellen Entscheidungsfindung (engl.: Multi-Criteria Decision Making, kurz MCDM). Ziel dieser Methoden ist die Zerlegung komplexer Entscheidungsprobleme in bewertbare Teilprobleme unter Berücksichtigung von klar definierten, mehrdimensionalen Bewertungskriterien (Belton und Stewart 2002). Grundsätzlich kann dabei zwischen zwei methodischen Vorgehensweisen unterschieden werden (Zimmermann und Gutsche 1991): Erstens können Methoden des Multi-Objective Decision Making (MODM) verwendet werden. Diese verfolgen eine mathematische Optimierung, beispielsweise mit Methoden der Vektoroptimierung (Geldermann 2014). Zweitens können Verfahren des Multi-Attribute Decision Making (MADM) Verwendung finden. Typische Ansätze sind hier Nutzwertanalysen (Kühnapfel 2021) oder das aus dem anglo-amerikanischen Raum bekannte Verfahren des analytischen Hierarchieprozesses (engl.: Analytic Hierarchy Process, kurz AHP) (Meixner und Haas 2015). Der AHP stellt in der Wissenschaft ein anerkanntes Verfahren dar (Fountzoula und Aravossis 2022) und wird, bedingt durch die Flexibilität sowie der Möglichkeit zur hierarchischen Strukturierung von Entscheidungsproblemen, vermehrt in der Luftfahrtindustrie eingesetzt (Dožić 2019). Zudem eignet sich die Methode für strategische Fragestellungen (Westphal 2016).

Im Rahmen dieser Arbeit wird der AHP daher als methodisches Grundgerüst für die Entwicklung eines allgemeinen Entscheidungs- und Potenzialmodells hinsichtlich der dauerhaften Einführung von Ökobilanzen verwendet. Dieses Modell ist im Zuge der Forschungsarbeiten bereits veröffentlicht worden (Keiser et al. 2023d). Entsprechend der Vorgehensweise des AHP sind für das Modell zunächst Entscheidungs- sowie Bewertungskriterien zu ermitteln (Saaty 1995). Zur Entwicklung der Bewertungskriterien werden übergeordnet zwei Zieldimensionen verfolgt: Erstens die **betriebliche Umsetzbarkeit** hinsichtlich der Einführung von Ökobilanzen. Diese Zieldimension bedingt sich durch die in Unterabschnitt 3.1.5 dargelegten Herausforderungen bei der Einführung von Ökobilanzen. Die zweite Dimension leitet sich aus den gesetzten Zielen der Luftfahrtindustrie (Abschnitt 1.1) ab und beschreibt den möglichen **ökologischen Beitrag des Anwendungsfalls**.

Zur Operationalisierung beider Zieldimensionen sind konkrete Bewertungskriterien herzuleiten. Für die Zieldimension *betriebliche Umsetzbarkeit* lassen sich diese, bedingt durch die projektähnliche Struktur bei der Einführung sowie der Durchführung von Ökobilanzen, anhand des bekannten Zieldreiecks des Projektmanagements (Jakoby 2021) definieren. Dieses formuliert die drei Kriterien Qualität, Kosten sowie Zeit. Im Kontext des vorliegenden Entscheidungsproblems lassen sich die Kriterien Kosten und Zeit direkt übertragen. Bedingt durch die organisatorische wie auch

methodische Komplexität bei der Einführung von Ökobilanzen kann das Kriterium Komplexität als Qualitätskriterium verstanden werden. Die Zieldimension *ökologischer Beitrag* kann mit folgenden drei Bewertungskriterien beschrieben werden: Zum einen lassen sich anhand der Anwendungsfälle das Potenzial zur Emissionsminderung sowie das Potenzial zur Ressourcenschonung bewerten. Bedingt durch die langen Entwicklungszeiträume sowie die langen Betriebsphasen (Kapitel 2) in der Luftfahrt stellt die Zeit bis zum der verbesserten Umweltbilanz einen dritten wichtigen Aspekt für die Bewertung dar. Nachdem die Entscheidungskriterien definiert wurden, sind im nächsten Schritt Entscheidungsalternativen zu definieren. Die Strukturierung dieser erfolgt auf Basis der im Stand der Technik vorgestellten Anwendungsfälle von Ökobilanzen (Tabelle 4 in Unterabschnitt 3.1.4).

Die Struktur sowie das Vorgehen innerhalb des entwickelten Entscheidungsmodells ist auf Basis der definierten Kriterien und Entscheidungsalternativen in Abbildung 24 dargestellt. Bedingt durch den stark steigenden Aufwand für die Durchführung und damit einhergehender Inkonsistenzen der Ergebnisse wird ein zweistufiges Verfahren zur Bewertung der Potenziale angewendet: Als erste Ebene der Entscheidungsalternativen ermöglichen die innerbetrieblichen Funktionsbereiche im Wertschöpfungsprozess von Unternehmen eine übergeordnete Bewertung der sieben berücksichtigten Funktionsbereiche nach Porter (Unterabschnitt 3.1.4). Als Ergebnis dieser ersten Bewertung wird eine Hierarchie hinsichtlich des Potenzials auf Ebene der Funktionsbereiche gebildet. Entsprechend dieser Hierarchie erfolgt auf Ebene zwei des Entscheidungsmodells innerhalb der am höchsten bewerteten Funktionsbereiche eine weitere Bewertung mittels des AHP, um so für die konkreten Anwendungsfälle in Unterabschnitt 3.1.4 die Hierarchie hinsichtlich der Potenziale zu bilden.

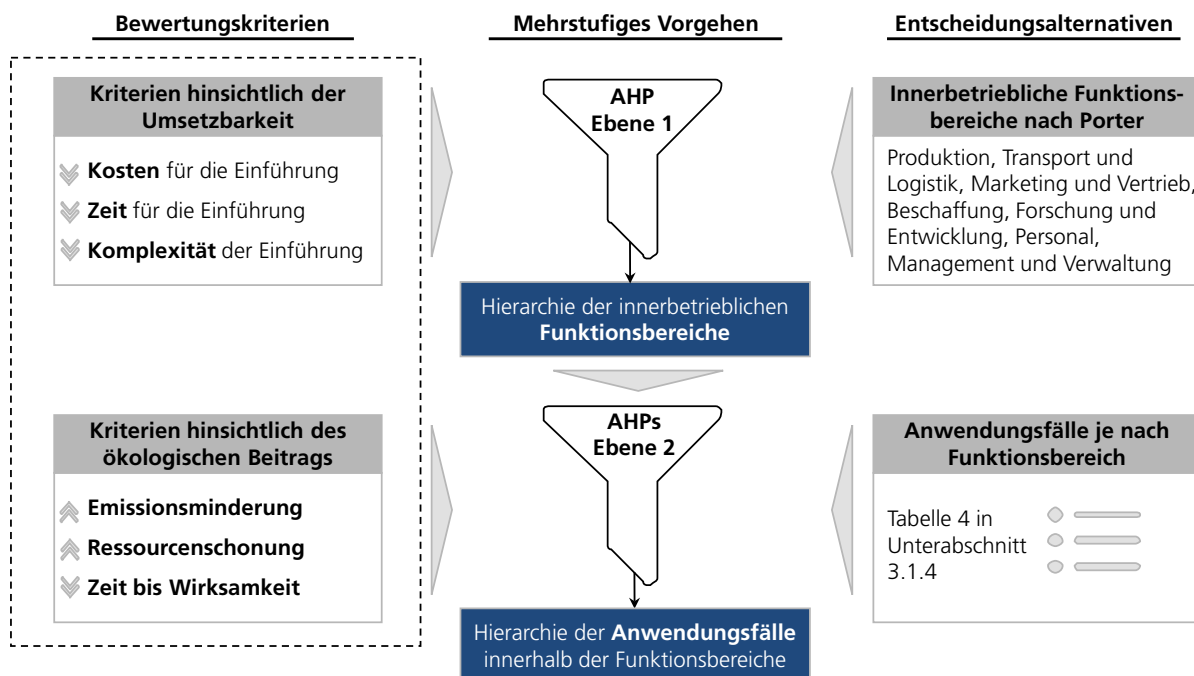


Abbildung 24: Vorgehen zur Bewertung der Potenziale hinsichtlich der Anwendung von Ökobilanzen mittels mehrstufigem AHP (angelehnt an Keiser et al. 2023d)

Für die Durchführung des beschriebenen Vorgehens wurde die von Goepel entwickelte webbasierte Softwarelösung verwendet (Goepel 2018). Zur Absicherung der Gewichtungen wurde das

gesamte Vorgehen von zwei Wissenschaftlern, dessen Forschungsschwerpunkt Ökobilanzierungen in der Luftfahrt darstellen, sowie einem Studierenden mit technischem Studienschwerpunkt und Kenntnissen in der Luftfahrtindustrie durchgeführt und abschließend zu globalen Gewichtungen zusammengeführt. Zudem wurde die Methode der *Personas*⁵ angewendet, um eine Bewertung aus verschiedenen Perspektiven gewährleisten zu können (Chang et al. 2008). Für die Hierarchie der Funktionsbereiche zeigt sich die in Abbildung 25 dargestellte Hierarchie auf Basis der im Anhang A.6 dokumentierten Ergebnisse des AHP. Das Potenzial für den Bereich Marketing und Vertrieb wird unter Berücksichtigung der gewichteten Bewertungskriterien am größten eingeschätzt. Direkt folgend wird der Funktionsbereich Forschung und Entwicklung genannt. Das hohe Potenzial im Bereich Marketing und Vertrieb bedingt sich bei näherer Betrachtung der Gewichtungen durch die vergleichsweise geringen Kosten sowie die Zeit für die Einführung. Zudem wird die Komplexität eher als gering eingeschätzt und die Zeit bis zur Wirksamkeit bezogen auf die Umweltbilanz wird relativ zu anderen Funktionsbereichen als gut eingestuft. Demgegenüber stehen relativ zur Forschung und Entwicklung schlechtere Bewertungen für die Dimensionen Emissionsminderung und Ressourcenschonung. Diese beiden Dimensionen führen zu einem hohen relativen Potenzial für den Funktionsbereich Forschung und Entwicklung. Für die Anwendungsfälle im Funktionsbereich Marketing und Vertrieb zeigt sich das größte Potenzial für den Anwendungsfall Entscheidungshilfe zwischen Produkten.

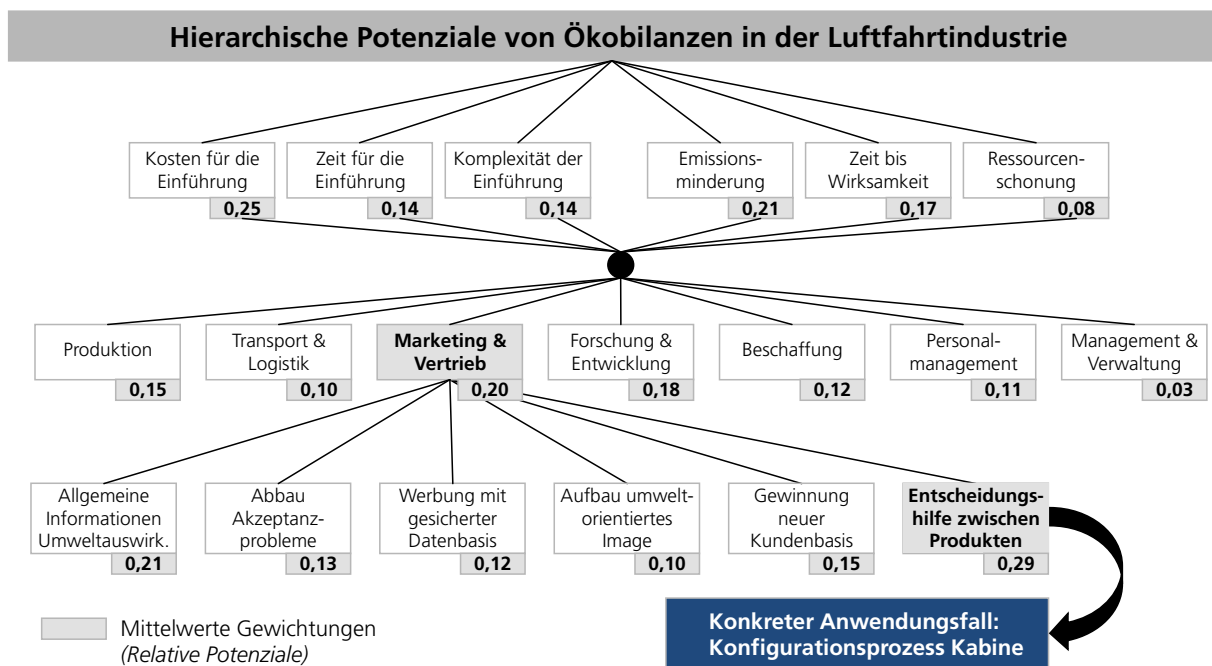
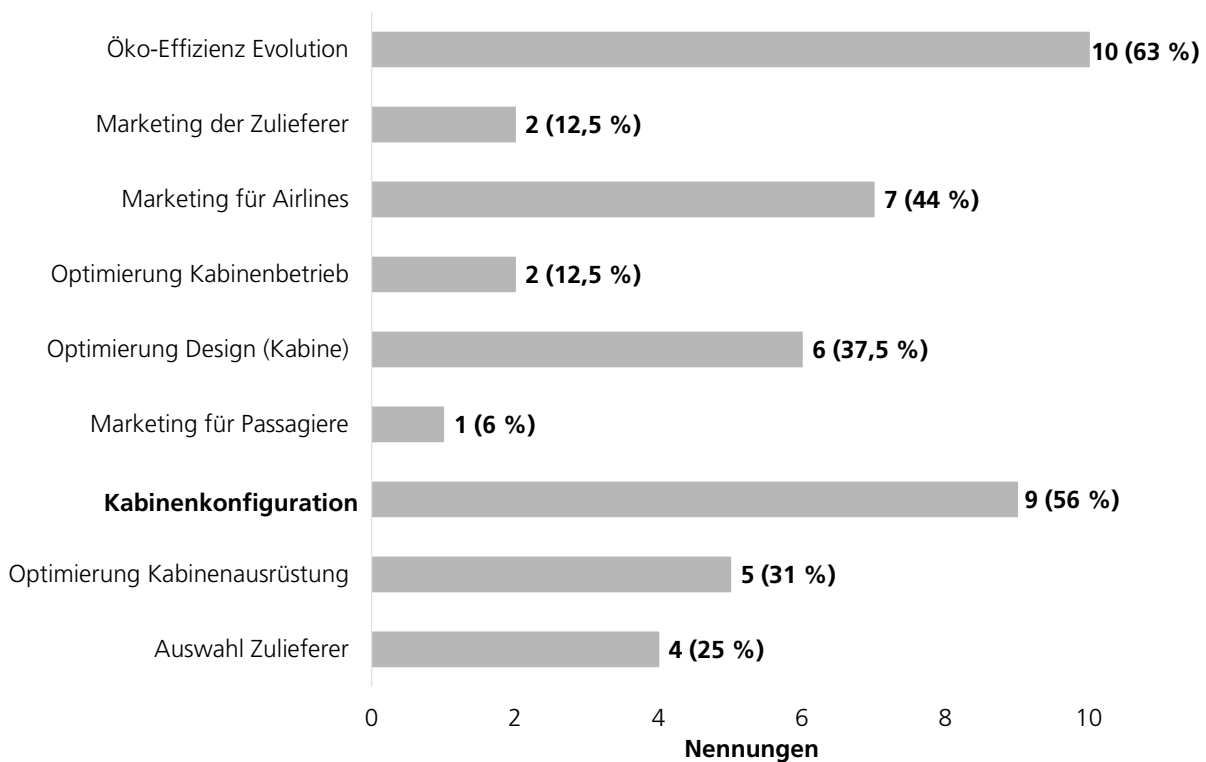


Abbildung 25: Ergebnis der Potenzialbewertung mittels AHP (angelehnt an Keiser et al. 2023d)

Bedingt durch die nahe aneinander liegenden Ergebnisse des AHP sowie der bekannten Kritik an derartigen Verfahren hinsichtlich der Subjektivität (Ishizaka und Labib 2011) sind üblicherweise Sensitivitätsstudien mit den Ergebnissen durchzuführen (Westphal 2016). Ausgehend von dem Anwendungskontext dieser Arbeit sowie der Einordnung in die Realwissenschaften (Abschnitt 1.3)

⁵ Die Methode der *Personas* ist in den Design Wissenschaften entwickelt worden und dient zur Verständnisbildung verschiedener (fiktiver) Nutzergruppen (Chang et al. 2008). Im Kontext des AHP wurde die Methode angewandt, um zwei Managementperspektiven und eine Fachperspektive zu berücksichtigen.

wurde zur Absicherung des Ergebnisses eine Teil-Befragung bei einem Flugzeughersteller durchgeführt und keine weitere Sensitivitätsstudie erstellt. Die Befragung wurde insbesondere zur in Abschnitt 5.2 dargestellten Anforderungsanalyse durchgeführt. Daher erfolgt die detaillierte Beschreibung des Studiendesigns zur Befragung im folgenden Abschnitt. Im Rahmen der Befragung bei einem Flugzeughersteller konnte, wie in Abbildung 26 dargestellt, der bereits identifizierte Anwendungsfall innerhalb des Kabinenkonfigurationsprozesses bestätigt werden. So gaben 56 % der Befragten an, dass die Kabinenkonfiguration im Vergleich zu anderen Anwendungsfällen als sinnvoll erachtet wird. Auf Platz eins des Rankings wurde von den Befragten die öko-effiziente Evolution innerhalb der Organisationsstruktur gewählt. Hierbei handelt es sich jedoch nicht um einen spezifischen Anwendungsfall, vielmehr wird von den Befragten die strategische Perspektive von Ökobilanzen adressiert. Es zeigt sich zudem, dass mit der Optimierung des Kabinendesigns sowie der Kabinenausrüstung Anwendungsfälle aus dem Funktionsbereich Forschung und Entwicklung positiv bewertet wurden.



Welches sind Ihrer Meinung nach die 3 besten Anwendungsfälle für Ökobilanzen in der Flugzeugkabine (und -Fracht)? Bitte wählen Sie aus. – n: 16 (2 Enthaltungen)

Abbildung 26: Ergebnis der Befragung zur Bewertung der Anwendungsfälle von Ökobilanzen mit Fokus auf Flugzeugkabinen

5.1.2 Bedarfsanalyse

Im Rahmen dieser Arbeit konnte die Potenzialanalyse des fokussierten Anwendungsfalls durch eine kundenorientierte Bedarfsanalyse weiter abgesichert werden. Hierzu werden im Folgenden die Teilergebnisse einer Umfrage unter Fluggesellschaften vorgestellt. Die Umfrage wurde von der Airbus Operations GmbH im Rahmen einer Messe im Jahr 2022 vorgestellt. Ziel war es, direkte Rückmeldungen zu aktuellen Forschungsprojekten und Initiativen von den Fluggesellschaften zu

erhalten. Dieses kundenzentrierte Vorgehen mit der frühen Einbindung ermöglicht eine auf den Markt ausgerichtete Forschungsstrategie und die iterative Anpassung ebendieser.

Insgesamt konnten 17 Fluggesellschaften zu verschiedenen Forschungsinitiativen befragt werden. Eine der vorgestellten Initiativen war der im Rahmen dieser Arbeit konzeptionierte Ansatz zur Integration von Ökobilanzierungen in die Entscheidungsprozesse der Flugzeugkabine. Gegenstand der Umfrage war, wie in Abbildung 27 zu sehen, die Bewertung möglicher Anwendungsfälle des Konzepts. Vorab wurden fünf Anwendungsfälle für die Umfrage definiert:

- 1) Vergleich von Kabinenlayouts während der Definitions-/Konfigurationsprozesse
- 2) Vergleich von Kabinenlayouts bei Instandsetzungen
- 3) Bewertung der Umweltwirkungen bei neuen Services (z. B. neue Angebote während des Flugs)
- 4) Kommunikation an Passagiere (z. B. während des Buchungsprozesses)
- 5) Kommunikation an andere Stakeholder (z. B. Aktionäre oder regulierende Behörden)

Diese Anwendungsfälle sowie das Konzept wurden von einem Experten des Flugzeugherstellers zunächst vorgestellt. Anschließend erfolgte die Bewertung der Fluggesellschaften mit einer 5-stufigen Likert-Skala.

Alle 17 Fluggesellschaften hielten den Vergleich von Kabinen für relevant, wobei 10 der befragten Fluggesellschaften diesen Anwendungsfall sogar als sehr relevant einschätzten. Damit ist dieser Anwendungsfall mit der höchsten Relevanz bewertet worden. Darauf folgend wurde die Bewertung von Kabinenlayouts bei Instandsetzungen sowie die Bewertung von neuen Services mit einer mittleren Relevanz bewertet. Die Nutzung der Ergebnisse für die Kommunikation wurde von den Fluggesellschaften eher als neutral bewertet.

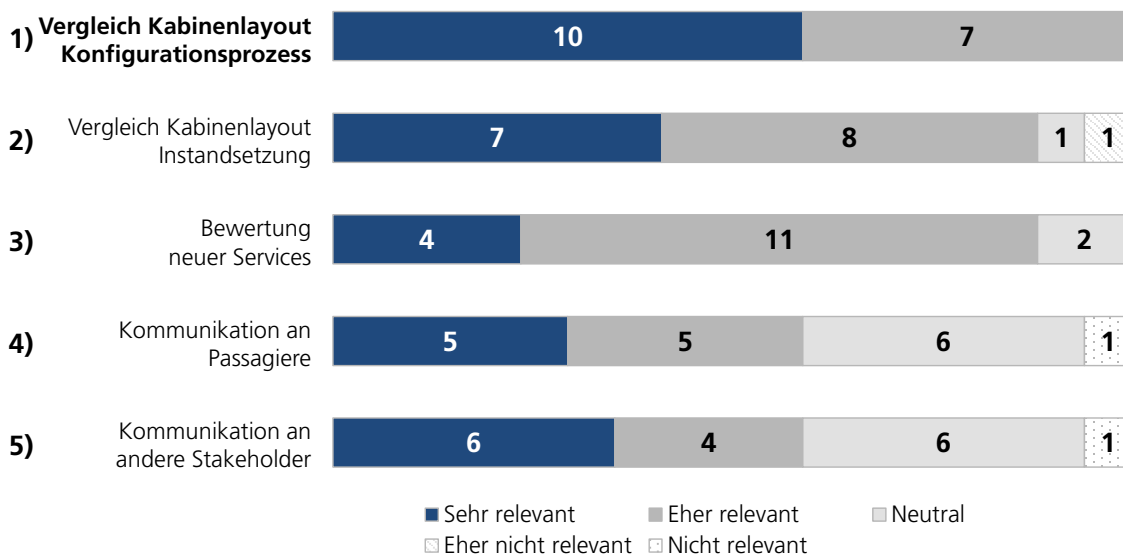


Abbildung 27: Ergebnisse der Befragung von Fluggesellschaften zur Bewertung der Relevanz des Ansatzes (Airbus Operations GmbH 2022)

5.2 Anforderungsanalyse

Ausgehend von dem beschriebenen Forschungsdesign in Abschnitt 1.4, den dargestellten Grundlagen in Kapitel 2 und 3 sowie dem hergeleiteten konzeptionellen Rahmen in Kapitel 4 leitet dieser Abschnitt die Anforderungen für die zu erforschenden Artefakte her. Abbildung 28 zeigt die Struktur und Gegenstände zur Anforderungsermittlung innerhalb des Abschnitts.

Zunächst wird diskutiert, welche Implikationen sich aus der Integration von Zulieferern mit dem Ziel der Datenbereitstellung ergeben. Hieraus werden Anforderungen für das zu entwickelnde Prozessmodell abgeleitet (Unterabschnitt 5.2.1). Im darauffolgenden Unterabschnitt 5.2.2 folgt die Ermittlung der Anforderungen an die Ökobilanzmethode. Für die Implementierung der Methode ist ein Phasenmodell zur Integration in den Individualisierungsprozess der Flugzeugkabine notwendig. An das Phasenmodell werden in Unterabschnitt 5.2.3 Anforderungen abgeleitet. Das Phasenmodell dient zwar ausschließlich der Synthese, dennoch werden hier Anforderungen dargestellt. Motiviert wird dies durch die praktische Relevanz der Integration. Im Rahmen dieser Arbeit wird zudem eine softwaretechnische Umsetzung entwickelt. Auch an dieses Artefakt werden Anforderungen ermittelt (Unterabschnitt 5.2.4). Die Schlussfolgerungen aus den vier Bereichen werden abschließend in diesem Abschnitt zusammengefasst.

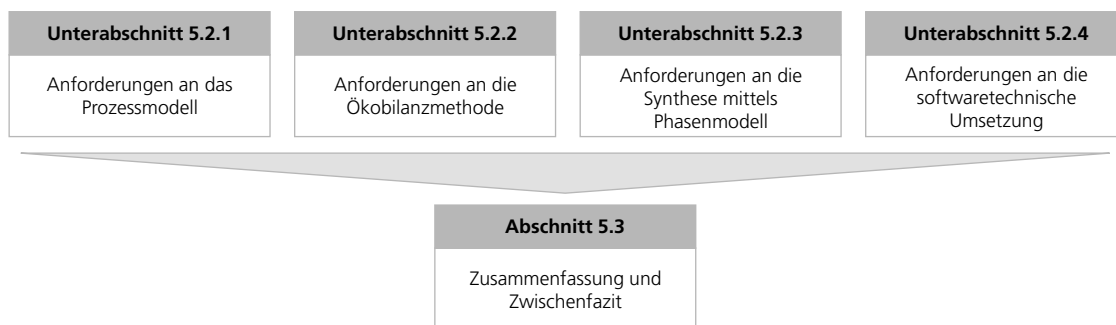


Abbildung 28: Struktur und Gegenstände zur Ermittlung der Anforderungen

Die Ermittlung und Dokumentationen von Anforderungen gilt in Forschung und Praxis als komplexe Aufgabenstellung (Cheng und Atlee 2007). Ausgehend von dieser Komplexität werden im Rahmen dieser Arbeit verschiedene Methoden zur Formulierung der Anforderungen an die Artefakte verwendet. Die Wahl der Methoden richtet sich dabei nach Vorschlägen aus dem *Requirements Engineering*, welcher sich als eigener Forschungszweig in den Ingenieur- und Computerwissenschaften gebildet hat (Pohl und Rupp 2015). Die nachfolgenden Unterabschnitte führen daher zunächst die verwendeten Methoden ein und leiten darauffolgend die Anforderungen her.

5.2.1 Anforderungen an das Prozessmodell zur Integration von Zuliefererdaten

Innerhalb dieses ersten Unterabschnitts zur Anforderungsermittlung wird insbesondere untersucht, welche Anforderungen sich aus der Notwendigkeit der Datenbereitstellung ergeben. Das notwendige Prozessmodell zur Integration von Zuliefererdaten stellt das Artefakt und somit den Anforderungsgegenstand dar.

Methoden. Die Anforderungsermittlung hinsichtlich der Integration von Zulieferern erfolgte mit Hilfe von zwei **Workshops**⁶. Workshops bieten zu Beginn eines Projekts eine gute Möglichkeit zur Konsensbildung und sind insbesondere hilfreich, wenn das avisierte Anwendungsfeld verschiedene Gruppen oder sogar Bereiche innerhalb oder außerhalb eines Unternehmens betrifft (Schwinn 2011). Sie gelten daher als sinnvolle Methode zur Anforderungsermittlung (Pohl und Rupp 2015) und wurden auch im Rahmen dieser Arbeit angewendet. Workshops bieten zudem die Möglichkeit zu direktem Feedback und es können gemeinsame Lösungsvorschläge erarbeitet werden (Kusay-Merkle 2018). Ausgehend von diesen Vorteilen sind Workshops bei zielgerichteter Vorbereitung speziell in frühen Phasen ein hilfreiches Instrument. Die Vorbereitung der Workshops erfolgte innerhalb eines Projektteams auf Basis des 7P-Frameworks (Gray et al. 2011). Das Framework kann als Leitfaden für die Vorbereitung von Workshops und Besprechungen dienen, indem die folgenden sieben Punkte abgearbeitet werden: *Purpose, People, Product, Process, Pitfalls, Preparation* und *Practical Concerns*. Mithilfe des Leitfadens wurden die zwei in Tabelle 8 dargestellten Workshops konzipiert und durchgeführt.

Tabelle 8: Durchgeführte Workshops zur Ermittlung der Anforderungen an das Prozessmodell

Workshop	Ziel	Teilnehmer
Flugzeughersteller	Ableitung von Risiken bei der Datenbereitstellung	Crossfunktionale Experten Flugzeughersteller
Zulieferer	Feedback zu konzeptionellem Rahmen und Sammlung von Vorbehalten	Zulieferer Kabinenkomponenten

Neben den Workshops wurde eine **Literaturrecherche zum Themengebiet des Informationsaustausches** (*Information-Sharing*) durchgeführt. Ziel der Recherche war es, allgemeine Erfolgsfaktoren bei der Integration von Zulieferern zu ermitteln. Bei der Recherche wurde hierbei der Anwendungskontext des Artefakts berücksichtigt.

Ergebnisse und abgeleitete Anforderungen. Der erste Workshop mit Vertretern des Flugzeugherstellers fokussierte auf die Bewertung und Ableitung von Risiken. Hierzu wurden zunächst der konzeptionelle Rahmen des Projektes vorgestellt und unter Zuhilfenahme einer klassischen Risikomatrix mögliche Risiken hinsichtlich der Datenbereitstellung von Zulieferern diskutiert sowie auf Basis der identifizierten Risiken Maßnahmen bzw. Anforderungen für die weitere Entwicklung des Artefakts abgeleitet. Die Teilnehmer des Workshops sahen insbesondere ein Risiko: Inkonsistenzen bei der Bereitstellung von Daten. Die Teilnehmer begründeten dies mit der vielschichtigen Zulieferindustrie für die Flugzeugkabine. Diese besteht neben Konzernen auch aus kleinen und mittelständischen Unternehmen. Hier sahen die Teilnehmer die Gefahr, dass aufgrund von verschiedenen Fähigkeiten und Vorerfahrungen hinsichtlich der Anwendung von Ökobilanzen sowie der strukturierten Datenbereitstellung, die Datenqualität stark abweichen könnte. Darauf aufbauend sahen die Teilnehmer Risiken hinsichtlich der Vergleichbarkeit. Neben der Vergleichbarkeit wiesen die Teilnehmer auf die rechtliche Dimension in der Praxis hin, da bei der Nutzung von unterneh-

⁶ Die Workshops wurden in Zusammenarbeit mit einem Projektteam und in englischer Sprache online durchgeführt. Für die Ergebnisdarstellung im Zuge dieser Arbeit wurden die Ergebnisse übersetzt.

mensübergreifenden Daten vertragliche Aspekte zu berücksichtigen seien und der Nutzungskontext definiert werden müsse. Dies spiele insbesondere bei der Nutzung von Daten mit dritten Parteien eine große Rolle. In diesem Kontext wurde von den Teilnehmern speziell auf die Vertraulichkeit von Daten hingewiesen. Als größtes Risiko nannten die Teilnehmer die generelle Handhabung der großen Datenmengen auf verschiedenen Ebenen. Die Ergebnisse des Workshops wurden abschließend zur Vorbereitung des zweiten Workshops mit Kabinenzulieferern verwendet.

In Workshop zwei wurden zunächst die Projekt- und Workshopziele sowie die Konzeption eines übergeordneten Datenflusses dargestellt. Darauf aufbauend wurden offene Fragen diskutiert. Die Teilnehmer äußerten hier große Bedenken hinsichtlich der Übermittlung von notwendigen Rohdaten wie Stücklisten und detaillierten Prozessketten, welche für die vollständige Modellierung der Umweltwirkungen jedoch notwendig sind. Aus Sicht der Zulieferer seien derartige Daten als sensibel einzustufen und geistiges Eigentum der Unternehmen. Zudem merkten die Zulieferer an, dass für bestimmte Phasen des Lebenszyklus keine Daten vorhanden seien oder von anderen Stakeholdern integriert werden müssten. Hierunter fallen insbesondere die Betriebsphase sowie die Phase des Recyclings und der Entsorgung. Eine Modellierung sei hier nur mit standardisierten Vorgaben möglich. Ferner forderten die Zulieferer eine Standardisierung hinsichtlich des Datenformats und ein Regelwerk bezogen auf die Aktualisierung von Daten. Abschließend wurden Herausforderungen hinsichtlich des automatisierten Datenaustausches genannt.

Bedingt durch den kooperativen Charakter hinsichtlich der Integration von Zuliefererdaten kann auf konzeptioneller Ebene vom Gegenstand des *Information-Sharing* gesprochen werden. Dieser beschreibt den überbetrieblichen Informationsaustausch zur Erreichung spezifischer Ziele wie zum Beispiel der Optimierung von Prozessen oder der Transparenzsteigerung (Jäger-Roschko und Petersen 2022). Von Jäger-Roschko und Peterson wurde eine systematische Analyse aktueller Barrieren und Herausforderungen hinsichtlich des überbetrieblichen *Information-Sharing* im Anwendungskontext der Kreislaufwirtschaft durchgeführt. Es konnten, wie in Abbildung 29 dargestellt, Herausforderungen in den drei Dimensionen Technologie, Verwaltung und Management abgeleitet werden (Jäger-Roschko und Petersen 2022). Hierbei zeigen sich große Übereinstimmungen mit den Resultaten der Workshops und den Ausführungen in der Literatur. Insbesondere zeigen sich diese Übereinstimmungen hinsichtlich der Themenfelder Sicherheit und Datenschutz, technologische Mängel für einen automatisierten Datenaustausch, geringe Informationsqualität, Unvollständigkeit von Information(-kanälen), verteilte Informationen sowie notwendige Standards.

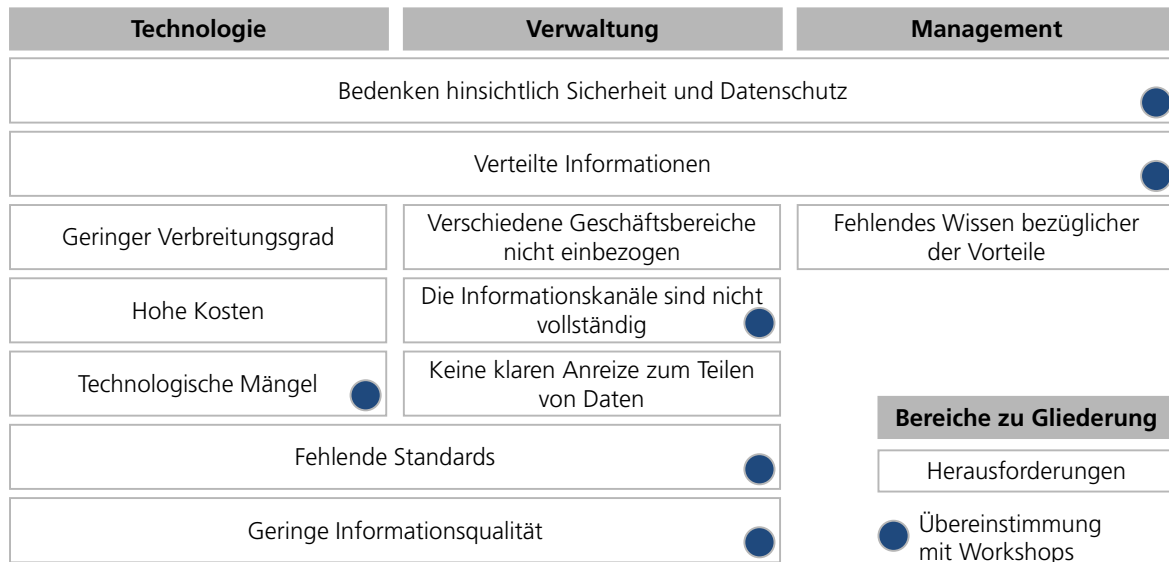


Abbildung 29: Barrieren und Herausforderungen des Informationsaustausches (angelehnt an Jäger-Roschko und Petersen 2022)

Zu den nicht direkt genannten Bereichen gehören der geringe Verbreitungsgrad von notwendigen Technologien sowie hohe Kosten. Zudem wurde von den Teilnehmern nicht direkt auf Anreize und Vorteile aller Akteure eingegangen. Zur Erhöhung der Akzeptanz ist dies jedoch von hoher Bedeutung und wird daher als zusätzliche Anforderung mit aufgenommen. Somit lassen sich zusammenfassend die in Tabelle 9 formulierten Anforderungen an das Prozessmodell zur Integration von Zulieferern formulieren.

Tabelle 9: Aufgestellte Anforderungen (PM-Ai) an das Prozessmodell zur Integration von Zulieferern auf Basis der eingesetzten Methoden

ID	Anforderung
PM-A1	Integration einer Validierungsinstanz, um mögliche Inkonsistenzen zu vermeiden
PM-A2	Berücksichtigung der inhomogenen Zuliefererstruktur, bestehend aus KMU und Konzernen
PM-A3	Integration eines Modellierungsstandards in das Prozessmodell zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit
PM-A4	Berücksichtigung von Rahmenbedingungen hinsichtlich der Vertraulichkeit von Daten
PM-A5	Fokussierung auf eine hohe Bereitschaft zur Datenermittlung (Bedenken Rohdaten)
PM-A6	Bereitstellung bzw. Integration von Richtlinien für Phasen ohne Daten
PM-A7	Standardisierung der Informations- und Datenformate
PM-A8	Konzeption unter Berücksichtigung eines automatisierten Datenaustausches
PM-A9	Bidirektionaler Informationsaustausch zur Schaffung von Anreizen und Vorteilen aller Stakeholder

5.2.2 Anforderungen an die Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode

Der Anforderungsgegenstand in diesem Unterabschnitt stellt die zu entwickelnde Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode dar. Dieser Unterabschnitt legt somit insbesondere methodischen Anforderungen, welche sich aus der Vorgehensweise von Ökobilanzen ergeben.

Methodik. Zur Ermittlung der Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik wurde ein zweistufiges Vorgehen gewählt: Zunächst wurde eine **Normenrecherche** durchgeführt, da Normen und Standards als Quelle von Anforderungen gelten und je nach Anwendungskontext zu berücksichtigen sind (Pohl und Rupp 2015). Methodisch ist die Recherche angelehnt an das in Abschnitt 3.2 bereits vorgestellte Vorgehen für systematische Literaturanalysen. Ziel der Normenrecherche ist es insbesondere übergeordnete Anforderungen zu ermitteln, sodass die zu entwickelnde Methode industriell akzeptierten Standards genügt. Zudem soll untersucht werden, inwieweit es bereits spezifische Standards im Anwendungskontext der Luftfahrtindustrie gibt. Für diese Suche existieren verschiedene nationale und internationale Suchmaschinen (Mangelsdorf 2018). Bedingt durch den internationalen Charakter der Luftfahrtindustrie wurden sowohl nationale als auch internationale Normen in die Recherche integriert. Neben der Normenrecherche finden für die Ermittlung von spezifischen Anforderungen die Ergebnisse der **systematischen Literaturanalyse** aus Abschnitt 3.2 Verwendung. Bedingt durch die Eingrenzung auf Veröffentlichungen mit Bezug zur Luftfahrtindustrie kann so die Berücksichtigung des Standes der Wissenschaft im Anwendungsbereich sichergestellt werden.

Ergebnisse und abgeleitete Anforderungen. Die Suche nach internationalen Normen⁷ mit dem Schlagwort *Life Cycle Assessment* führte mit der Eingrenzung, dass ausschließlich Standards berücksichtigt werden, zu 110 Ergebnissen. Unter Anwendung der Ausschlusskriterien *kein direkter Bezug zur Methode der Ökobilanz, zurückgezogene Normen sowie Fokus auf Industrie außerhalb der Luftfahrtindustrie* konnten die vier in Tabelle 10 dargestellten Normen identifiziert werden. In ISO 14040 und 14044 wird formuliert, dass zur Durchführung einer Ökobilanz die in Unterabschnitt 3.1.2 bereits eingeführten vier Phasen *Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung* sowie *Auswertung* zu befolgen sind (DIN EN ISO 14040 2009; DIN EN ISO 14044 2006). Zudem formuliert ISO 14040 hinsichtlich der Systemgrenzen die Empfehlung von der *Wiege bis zur Bahre* zu modellieren und damit den gesamten Lebenszyklus von Produkten oder Services zu berücksichtigen (DIN EN ISO 14040 2009). Ferner ist eine eindeutige funktionelle Einheit zu definieren (DIN EN ISO 14040 2009). Neben der Formulierung einer funktionellen Einheit sind für die Wirkungsabschätzung der Umweltwirkungen wissenschaftlich anerkannte Erkenntnisse zu verwenden (DIN EN ISO 14040 2009). Es wird jedoch nicht deutlich, wie dies in der Praxis umzusetzen ist. Zudem fordern die Normen die Möglichkeit zur Validierung von Daten und Ergebnissen und empfehlen übergreifend eine flexible Implementierung je nach Anwendungsfall und Industrie. Aus den weiteren identifizierten Standards ISO/TS 14072:2014 sowie ISO/TS 14074:2022 konnten keine weiteren Erkenntnisse gewonnen werden.

⁷ Verwendet wurde die Homepage der International Organization for Standardization (ISO). Die Datenerhebung erfolgte im Januar 2023.

Tabelle 10: Übersicht der identifizierten Standards. Ergebnis der Normenrecherche

Standard	Beschreibung
ISO 14040:2006	Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen
ISO 14044:2006	Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Anleitungen
ISO/TS 14072:2014	Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen und Richtlinien für die organisatorische Ökobilanz
ISO/TS 14074:2022 (Vornorm)	Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze, Anforderungen und Leitlinien für Normierung, Gewichtung und Interpretation

Bedingt durch den allgemeinen Charakter der Standards, die verfolgt werden, sind bei der Anwendung ebendieser oftmals weitere Informationen und Spezifikationen notwendig. Dies ist auch im Rahmen der Ökobilanzierung notwendig und daher werden wie bereits eingeleitet Ergebnisse der durchgeführten systematischen Literaturanalyse in der Anforderungsermittlung berücksichtigt. Zunächst lässt sich die Forderung nach einer eindeutigen funktionellen Einheit mit der systematischen Literaturanalyse präzisieren. Zum einen stellt die funktionelle Einheit Passagierkilometer (PKM) eine anerkannte Einheit für die Abschätzung von Umweltwirkungen in der Luftfahrtindustrie dar und zum anderen werden, je nach Ziel und Zweck, das Bauteil, die Baugruppe oder das Segment des Flugzeugs oftmals als funktionelle Einheit definiert (Unterabschnitt 3.2.2). Bezogen auf die Anforderung zur Anwendung von wissenschaftlichen Erkenntnissen für die Wirkungsabschätzung hat die ReCiPe-Methode den höchsten Verbreitungsgrad erreicht und gilt als anerkannte Methode (Unterabschnitt 3.2.2). Durch Kombination von konkreten Ergebnissen der Literaturanalyse sowie der Standards können die dargestellten Erkenntnisse in folgender Tabelle zu Anforderungen zusammengefasst werden.

Tabelle 11: Aufgestellte Anforderungen (OM-Ai) an die zu entwickelnde Methodik auf Basis der eingesetzten Methoden

ID	Anforderung
ÖM-A1	Integration der vier Phasen nach ISO 14040
ÖM-A2	Integration des gesamten Lebenszyklus mit klarer Systemgrenze
ÖM-A3	Eindeutige funktionale Einheit für die Luftfahrtindustrie (Passagierkilometer sowie Lebenszyklus)
ÖM-A4	Wissenschaftlich anerkannte Methode zur Wirkungsabschätzung (ReCiPe)
ÖM-A5	Validierung von Ergebnissen ermöglichen
ÖM-A6	Flexible Implementierung (Parametrisierung)

5.2.3 Anforderungen an die Synthese mittels Phasenmodell

Methode. Zur Ermittlung der Anforderungen an das Phasenmodell wurde die in Unterabschnitt 5.1.1 bereits erwähnte **Befragung** bei einem Flugzeughersteller durchgeführt⁸. Die Befragung diente der initialen Anforderungsermittlung und zielte auf eine Integration von verschiedenen Funktionsbereichen im Kontext der Projektarbeit ab. Befragungen ermöglichen den Teilnehmern gegenüber Interviews eine anonymisierte Teilnahme und die Möglichkeit zur Beantwortung der Fragen ohne Zeitdruck, wodurch die Antworten erstens ehrlicher und zweitens durchdachter sind (Diekmann 2007). Die Vorbereitung der Befragung erfolgte in einem Expertenteam mit Kontextwissen zum Befragungsgegenstand. Zudem wurde das für Experteninterviews bekannte und von Helfferich bekannte SPSS-Prinzip angewendet. SPSS steht in diesem Zusammenhang für die vier Schritte Sammeln, Prüfen, Sortieren und Subsumieren. Das Vorgehen ermöglicht zum einen den Einbezug von Vorwissen und Erfahrungen der Fragebogenersteller. Zum anderen ist es praktisch und einfach anwendbar (Helfferich 2011).

Ergebnisse und abgeleitete Anforderungen. Im Rahmen einer Industriekooperation wurde auf Basis des beschriebenen methodischen Vorgehens der anonyme Online-Fragebogen erstellt und durchgeführt. Aspekte des Fragebogens betrachten die grundsätzlichen Erwartungen an Funktionalitäten und Vorteile hinsichtlich einer Ökobilanzanwendung im Kontext der Flugzeugkabine. Gegenstand der Befragung war zudem die Bewertung von Herausforderungen bei der Implementierung. Insgesamt wurden die Fragen von 18 Experten aus 11 Abteilungen beantwortet. Dies entspricht einer Rücklaufquote von 50 %. Da die Befragung keine statistische Analyse der Ergebnisse fokussiert, wird die Anzahl an Befragten für die Anforderungsermittlung als ausreichend erachtet. Dies stützt sich zum einen auf die von Mason dargestellte Richtlinie für Stichproben (Mason 2010) und zum anderen auf die in Abbildung 30 dargestellte Verteilung bezüglich des Vorwissens. 78 % der Befragten gaben an, bereits in Kontakt mit Ökobilanzierungen gekommen zu sein. Zudem gaben 81 % der Teilnehmer bezogen auf die Vorerfahrungen (keine Einsteiger) an, ein ausreichendes Erfahrungsniveau zu haben.

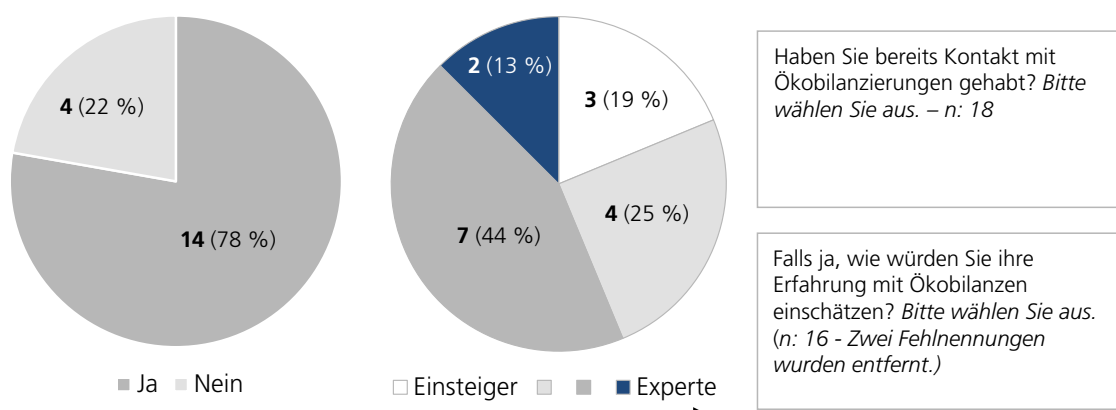


Abbildung 30: Charakterisierung der Befragten hinsichtlich der Vorerfahrungen mit Ökobilanzen

⁸ Die Befragung wurde in englischer Sprache durchgeführt. Für die Ergebnisdarstellung im Zuge dieser Arbeit wurden die Ergebnisse übersetzt.

Mit dem Ziel größtmögliche Freiheitsgrade bei der Beantwortung zuzulassen, wurde zunächst ein offenes Antwortformat gewählt, da selbst formulierte Antworten zwar aufwendiger in der Auswertung sind, jedoch eine höhere Informationstiefe und -breite erwarten lassen. Anschließend erfolgt die Zusammenfassung der zwei gestellten offenen Fragen, die vollständigen Antworten finden sich in Anhang A.7.

Was sind Ihre zentralen Erwartungen an die Funktionalitäten und Fähigkeiten einer Ökobilanz Anwendung, die für externe Zwecke Anwendung findet (Im Kontext der Flugzeugkabine)?
n: 18 – Freie Antwortmöglichkeit

Von vier Teilnehmern (TN 1, 2, 3 und 7) wurde hervorgehoben, dass eine einfache sowie benutzerfreundliche Bedienung einer IT-Anwendung eine Anforderung für die Integration einer Ökobilanzmethode sowie Anwendung in den Konfigurationsprozess dargestellt. Zudem geht aus den Antworten von Teilnehmer 1, 2 und 3 hervor, dass die einfache Analyse sowie Visualisierung von Ergebnissen der Ökobilanzen zu berücksichtigen ist. Diese Anforderungen stellt bereits Implikationen für die prototypische Umsetzung dar und geben Hinweise für die Synthese. Als einer der grundlegenden Funktionen nannten vier Teilnehmer (TN 3, 4, 6 und 16) den Vergleich von Kabinenlayouts, zudem wurde weitere Funktionen genannt. So nannte Teilnehmer 7 den Vergleich von Kabinenprodukten und -dienstleistungen als sinnvolle Funktion. Teilnehmer 13 unterstützte dies und formulierte die Funktion Darstellung von Kabinenkomponenten. Aus den Antworten geht zudem hervor, dass eine Flexibilität hinsichtlich der Anwendungsfälle (TN 3, 6, 9, 10, 11, und 12) notwendig ist. Abschließend wurde von drei Teilnehmern die Integration von Zulieferer- und Supply Chain-Daten gefordert. Hier zeigt sich, dass die Entwicklung von Artefakt eins notwendig ist und Schnittstellen bestehen.

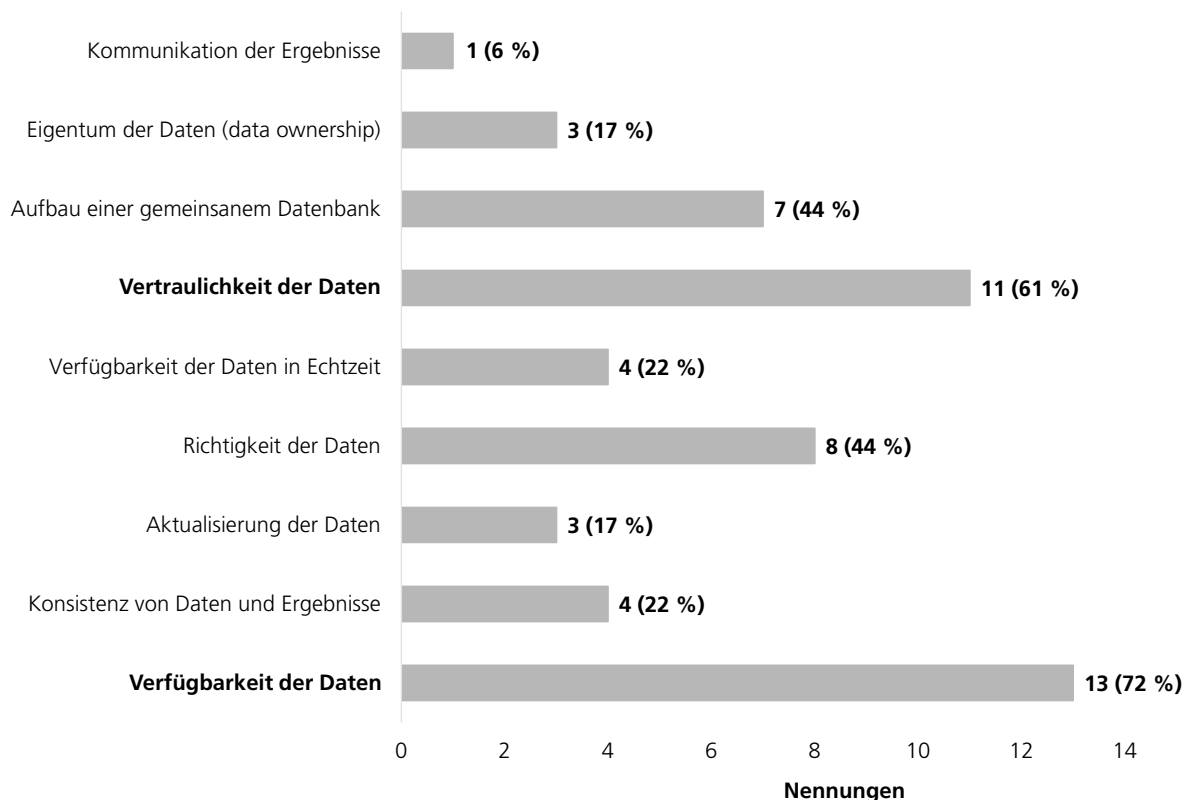
Welche Vorteile versprechen Sie sich von einer Ökobilanz Anwendung für die Flugzeugkabine?
n: 18 – Freie Antwortmöglichkeit

Hinsichtlich der erwarteten Vorteile nannten zwei Teilnehmer (TN 1 und 10), dass insbesondere eine schnelle Analyse und Darstellung von Ergebnissen ermöglicht werden muss. Weiterhin zeigt sich durch die Antworten von fünf Teilnehmern (TN 2, 5, 7, 8 sowie 18), dass die Identifikation von Hauptbereichen zur Verbesserung der Ökobilanz als wichtiger Aspekt gesehen wird. Für weitere vier Teilnehmer (TN 4, 6, 13 und 14) der Umfrage wird die Kommunikation und damit eine hohe Kundenorientierung als Vorteil genannt. Ferner nannten drei Teilnehmer (TN 6, 11 und 18) die Entscheidungsfindung als wichtigen Vorteil, da dies im Hinblick auf Umweltwirkungen der Kabine nicht leicht sei (TN 8 und 13). Abschließend deuteten vier Antworten (TN 7, 9, 10 und 16) darauf hin, dass die Teilnehmer eine Rückkopplung an die Entwicklung und das Design erwarten.

Ausgehend von den offenen Fragen wurden die Teilnehmer zudem hinsichtlich der Dauer für die Durchführung einer Ökobilanz mit Software-Unterstützung im Kontext des Konfigurationsprozesses befragt. Die Einschätzung der Teilnehmer war dazu wie folgt (n:18):

- 2 Teilnehmer (11 %) erachten eine Dauer von < 10 Minuten für angemessen
- **10 Teilnehmer (56 %) erachten eine Dauer von 10 – 30 Minuten für angemessen**
- 2 Teilnehmer (11 %) erachten eine Dauer von 30 – 60 Minuten für angemessen
- 4 Teilnehmer (22 %) erachten eine Dauer von > 60 Minuten für angemessen

Das Ergebnis zeigt, dass die Mehrheit der Teilnehmer eine Dauer von 10 – 30 Minuten für angemessen hält. Die eher geringe Zeit bedingt sich vermutlich durch eine stark kundenorientierte Denkweise in Richtung der Fluggesellschaften. Die Dauer wird aufgrund der großen Auswirkungen auf Artefakt drei (softwaretechnische Umsetzung) mit in die Anforderungen aufgenommen und muss somit für die weitere Entwicklung mitberücksichtigt werden. Abschließend wurden die Teilnehmer hinsichtlich der größten Herausforderungen bei der Implementierung befragt. Abbildung 31 zeigt die Ergebnisse des Rankings und verdeutlicht, dass insbesondere Risiken mit Bezug zum Themenkomplex Daten gesehen werden. Von hoher Relevanz ist hier die allgemeine Verfügbarkeit der notwendigen Daten sowie die Vertraulichkeit von Daten entlang der Stakeholderkette.



Was sind Ihrer Meinung nach die 3 größten Herausforderungen bei der technischen Implementierung einer Ökobilanz Anwendung? Bitte wählen Sie aus. – n: 18

Abbildung 31: Ergebnisse der Befragung zu Herausforderungen für die Implementierung

Aus den gewonnenen Erkenntnissen der Befragung lassen sich die zu berücksichtigenden Anforderungen für die Synthese mittels Phasenmodell zusammenfassend ableiten und in Tabelle 12 darstellen.

Tabelle 12: Aufgestellte Anforderungen (PH-Ai) an das Phasenmodell zur Implementierung in den Konfigurationsprozess auf Basis der eingesetzten Methoden

ID	Anforderung
PH-A1	Starke Anwendungsorientierung des Phasenmodells hinsichtlich der Integration einer IT-Anwendung.
PH-A2	Fokussierung innerhalb des Phasenmodells auf die Analyse und die Visualisierung
PH-A3	Bei der Visualisierung von Daten Möglichkeit zur Darstellung von verschiedenen Analyseebenen
PH-A4	Möglichkeit innerhalb des Phasenmodells zur Integration von Zuliefererdaten
PH-A5	Modularität bzw. Flexibilität des Phasenmodells sicherstellen, damit neue Anwendungsfälle integriert bzw. das Phasenmodell übertragen werden kann
PH-A6	Kundenorientierte Konzeption des Phasenmodells und Berücksichtigung des Anwendungskontextes
PH-A7	Integration von Rückkopplungsschleifen auf Entwicklungs- und Designprozesse
PH-A8	Fokussierung auf Daten entlang des gesamten Phasenmodells bedingt durch die genannten Herausforderungen
PH-A9	Berücksichtigung der Erwartungen hinsichtlich der Durchführungsdauer

5.2.4 Anforderungen an die softwaretechnische Umsetzung

Dieser Unterabschnitt formuliert die Anforderungen an die softwaretechnische Umsetzung zur Implementierung des Gesamtkonzepts. Dies stellt somit das letzte zu untersuchende Artefakt dar.

Methode. Die Anforderungsermittlung an die Systemarchitektur und Benutzeroberfläche der zu entwickelnden Anwendung wurde methodisch mittels einer **Fokusgruppe** gestützt. Fokusgruppen stellen eine Methode zur Bewertung der Bedürfnisse und Empfindungen potentieller Benutzer dar und können im Rahmen des Design Science Research zur Bestimmung und Detaillierung von Anforderungen an das zu erforschende Artefakt verwendet werden (Tremblay et al. 2010). Im Rahmen der Vorbereitung für Fokusgruppen wird üblicherweise ein Fragenkatalog entwickelt, welcher zur Strukturierung während der Durchführung als Leitfaden dient. Die hier identifizierten Kernbereiche zur Spezifizierung der Anforderungen stellen erstens der Nutzungskontext und zweitens die Beschreibung der Funktionen dar. Neben der Fokusgruppe sind die Erkenntnisse aus industrienahen Forschungsprojekten in der weiteren Beschreibung der Anforderungen berücksichtigt worden. Diese als **teilnehmende Beobachtung** bekannte Forschungsmethode dient zur Dokumentation sowie Analyse der Realität und stützt die gewonnenen Erkenntnisse der Fokusgruppe (Marxen 2014). Voraussetzung für diese Art der empirischen Forschung ist die langfristige Einbindung des Forschers in eine soziale Gruppe (Bursac 2016).

Ergebnisse und abgeleitete Anforderungen. Die Dokumentation der Fokusgruppe findet sich in Anhang A.8.1. Zudem findet sich in Anhang A.8.2 eine detaillierte Liste von funktionellen und nicht funktionellen Anforderungen. Bedingt durch die Anzahl und den Grad der Detaillierung

werden hier ausschließlich die Kernerkenntnisse und daraus abgeleitet die Anforderungen zusammenfassend diskutiert. Zunächst zeigt sich durch den Anwendungs- und Nutzungskontext, welcher die Integration in den Konfigurationsprozess der Flugzeugkabine vorsieht, dass eine hohe Benutzerfreundlichkeit sichergestellt werden muss. Dies bedingt sich insbesondere durch die Schnittstelle zum Kunden aus Sicht des Flugzeugherstellers. Hieraus lässt sich die erste Anforderung nach einer möglichst hohen Usability ableiten. Der Entwicklungsprozess muss entsprechend dieser Anforderung der DIN EN ISO 9241 Normenreihe folgen, welche als Rahmenwerk für die Ergonomie der Mensch-System-Interaktion in der Softwareentwicklung Verwendung findet (DIN EN ISO 9421-110 2006). Weiterhin wird durch die Komplexität des Konfigurationsprozesses im Zuge der Anforderungsermittlung deutlich, dass ein hoher Grad an Strukturierung und Führung des Anwenders durch die Benutzeroberfläche als übergeordnete und kritische Anforderung zu formulieren ist. Hinsichtlich der Systemarchitektur ist eine hohe Flexibilität erforderlich, sodass eine orts- und systemunabhängige Nutzung ermöglicht wird. Abschließend wurde für den Rahmen dieser Arbeit die Anforderung nach einer prototypischen, aber dennoch modularen Systemarchitektur aufgestellt. Die geforderte Modularität ermöglicht für Weiterentwicklungen oder eine spätere Industrialisierung eine Anpassung oder den Austausch einzelner Komponenten der Software und reduziert damit Entwicklungsaufwände. Mit Tabelle 13 kann die Anforderungsermittlung somit abgeschlossen werden.

Tabelle 13: Aufgestellte Anforderungen (SB-Ai) an Systemarchitektur und Benutzeroberfläche auf Basis der eingesetzten Methoden

ID	Anforderung
SB-A1	Hohe Benutzerfreundlichkeit (engl.: Usability), entsprechend Entwicklung nach DIN EN ISO 9241
SB-A2	Hoher Strukturierungsgrad innerhalb der Anwendung
SB-A3	Orts- und systemunabhängige Anwendung
SB-A4	Prototypische, aber modulare Architektur
SB-A5	Dauer von bis zu 30 Minuten für die Durchführung

5.3 Zwischenfazit

Dieses Zwischenfazit stellt die Ergebnisse der Potenzial-, Bedarfs- sowie Anforderungsanalyse zusammenfassend dar und bildet damit den Übergang zur Entwicklung der definierten Artefakte. Das Zwischenfazit gliedert sich hierzu an der Struktur dieses Kapitels.

Ausgehend von der Motivation sowie dem konzeptionellen Rahmen dieser Arbeit wurde zur weiteren Absicherung der Zielstellung ebendieser eine mehrdimensionale, methodisch gestützte Potenzial- und Bedarfsanalyse durchgeführt. Hierzu wurde zunächst ein Entscheidungs- und Potenzialmodell hinsichtlich der Einführung von Ökobilanzen bei Flugzeugherstellern vorgestellt. Das Vorgehen zur Bewertung basiert auf Methoden der multikriteriellen Entscheidungsfindung und nutzt den analytischen Hierarchieprozess als methodisches Grundgerüst. Das Ergebnis der Anwendung zeigt, dass der ausgewählte Anwendungsfall, *die Integration in den Konfigurationsprozess*, als vielversprechend zu beurteilen ist. Bedingt durch die methodischen Schwächen von AHP und

verwandten Methoden wurden zur Absicherung zwei weitere Befragungen durchgeführt: Erstens eine Befragung innerhalb eines Flugzeugherstellers, mit dem Ziel mögliche Anwendungsfelder von Ökobilanzen in der Flugzeugkabine zu bewerten. Die Ergebnisse dieser Befragung stützen die Ergebnisse des AHP. Auch die 16 befragten Experten sahen bei der Integration in den Konfigurationsprozess hohes Potenzial. Abschließend wurden die Ergebnisse einer Befragung unter Fluggesellschaften im Rahmen dieser Arbeit herangezogen. Diese Ergebnisse zeigen, dass auch Fluggesellschaften den identifizierten Anwendungsfall als vielversprechend betrachten.

Aufbauend auf dieser Analyse wurden in diesem Kapitel notwendige Anforderungen an jedes Artefakt ermittelt. Hierzu wurden entsprechend des *Requirements Engineering* verschiedene Methoden vorgestellt und angewendet. An das erste Artefakt konnten auf Basis von Workshops sowie einer Literaturrecherche insgesamt neun Anforderungen ermittelt werden. Diese fokussieren insbesondere solche Anforderungen, welche die Hürden im Kontext vom unternehmensübergreifenden *Information-Sharing* adressieren. Die Anforderungen an die zu entwickelnde Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode basieren auf den Erkenntnissen aus der durchgeführten systematischen Literaturanalyse und inkludieren zudem relevante Normen aus dem Bereich der Ökobilanzierung. So konnten sechs Anforderungen definiert werden, deren Fokus auf einer möglichst hohen Vergleichbarkeit und der Anwendung von wissenschaftlichen Methoden liegen. Für die Synthese mittels Phasenmodell konnten wiederum neun Anforderungen ermittelt werden. Ausgangspunkt dieser Anforderungsliste war eine Befragung unter Experten eines Flugzeugherstellers. Die so definierten Anforderungen adressierten erstens den kollaborativen Charakter des Konfigurationsprozesses, zweitens eine hohe Kundenorientierung in Richtung der Fluggesellschaften mit den entsprechenden Konfigurations- sowie Individualisierungsteams und drittens die hohe Relevanz von Daten bei der Implementierung der hier vorgestellten Systematik. Für die Operationalisierung der Systematik wird im Rahmen dieser Arbeit ein weiteres Artefakt vorgeschlagen: Die softwaretechnische Umsetzung in Form einer Systemarchitektur und Benutzeroberfläche. Die notwendigen Anforderungen für eine zielgerichtete Entwicklung dieses Artefakts wurden mittels einer Fokusgruppe sowie den projektbezogenen Erfahrungen des Autors ermittelt. Eine der Kernanforderungen für die softwaretechnische Umsetzung stellt eine hohe Benutzerfreundlichkeit dar.

Zusammenfassend zeigt sich, dass sowohl Potenzial- als auch Anforderungsermittlung die Basis für die weitere Entwicklung der Artefakte darstellen. Die Ergebnisse der Anforderungsermittlung im speziellen zeigen aber auch den interdisziplinären Charakter einerseits und dessen Komplexität andererseits. Zudem konnten Abhängigkeiten und Interdependenzen entlang der Artefakte und damit auch der Anforderungen identifiziert werden. Diese sind bei der weiteren Entwicklung besonders zu beachten.

Für ein einfaches Referenzieren der Anforderungen in den folgenden Kapiteln wurden die Anforderungen mit einer eindeutigen Anforderungs-ID (*PM-A_i*; *ÖM-A_i*; *PH-A_i*; *SB-A_i*) versehen und nummeriert.

6 Entwicklung der Gesamtsystematik

Basierend auf den in Abschnitt 5.2 definierten Anforderungen erfolgt in diesem Kapitel die Konzeption und Entwicklung der ersten beiden Artefakte sowie der Synthese. In Abschnitt 6.1 werden dazu zunächst übergeordnete Systemgrenzen hergeleitet. Darauf aufbauend werden das Prozessmodell zur Integration von Zulieferern (Abschnitt 6.2) sowie die Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode (Abschnitt 6.3) dargestellt. Das Kapitel schließt mit der Synthese durch das Phasenmodell (Abschnitt 6.4).

6.1 Ableitung von übergeordneten Systemgrenzen

Ausgehend von der auf Basis der ISO 14040 formulierten Anforderung den gesamten Lebenszyklus einer Kabine zu berücksichtigen und gleichzeitig klare Systemgrenzen zu ziehen (Anf. ÖM-A3), wird in diesem Abschnitt zunächst eine Systemgrenze auf Basis des bereits eingeführten Lebenszyklus der Luftfahrtindustrie (Abschnitt 2.1) definiert. Die Definition der Systemgrenze hängt von verschiedenen Faktoren ab und gilt als eine der Kernherausforderungen während der Konzeption einer Ökobilanz (DIN EN ISO 14040 2009). Die Systemgrenze legt die Prozessmodule fest, welche in das Produktsystemmodell zu integrieren sind. In Tabelle 14 sind die genannten Kriterien aus ISO 14040 zusammenfassend aufgelistet, daran anschließend erfolgt eine Beschreibung für den vorliegenden Anwendungsfall.

Als erstes Kriterium wird die Festlegung des Ziels genannt, welches im vorliegenden Anwendungsfall den Vergleich von verschiedenen Kabinenkonfigurationen sowie deren Teilsystemen darstellt. Weiterhin sind der Untersuchungsrahmen und die vorgesehene Anwendung sowie die angesprochene Zielgruppe für die Definition der Zielgruppe relevant. Wird dies nicht berücksichtigt, kann die Ergebniskommunikation nicht zielgerichtet erfolgen und mögliche Fehlinterpretationen sind die Folge (Unterabschnitt 3.1.5). Im Rahmen dieser Arbeit stellt basierend auf dem konzeptionellen Rahmen sowie den formulierten Forschungsfragen (Kapitel 4) der Konfigurationsprozess der Flugzeugkabine den Anwendungsfall dar. Zielgruppe innerhalb dieses Prozesses sind Experten der Fluggesellschaften. Weiterhin gelten Restriktionen hinsichtlich der Datenbeschaffung und den damit verbundenen Kosten als relevanter Entscheidungsvektor für die Systemgrenzen. Im Rahmen dieser Arbeit wird daher die Integration von Stakeholdern verfolgt. Abschließend ist die Anwendung sogenannter Abschneidekriterien möglich, welche mit dem Ziel der Komplexitätsreduktion den Aufwand für Ökobilanzen verringern. Es wird jedoch davon abgeraten, Abschneidekriterien anzuwenden (European Commission 2017). Entsprechend dieser Empfehlung werden im Folgenden für die Definition der übergeordneten Systemgrenzen keine Abschneidekriterien⁹ angewandt.

⁹ Bei der Modellierung der einzelnen Phasen sind neue Systemgrenzen zu ziehen. Hier sind entsprechende Abschneidekriterien üblich und Gegenstand der detaillierten Modellierung.

Tabelle 14: Kriterien zur Definition von Systemgrenzen und Beschreibung für den vorliegenden Anwendungsfall. Kriterien basierend auf ISO 14040

Kriterium zur Definition der Systemgrenzen	Beschreibung für den vorliegenden Anwendungsfall
Festlegung des Ziels	Vergleich von verschiedenen Kabinenkonfigurationen sowie deren Teilsystemen
Untersuchungsrahmen und vorgesehene Anwendung	Anwendungsfall ist Konfigurationsprozess der Kabine
Angesprochene Zielgruppe	Fluggesellschaften (Experten für Kabinenkonfigurationen)
Getroffene Annahmen	Annahmen sind nach Möglichkeit zu vermeiden
Daten- und Kostenrestriktionen	Datenrestriktionen sind nach Möglichkeit mittels der Integration von Stakeholdern zu vermeiden. Kostenrestriktionen sind in der Konzeption zu berücksichtigen.
Abschneidekriterien	Keine Anwendung von Abschneidekriterien hinsichtlich der Umweltauswirkungen

Mittels der dargestellten Vorüberlegungen können die Systemgrenzen abschließend definiert werden. Bedingt durch die Zielstellung sowie die vorgesehene Anwendung kann zunächst der Kabinenlebenszyklus als Bezugsrahmen für die weitere Eingrenzung definiert werden. Hierin begründet sich, dass der Flughafenlebenszyklus nicht weiter betrachtet wird. Die Phasen Rohstoffabbau, Produktion und Transport, Endmontage sowie Recycling & Entsorgung sind bei entsprechender Datenqualität für die Kabinen zu berücksichtigen, da diese Phasen Teil der Kernphasen der Kabine sind. Motiviert durch die Zielgruppe der Fluggesellschaften sowie die besondere Relevanz für die Kabine werden die Instandhaltung und Nachrüstung während der Betriebsphase integriert. Demgegenüber steht der Passagierservice, welcher im Konfigurationsprozess der Kabine zunächst keine direkte Relevanz hat und nicht mit modelliert wird. Hier sei jedoch bereits auf den weiteren Forschungsbedarf hingewiesen (Keiser et al. 2023a). Die allokierte Treibstoffverbrennung während der Betriebsphase stellt die größte Umweltauswirkung dar und wird entsprechend inkludiert. Ferner wird die Produktion des Treibstoffes berücksichtigt. Dies bedingt sich durch den großen Einfluss auf die gesamte Umweltbilanz (Keiser et al. 2023a). Die hergeleitete Systemgrenze für die Entwicklung von Artefakt eins und zwei ist abschließend in Abbildung 32 dargestellt.

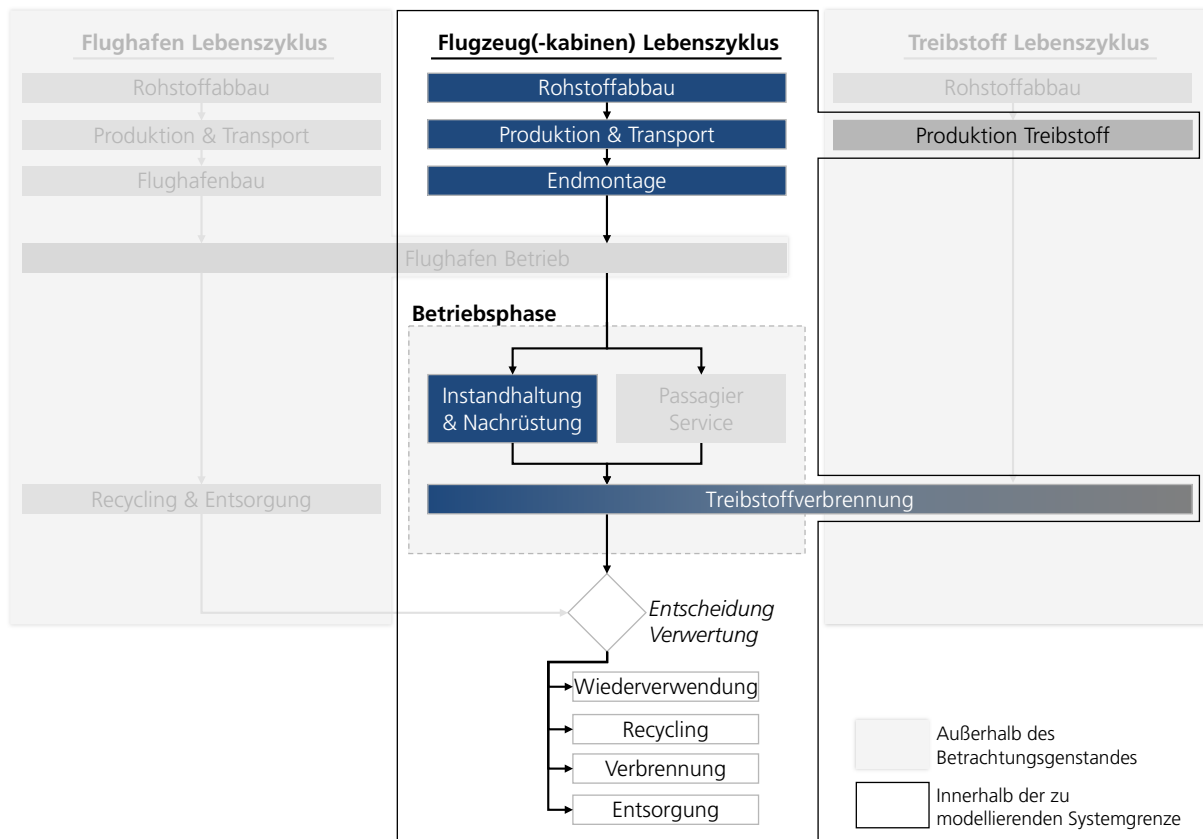


Abbildung 32: Systemgrenzen für die Entwicklung von Prozessmodell und Methodik (nach Keiser et al. 2023e; Melo et al. 2020)

6.2 Entwicklung des Prozessmodells zur Integration von Zuliefererdaten

Die Entwicklung des Prozessmodells lässt sich thematisch der (Geschäfts-)Prozessmodellierung zuordnen. Ausgehend von dieser Einordnung werden nachfolgend zunächst relevante Grundlagen und Methoden der Prozessmodellierung eingeführt.

Gegenstand der Prozessmodellierung ist es, komplexe Prozesse formal zu beschreiben und entsprechend der Zielstellung eine Abstraktion vorzunehmen. Ziele der Prozessmodellierung können dabei unter anderem die Optimierung von Prozessen, die Vorbereitung einer Automatisierung von Geschäftsprozessen oder das Aufzeigen von *Best Practices* sein (Funk et al. 2010; Liebetruth 2020). Neben den Zielen der Prozessmodellierung lassen sich für Prozessmodelle drei Hauptmerkmale aus der Modelltheorie nach Stachowiak ableiten (Stachowiak 1973): Erstens stellen (Prozess-) Modelle Abbilder oder Vorbilder vorhandener oder zu schaffender Originale dar (Abbildungsmerkmal). Zweitens erfolgt während der Modellierung eine Selektion und es werden somit ausschließlich die dem Zweck dienenden Attribute und Eigenschaften modelliert (Verkürzungsmerkmal). Drittens ist jedes Modell im Hinblick auf die Anforderungen und den Untersuchungszweck zugeschnitten (Pragmatisches Merkmal). Für die konkrete Entwicklung und Modellierung von Prozessmodellen können verschiedene Modellierungsnotationen angewendet werden (Liebetruth 2020): Zu den am häufigsten verwendeten Modellierungsnotationen zählen ereignisdiskrete Prozessketten (EPKs), Aktivitätsdiagramme im Rahmen der Unified Modelling Language (UML) sowie die Notation des Business Process Modell and Notation (BPMN) (Freund und Rucker 2019). Da alle

drei Notationen in Forschung und Praxis angewendet werden, soll die Entscheidung für eine der Modellierungsnotationen auf Basis von Anforderungen erfolgen und den Anwendungskontext dieser Arbeit berücksichtigen. Daher wurden im Zuge des Forschungsprozesses grundlegende Anforderungen an die Modellierungsnotation formuliert:

- (1)** Die Notation muss übergreifende und kollaborierende Prozessteilnehmer übersichtlich darstellen können.
- (2)** Die Notation muss ausreichende Freiheitsgrade bei der Modellierung sowie Darstellung bieten.
- (3)** Die Notation muss bedingt durch den internationalen Charakter der Luftfahrtindustrie international anerkannt sein und einen hohen Verbreitungsgrad aufweisen.

Hinsichtlich der Anforderung nach einer übersichtlichen Darstellung von kollaborierenden Prozessteilnehmern (Anf. 1) zeigt sich nach Freund und Rücker einer der großen Stärken von BPMN gegenüber allen anderen Notationen (Freund und Rücker 2019). Dies bedingt sich durch mehrschichtige *Swimlanes* welche eine übersichtliche und zugleich detaillierte Darstellung verschiedener Prozessteilnehmer zulassen (Gadatsch 2015). Ferner erlaubt BPMN größere Freiheitsgrade in der Anwendung (Anf. 2) und erfreut sich daher immer größerer Beliebtheit. Im internationalen Kontext (Anf. 3) wird BPMN zudem als zu bevorzugende Notation empfohlen, da sie standardisiert ist und ausreichend englische Literatur zur Verfügung steht (Gadatsch 2015). Die genannten Vorteile motivieren die Nutzung von BPMN als Modellierungsnotation im Rahmen dieser Arbeit. Im folgenden Abschnitt werden daher die maßgeblichen Symbole zur Modellierung mit BPMN eingeführt.

Die Grundlage des BPMN 2.0 Standards bilden Aktivitäten, welche durch Rechtecke dargestellt werden. Sie zeigen abgeschlossene Aufgaben, ausgeführt durch Menschen oder Systeme. Teilprozesse werden mit einem „+“ gekennzeichnet und öffnen weitere Subprozesse. Verbunden werden die Aktivitäten durch Sequenzflüsse (dargestellt mit Pfeilen). Nachrichtenflüsse bilden den poolübergreifenden Informationsaustausch ab und werden mit gestrichelten Linien dargestellt. Kreise visualisieren Ergebnisse wie den Start oder das Ende von Prozessen. Sogenannte *Gateways*, in Form von Rauten dargestellt, bilden Entscheidungen ab. Die innerhalb dieser Arbeit verwendeten Symbole sind nachfolgend in Abbildung 33 dargestellt.

Für die Entwicklung des Prozessmodells wurden die Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung beachtet (Becker et al. 2012) und zudem wurden die Freiheitsgrade, welche BPMN bietet genutzt. Die Modellierung ist in ein methodisches Vorgehen eingebettet, welches im nächsten Schritt näher beschrieben wird.

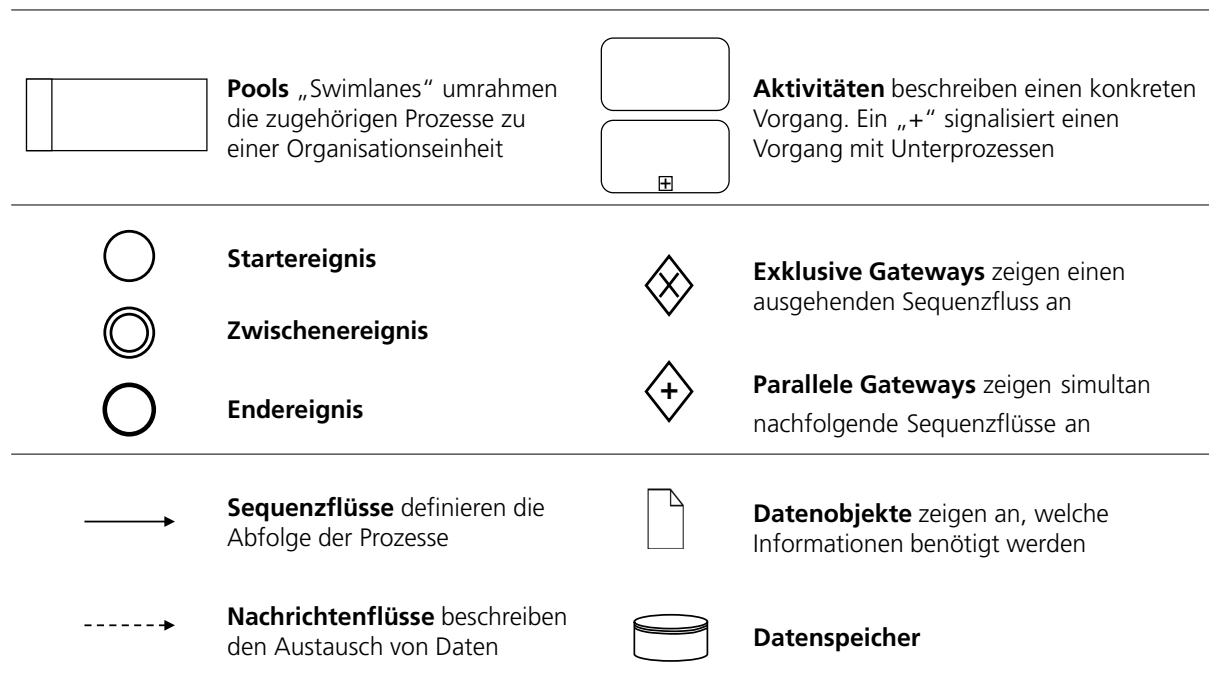


Abbildung 33: Übersicht der verwendeten BPMN 2.0 Symbole im Rahmen dieser Arbeit (angelehnt an Freund und Rücker 2019; Gadatsch 2015).

6.2.1 Methodisches Vorgehen

Nach der Identifikation und Auswahl einer geeigneten Modellierungsnotation werden in diesem Abschnitt weitere Vorüberlegungen hinsichtlich des methodischen Vorgehens getroffen. Es existiert eine Vielzahl von Vorgehensmodellen für die Geschäftsprozessmodellierung, welche je nach Anwendungsfall auszuwählen und anzupassen sind (Winzer 2013). Klassische Vorgehensmodelle aus der Geschäftsprozessoptimierung wenden ein sequenzielles Vorgehen an und modellieren auf Basis einer klaren Zielstellung sowie einer Analyse des Ist-Zustandes einen Sollprozess. Darauf aufbauend erfolgt üblicherweise die Realisierung und Implementierung (siehe z.B. Krallmann et al. 2013). Diese in der Praxis weitverbreiteten und erfolgreich angewendeten Vorgehensweisen erscheinen im Kontext dieser Arbeit nicht einsetzbar. Zum einen existiert kein klassischer bestehender Ist-Prozess für die Integration von Zulieferern mit dem Ziel der Ökobilanzierung. Zum anderen ist ein Vorgehen notwendig, dass die identifizierten Herausforderungen im Zuge der Anforderungsermittlung (Unterabschnitt 5.2.1) berücksichtigt und damit zunächst das Geschäftsprozess- und Stakeholderverständnis fokussiert. Hierin begründet sich Wahl des von Palma-Mendoza et al. vorgeschlagene Vorgehensmodells für die Neugestaltung von Geschäftsprozessen sowohl in physischen als auch rein informatorischen Wertschöpfungsketten (Palma-Mendoza et al. 2014). Das achtstufige Vorgehen integriert verschiedene Methoden und wurde in der Luftfahrtindustrie bereits erfolgreich angewendet (Palma-Mendoza und Neailey 2015). Wie in Abbildung 34 dargestellt wurde das von Palma-Mendoza entwickelte Vorgehen angepasst, sodass sechs sequenzielle Schritte für die Entwicklung des Prozessmodells durchlaufen werden: Erstens ist der Bedarf für die Entwicklung darzustellen. Dies ist bereits in Kapitel 1 und 4 erfolgt. Darauf aufbauend ist in Schritt zwei ein vertieftes Geschäftsprozessverständnis zu entwickeln. In Unterabschnitt 6.2.2 werden daher eine Interaktionsmatrix verwendet und konkrete Herausforderungen abgeleitet. Darauf auf-

bauend werden in Unterabschnitt 6.2.3 zunächst relevante Prozesse identifiziert und eine allgemeine Prozessrepräsentation hergeleitet (Schritt drei). Zudem erfolgt auf Basis der Erkenntnisse die Ableitung von möglichen Prozessmodellvarianten und eine Bewertung ebendieser (Schritt 4). In Unterabschnitt 6.2.4 erfolgt die Modellierung der Prozesse mittels BPMN (Schritt 5).

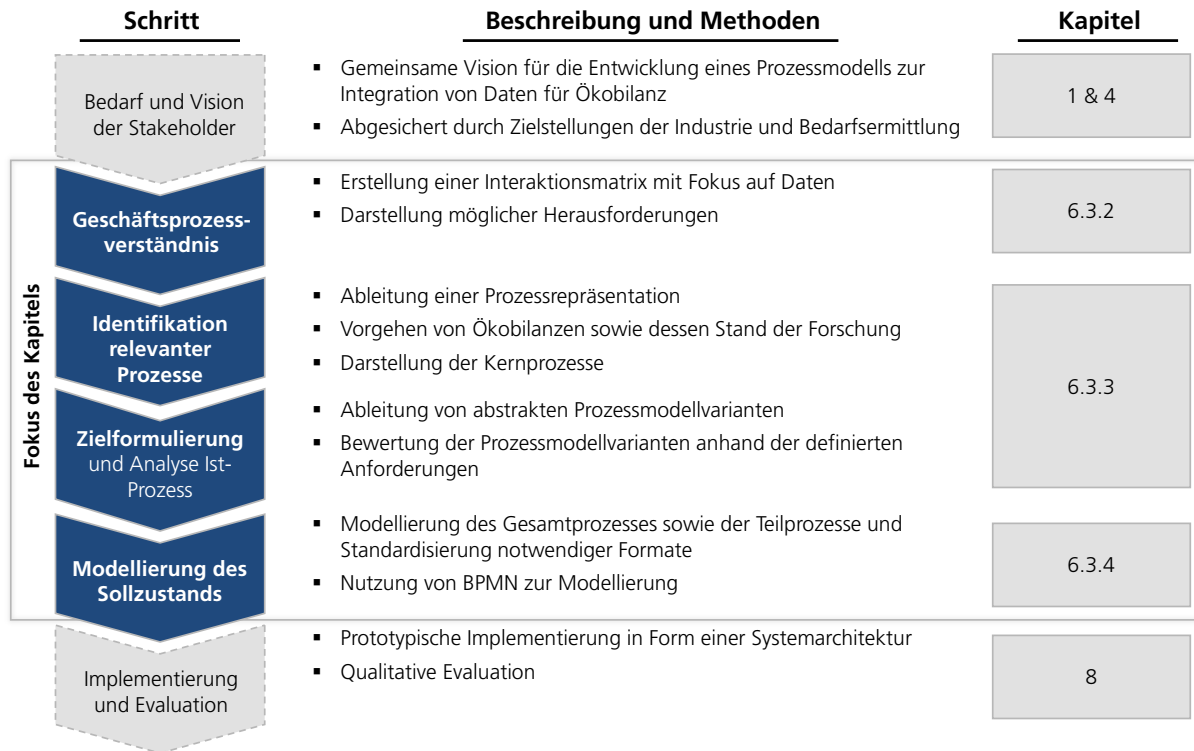


Abbildung 34: Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des Prozessmodells (angelehnt an Palma-Mendoza et al. 2014)

Schritt 6, die Implementierung und Evaluation, erfolgt in Kapitel 8 und wird in diesem Kapitel zunächst nicht weiter betrachtet.

6.2.2 Interaktionsmatrix entlang des Lebenszyklus

Auf Basis des methodischen Vorgehens zur Entwicklung des Artefakts ist zunächst zu ermitteln, welche Stakeholder entlang der Lebenszyklusphasen über Daten zur Aufstellung einer vollumfänglichen Ökobilanz verfügen. Hierzu werden zunächst drei Datentypen für die weitere Analyse definiert: Als erster Typ gelten im Folgenden solche Daten, welche sich durch Kenntnisse von internen Prozessen bzw. der detaillierten produktspezifischen Daten auszeichnen. Diese primären Stakeholderdaten sind zum Beispiel in den Daten zu Fertigungsprozessketten und Transportketten zu finden. Dieser Typ von Daten wird oftmals als vertraulich eingestuft. Gründe hierfür können Bedenken hinsichtlich Wettbewerbern, Eigentumsrechten oder weiteren Einschränkungen sein (DIN EN ISO 14025 2006). Der zweite Datentyp definiert sich durch direkt erlangtes Expertenwissen auf Basis einer konkreten Lieferantenbeziehung. Weiterhin können interne Handbücher und Aufzeichnungen diesem Datentyp zugeordnet werden. Diese direkten Sekundärdaten ermöglichen eine auf Annahmen basierende Datenbeschaffung, welche üblicherweise eine bessere Da-

tenbasis darstellt als die hier definierten Daten vom Typ drei. Diese indirekten Sekundärdaten können durch öffentlich zugängliche Daten sowie Datenbanken ermittelt werden. Tabelle 15 zeigt die für die weitere Analyse verwendete Unterscheidung der drei Datentypen zusammenfassend.

Tabelle 15: Unterscheidung nach primären Stakeholderdaten und Sekundärdaten

Datentyp	Beschreibende Beispiele
Primäre Stakeholderdaten	<ul style="list-style-type: none"> • Detaillierte und durch Messung gewonnene Daten zu Fertigungsprozessketten und Transportketten mit Energieverbrauch • Stückliste mit verwendeten Werkstofflegierungen • Daten zu Flugzyklen und Wartungsprozessen basierend auf Realdaten
Direkte Sekundärdaten	<ul style="list-style-type: none"> • Expertenwissen durch direkte Lieferantenbeziehung • Erstellte interne Handbücher und Aufzeichnungen
Indirekte Sekundärdaten	<ul style="list-style-type: none"> • Öffentlich zugänglich Literatur • Datenbanken

Ausgehend von den definierten Datentypen, den identifizierten Stakeholdern in der Luftfahrtindustrie (Abschnitt 2.2) und den typischen Lebenszyklusphasen eines Flugzeugs kann eine Matrix aufgespannt werden. Derartige Matrizen sind aus dem Projektmanagement bekannt und werden zur Darstellung komplexer Interaktionen für verschiedene Zielstellungen (z.B. Bestimmung von Verantwortlichkeiten) verwendet (Jakoby 2021). Die in Abbildung 35 dargestellte Matrix zeigt die Stakeholder auf der Abszisse und die Lebenszyklusphasen auf der Ordinate. Mittels dieser Darstellung wird eine Bewertung und Analyse hinsichtlich der Datenverfügbarkeit jedes Stakeholders entlang des gesamten Lebenszyklus möglich. Die Bewertung erfolgt hierbei auf Basis der gesammelten Projekterfahrungen und leitet sich zudem aus den durchgeführten Befragungen und Workshops zur Anforderungsermittlung ab (Abschnitt 5.2). Bei näherer Betrachtung des Ergebnisses zeigt sich zunächst, dass kein Stakeholder über Primärdaten über den gesamten Lebenszyklus verfügt. Jeder der Stakeholder kann ausschließlich für den eigenen Verantwortungsbereich Primärdaten aufweisen. Direkte Sekundärdaten sind für die Stakeholder nur teilweise verfügbar. Zudem zeigt sich, dass indirekte Sekundärdaten für alle Entitäten im Produktlebenszyklus verfügbar sind, da diese öffentlich zugänglich sind oder durch Datenbanken beschafft werden können. Eine weitere, vereinfachte Analyse hinsichtlich der Datenverfügbarkeit je Stakeholder über den gesamten Lebenszyklus lässt sich durch ein zahlenbasiertes Vorgehen durchführen. Wie in der Matrix dargestellt wurde den Primärdaten der Wert zwei, den direkten Sekundärdaten der Wert eins und den indirekten Sekundärdaten der Wert null zugeordnet, die Höhe des zugewiesenen Wertes spiegelt hierbei die erwartete Qualität der Daten wider. Die Nullwerte für die indirekten Sekundärdaten werden nicht explizit dargestellt, da sie allen Akteuren gleichermaßen zur Verfügung stehen. Die Summe je Stakeholder zeigt die Datenverfügbarkeit an. Diese Bewertung zeigt, dass der Flugzeughersteller die höchste Bewertung erhält und relativ zu den weiteren Stakeholdern über den besten Zugang zu Daten verfügt. Ein Großteil ist jedoch dem Datentyp direkte Sekundärdaten zugeordnet. Darauf folgen mit einer Summe von vier jeweils die direkten Zulieferer sowie die Fluggesellschaften.

Legende		Stakeholder						
		Rohmaterial Lieferant	Indirekte Zulieferer (Tier n Zulieferer)	Direkter Zulieferer (Modul und Systemlieferant)	Flugzeughersteller	Fluggesellschaft	MRO-Dienstleister	Recycler & Entsorger
Lebenszyklusphasen	Rohstoffabbau	2	1	1				
	Produktion Kabinenbauteile und Transport		2	2	1			
	Endmontage Kabine				2			
	Produktion Treibstoff				1	1		
	Betriebsphase	Treibstoffverbrennung				1	2	
		Instandhaltung & Nachrüstung			1	1	1	2
	Recycling und Entsorgung							2
Summe		2	3	4	6	4	2	2

Gegenstand des Prozessmodells

Dynamische Parameter in Methode

Abbildung 35: Interaktionsmatrix zur Ermittlung von Datenverfügbarkeiten entlang des Produktlebenszyklus

Für das zu entwickelnde Prozessmodell sind somit zunächst alle Stakeholder, mit Ausnahme der Fluggesellschaften, zu integrieren. Dies bedingt sich zum einen durch die Fokussierung auf Zulieferer und zum anderen erlaubt die entwickelte Ökobilanzmethode im folgenden Kapitel eine flexible Parametrisierung der Betriebsphase. Hierdurch ist keine komplexe Datenvorbereitung notwendig und die Fluggesellschaft kann die notwendigen Daten zur Parametrisierung während des Konfigurationsprozesses mittels einer Benutzeroberfläche eingeben (siehe Kapitel 7). Zudem erfolgt die Aggregation der Daten beim Flugzeughersteller, weshalb die Endmontage im Prozessmodell zunächst nicht weiter betrachtet werden muss. Somit sind die Phasen Rohstoffabbau, Produktion Kabinenbauteile und Transport, Instandhaltung und Nachrüstung sowie Recycling und Entsorgung Gegenstand der folgenden Prozessmodellierung.

Neben der entwickelten Interaktionsmatrix werden als Grundlage für die Prozessmodellierung sowie zum besseren Geschäftsprozessverständnis mögliche Herausforderungen und Zielkonflikte aufgezeigt. Hierzu wird die in verschiedenen Disziplinen bekannte Methode des Wirkmodells angewendet (Blessing und Chakrabarti 2009; Hackl 2022). Die Methode dient als Instrument, um komplexe Systeme oder Zusammenhänge abzubilden und die Kette von Ursache und Wirkung darzustellen (Blessing und Chakrabarti 2009). Je nach Anwendungsfall können verschiedene Notationen angewendet werden. Bedingt durch den Fokus auf die Entwicklung des Prozessmodells wurde eine vereinfachte Notation gewählt, welche eine gute Verständlichkeit und Lesbarkeit ermöglicht. Grundlage für die Erstellung des Wirkmodells sind die gesammelten Erkenntnisse der durchgeführten Workshops sowie die daraus abgeleiteten Anforderungen (Unterabschnitt 5.2.1). Zunächst stellt die gewünschte hohe Qualität und Validität den Einstiegspunkt in das Wirkmodell

dar. Hieraus ergibt sich, dass bei fehlender Qualität der Ergebnisse die Akzeptanz aller Stakeholder sinkt. Die Qualität der Ergebnisse führt ferner zu hohen Anforderungen an die Datenqualität beziehungsweise zur Notwendigkeit einer Validierungsinstanz (Anforderung PM-A1). Zudem kann hier Anforderung PM-A3, der Bedarf für Modellierungsstandards, weiter bekräftigt werden. Die Modellierungsstandards können jedoch, je nach Kenntnissen der Zulieferer, zu einer langen Dauer für die Einbindung der Zulieferer führen. Hieraus resultieren höhere Kosten und dies kann wiederum zu einer geringeren Akzeptanz aller Stakeholder führen.

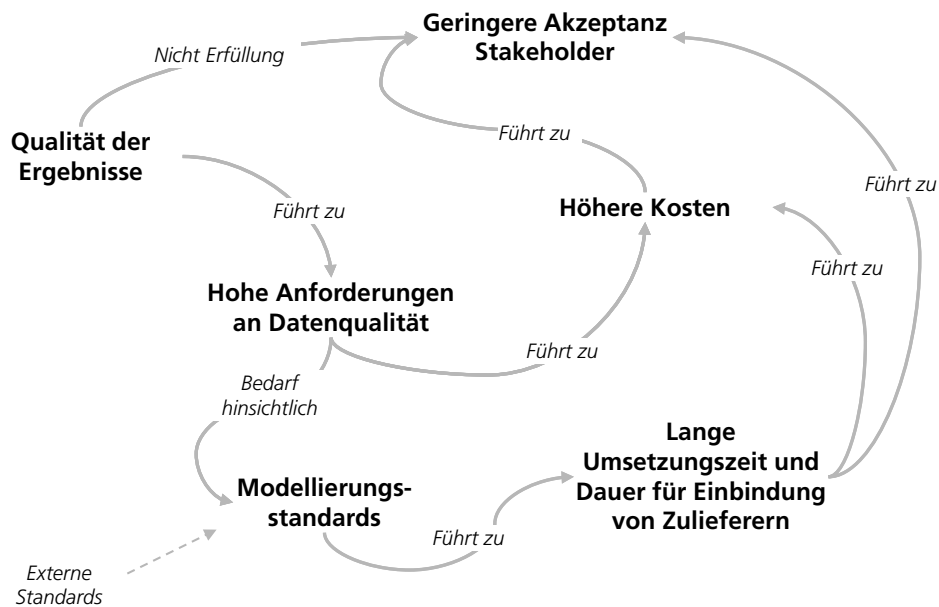


Abbildung 36: Wirkmodell zur Veranschaulichung von möglichen Zielkonflikten

Auch wenn das Wirkmodell nur einen Ausschnitt der Zusammenhänge darstellt, zeigt sich erstens bereits hier die Notwendigkeit zur mehrdimensionalen Betrachtung. Zweitens wird hier ein typischer Zielkonflikt zwischen Qualität (Ergebnisqualität), Kosten und Zeit (Lange Umsetzungszeit) deutlich. Diese Zielkonflikte sind aus anderen Bereichen wie dem Produktionsmanagement oder dem Projektmanagement bekannt und bei der Ableitung der Prozessmodellvarianten auf konzeptioneller Ebene mit zu betrachten. Zudem erfolgt durch die spätere Bewertung der Prozessmodellvarianten mittels der aufgestellten Anforderungen eine indirekte Berücksichtigung der Zielkonflikte (siehe Unterabschnitt 6.2.3).

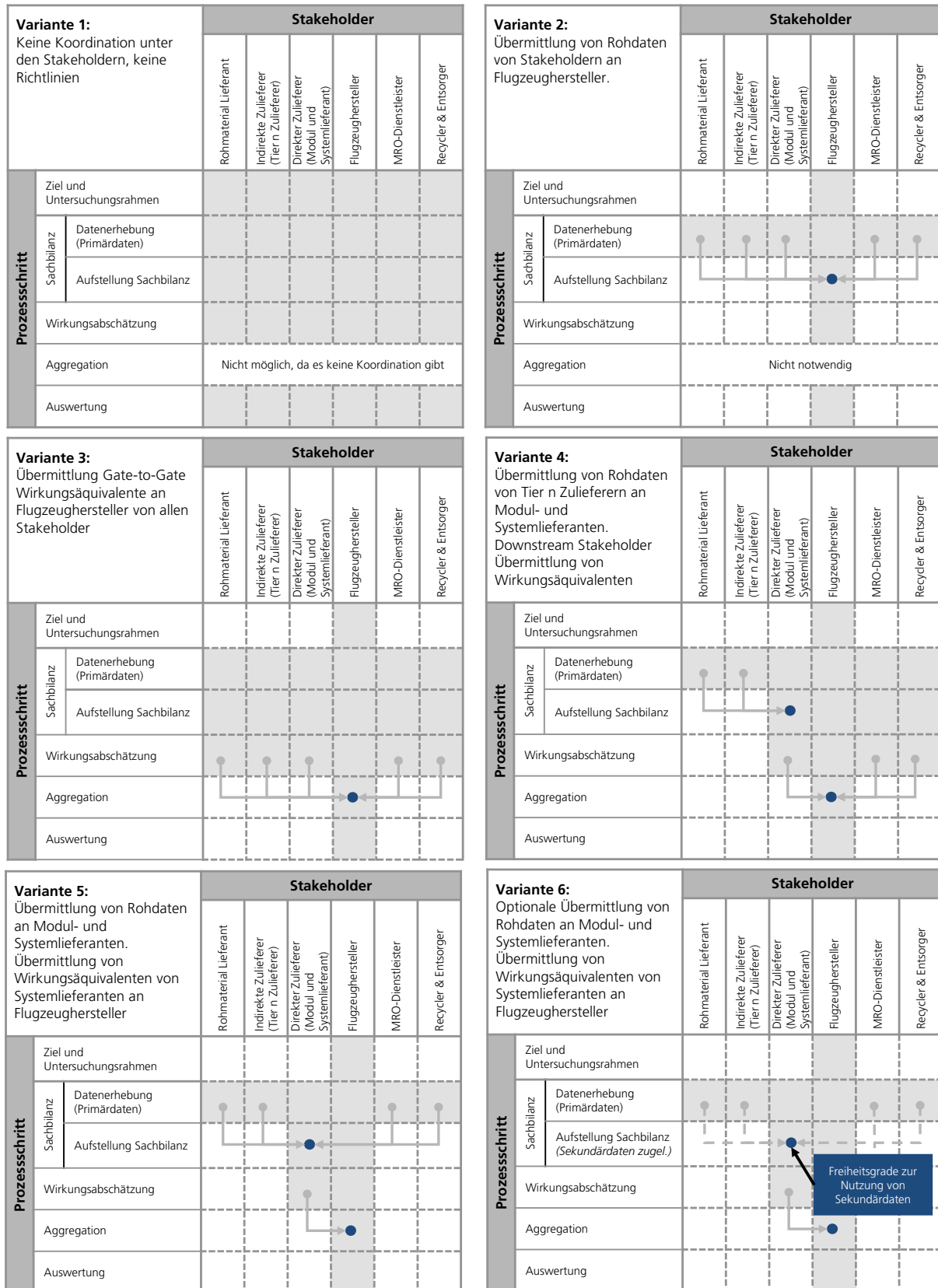
6.2.3 Ableitung von Prozessmodellvarianten und Abstraktion des Datenflusses

Nachdem die Datenverfügbarkeit entlang des Produktlebenszyklus von Flugzeugen und Flugzeugkabinen analysiert wurde und mögliche Zielkonflikte hinsichtlich der Integration von Zuliefererdaten identifiziert wurden, folgt in diesem Unterabschnitt die konzeptionelle Entwicklung von möglichen Prozessmodellvarianten. Hierzu wird wieder eine auf Matrizen beruhende Darstellung gewählt. Die Stakeholder sind erneut auf der Ordinate dargestellt, hierbei werden die Fluggesellschaften, wie bereits in Unterabschnitt 5.3.2 erläutert, zunächst nicht weiter berücksichtigt. Auf der Abszisse sind die Lebenszyklusphasen durch die typischen Prozessschritte der Ökobilanz (Un-

terabschnitt 3.1.2) ersetzt worden. Hierbei ist der Schritt *Sachbilanz* in zwei Teilschritte, der Datenerhebung sowie der Aufstellung der Sachbilanz, gegliedert. Zudem wird der Schritt *Aggregation der Teilergebnisse* integriert.

Bei der Erstellung der Prozessmodellvarianten werden zunächst alle theoretisch möglichen Prozessmodellvarianten in den Lösungsraum aufgenommen. Bedingt durch die Größe der Matrix sowie die theoretisch mögliche, freie Kombinationsmöglichkeit von Stakeholdern und Prozessschritten ergibt sich eine nicht bewertbare Anzahl von mathematisch möglichen Varianten. Hierbei sind jedoch noch keine logischen Restriktionen ausgehend von der Methode der Ökobilanz, der Zielstellung dieser Arbeit oder den in Unterabschnitt 5.2.1 formulierten Anforderungen berücksichtigt. Da ein mathematisches Vorgehen entsprechend den Rahmenbedingungen nicht zielführend erscheint, begründet sich also hierin ein induktiver Ansatz auf Basis von kausalen Zusammenhängen zur Ableitung und Bewertung der Prozessmodellvarianten.

Die entwickelte **Prozessmodellvariante eins** in Abbildung 37 illustriert die Eignung eines auf Basis von kausalen Zusammenhängen und Erkenntnissen geleiteten Vorgehens. In dieser Prozessmodellvariante ist keine Koordination unter den Stakeholdern vorgesehen, da alle sechs Stakeholder für die notwendigen Schritte einer Ökobilanz innerhalb ihres Geltungsbereichs zuständig sind. Dies bedingt auch die jeweils unkoordinierte Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens. Die Ergebnisse wären entsprechend nicht mehr zu aggregieren, da voraussichtlich verschiedene Standards und Richtlinien Anwendung fänden. Dies stützt jedoch direkt die formulierte Forderung nach Richtlinien (Abschnitt 5.2.1 Anforderung PM-A7). In **Variante zwei** ist der Flugzeughersteller für die Festlegung des Ziels sowie des Untersuchungsrahmens verantwortlich und erstellt auf Basis von übermittelten Rohdaten aller weiterer Stakeholder die Sachbilanz für den gesamten Lebenszyklus. Darauffolgend können Wirkungsabschätzung sowie Auswertung erfolgen. Die Aggregation der Ergebnisse ist damit nicht notwendig. Diese Variante erfüllt jedoch nicht die Anforderung hinsichtlich der Berücksichtigung von Bedenken bezüglich der Bereitstellung von Rohdaten (Anforderung PM-A4). Dies kann zu einer geringen Akzeptanz führen. Daher ist mit **Modellvariante drei** eine Möglichkeit dargestellt, welche das Teilen von Rohdaten verhindert. Hier stellen alle Stakeholder dem Flugzeughersteller die Ergebnisse für den Verantwortungsbereich in Form von Wirkungsäquivalenten bereit. Dem Flugzeughersteller wird somit eine Aggregation der Wirkungsäquivalente zu einer vollständigen Ökobilanz ermöglicht. Die Variante berücksichtigt jedoch nicht die Inhomogenität der Zulieferindustrie sowie MRO und Recycler hinsichtlich der Unternehmensstruktur (Anforderung PM-A4). Insbesondere bei indirekten Zulieferern ist davon auszugehen, dass notwendiges Wissen für die Erstellung von Ökobilanzen fehlen kann. Hieraus folgen **Variante vier** und **fünf**, welche die Übermittlung von Rohdaten an den direkten Zulieferer vorsehen und somit kein Wissen hinsichtlich der Durchführung von Ökobilanzen benötigt wird. Auch hier sind jedoch Bedenken hinsichtlich der Rohdaten zu nennen. Daraus folgt **Variante sechs**. Diese Variante sieht die optionale Übermittlung von Rohdaten der indirekten Zulieferer, MRO-Dienstleister sowie Recycler vor, lässt jedoch auch die Nutzung von Sekundärdaten bei den Systemlieferanten (direkten Zulieferern) zu.



Verantwortlich für Durchführung
 Zusammenführung von Daten
 Übermittlung von Informationen
 Optionale Übermittlung von Informationen

Abbildung 37: Abgeleitete abstrakte Prozessmodellvarianten

Die dargestellten Prozessmodelle werden nachfolgend einer Bewertung unterzogen, welche auf Basis der erhobenen Anforderungen an das Artefakt durchgeführt wird. Fünf der ermittelten Anforderungen sind erst in der Detailmodellierung zu berücksichtigen und können daher bei den konzeptionellen Modellen nicht bewertet werden. Vier weitere Anforderungen lassen sich jedoch, wie in Tabelle 16 dargestellt, bereits bewerten.

Tabelle 16: Bewertung der entwickelten Prozessmodellvarianten

Ident. Nr. Anforderung	Prozessmodellvariante					
	1	2	3	4	5	6
PM-A1	<i>In Detailmodellierung zu berücksichtigen</i>					
PM-A2	○	●	○	◐	◐	◐
PM-A3	<i>In Detailmodellierung zu berücksichtigen</i>					
PM-A4	○	○	●	◐	◐	●
PM-A5	○	○	●	◐	◐	●
PM-A6	○	○	○	○	○	◐
PM-A7	<i>In Detailmodellierung zu berücksichtigen</i>					
PM-A8	<i>In Detailmodellierung zu berücksichtigen</i>					
PM-A9	<i>In Detailmodellierung zu berücksichtigen</i>					
● Anforderung erfüllt ◐ Anforderung teilweise erfüllt ○ Anforderung nicht erfüllt						

Zunächst zeigt sich, dass keine der entwickelten Prozessmodellvarianten alle Anforderungen vollumfänglich erfüllt, Prozessmodellvariante sechs jedoch den größten Erfüllungsgrad aufweist. Für die Anforderung PM-A2, Berücksichtigung der inhomogenen Zuliefererstruktur, sowie der Anforderung PM-A6, Bereitstellung von Richtlinien ohne Daten sind in der weiteren Entwicklung Maßnahmen und Methode zu entwickeln, sodass diese erfüllt werden.

Zwischenfazit und Zusammenfassung der Erkenntnisse. Auf Basis der konzeptionellen Prozessmodellvariante sechs sowie den bisherigen Erkenntnissen folgt das in Abbildung 38 dargestellte übergeordnete Datenflussmodell für die weitere Entwicklung des Prozessmodells. Aus Sicht des Flugzeugherstellers besteht damit ausschließlich zu den direkten Zulieferern eine direkte Verbindung. Dieses bedingt sich durch die Anforderung PM-A9, welche einen bidirektionalen Informationsfluss zur Schaffung von Anreizen und Vorteilen für den direkten Zulieferer vorsieht. Für die direkten Zulieferer ergeben sich zudem optionale Informationsschnittstellen zu allen weiteren Stakeholdern. Es kann jedoch auch auf Sekundärdatenquellen zurückgegriffen werden.

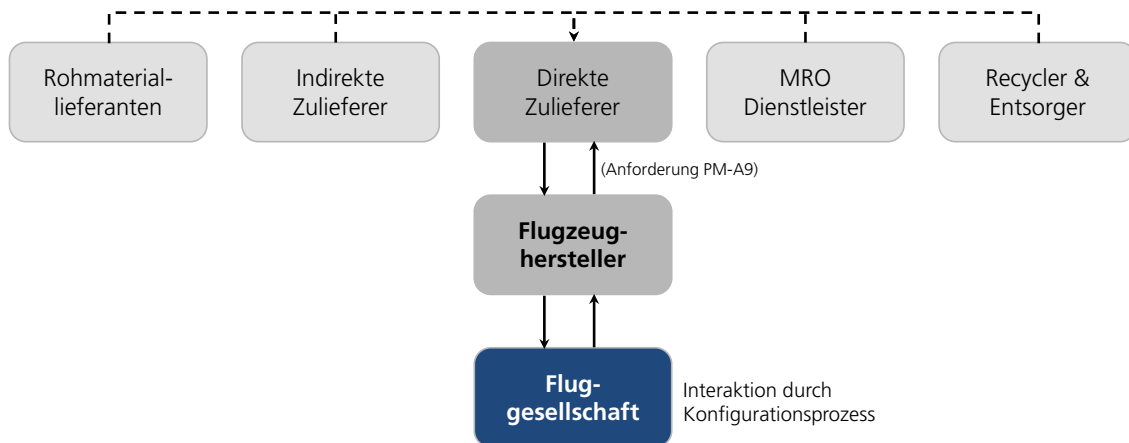


Abbildung 38: Abstraktes Datenflussmodell auf Basis der bisherigen Erkenntnisse

Für den Flugzeughersteller zeigt sich ein weiterer bidirektionaler Informationsfluss zu den Fluggesellschaften. Dies bedingt sich durch die direkte Integration in den Individualisierungs- und Konfigurationsprozess der Kabine. Dies ist Gegenstand des entwickelten Phasenmodells und wird in Abschnitt 6.4 dargestellt.

6.2.4 Entwicklung des Prozessmodells

Auf Grundlage des Datenflussmodells sowie der zu berücksichtigenden Anforderungen erfolgt in diesem Abschnitt die detaillierte Modellierung des Prozessmodells. Zur Ermittlung und Ordnung aller Teile des Prozessmodells werden zunächst die Inputs sowie Output dargestellt und Kernprozesse sowie notwendige weitere Gegenstände des Prozessmodells identifiziert.

Wie in Abbildung 39 dargestellt ist der Auslöser (Input) für den Start in das Prozessmodell entweder eine neue Baugruppe bzw. Modul oder ein neuer Zulieferer, welcher in den Konfigurationsprozess der Kabine aufgenommen werden sollen. Dies stößt die eigentlichen Kernprozesse innerhalb des zu entwickelnden Prozessmodells an. Hierbei lässt sich eine Gliederung der Kernprozesse in vier Teilprozesse vornehmen:

1. Initialisierung der Zulieferer und Datenintegration. Dieser Teilprozess dient zur Vorbereitung der darauffolgenden Schritte und stellt die Basis für einen robusten Regelprozess mit guter Ergebnisqualität dar. Ziel ist es unter Berücksichtigung der spezifischen Gegebenheiten der Zulieferer alle notwendigen Voraussetzungen für die folgenden Schritte zu schaffen.

2. Datenerhebung als Teil der Sachbilanz. In Schritt zwei folgt, angelehnt an das Vorgehen der Ökobilanz (Unterabschnitt 3.1.2), die notwendige Datenerhebung als Teil der Sachbilanz. In diesem Schritt wird die Grundlage für ein valides Ergebnis gelegt, daher ist er von besonderer Bedeutung für die weitere Entwicklung.

3. Sachbilanz und Wirkungsabschätzung. Die dann folgende Aufstellung der Sachbilanz zur Ermittlung der Wirkungsabschätzung ist als Gegenstand der Ökobilanzierung (Unterabschnitt 3.1.3) Kernprozess drei.

4. Datenaggregation und Auswertung. Abschließend erfolgen die Aggregation und die Auswertung der Teilergebnisse zu einem Gesamtergebnis.

Als Ergebnis (Output) der Kernprozesse kann das Bauteil bzw. die Baugruppe in den Konfigurationsprozess der Kabine aufgenommen werden.

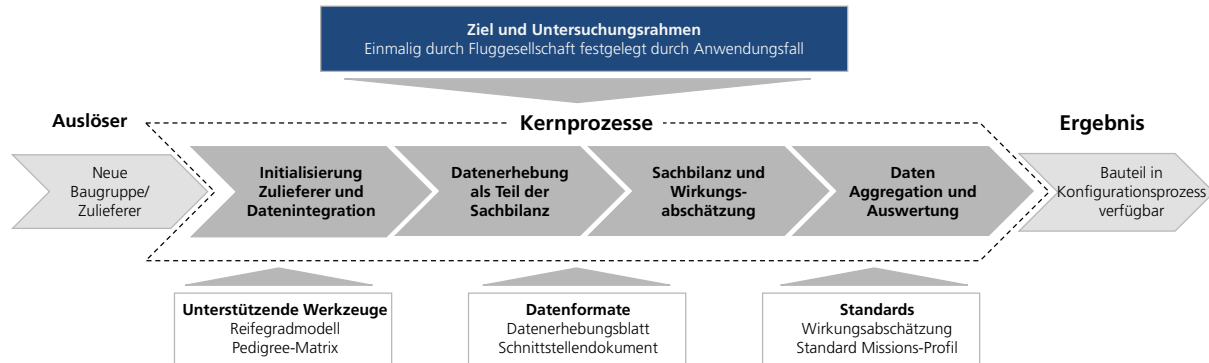


Abbildung 39: Konzeption des Prozessmodells

Neben den Kernprozessen lassen sich weitere notwendige Gegenstände identifizieren, welche zu integrieren sind. Zum einen ist es notwendig, dass Ziel und Untersuchungsrahmen definiert werden (Unterabschnitt 3.1.2). Dies ist jedoch nicht Teil des Regelprozesses und wird bereits durch den Anwendungsfall sowie das Ziel der Arbeit definiert (Kapitel 1). Dennoch ist es eine notwendige Voraussetzung für das Prozessmodell. Zum anderen lassen sich bereits weitere notwendige Inputs für die Kernprozesse identifizieren. Hierzu wurde eine Gliederung nach (1) unterstützenden Werkzeugen, (2) Datenformaten sowie (3) Standards vorgenommen. Die Einbettung dieser Gegenstände erfolgt in der weiteren Detaillierung des Prozessmodells.

Die vier Kernprozesse sowie die identifizierten Stakeholder bilden die Grundlage für das in Abbildung 40 dargestellte übergeordnete Prozessmodell. Das Modell zeigt die Kernprozesse und verortet entlang ebendieser die Aktivitäten je Stakeholder. Beginnend mit der Initialisierungsphase bei dem Flugzeughersteller erfolgt im zweiten Schritt bei allen weiteren Stakeholdern die Datenerhebung als Teil der Sachbilanz. Dies stellt die Grundlage für die Aufstellung der Sachbilanz und der darauffolgenden Wirkungsabschätzung dar. Verantwortlich ist hier der direkte Zulieferer. Zudem erfolgt die Übermittlung der Daten an den Flugzeughersteller. Abschließend erfolgt beim Flugzeughersteller die Aggregation der Daten. Hierbei wird mit einem standardisierten Missionsprofil eine vollständige Ökobilanz für das betreffende Bauteil des Zulieferers erstellt und für den Zulieferer zugänglich gemacht. Hierbei wird die entwickelte Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode verwendet (siehe Abschnitt 6.3). Für den Zulieferer ergeben sich mit den vollständigen Bilanzierungsergebnissen Möglichkeiten zur internen Verwendung der Ergebnisse (Anforderung PM-A9). Wie in der Notation bereits zu erkennen ist, bestehen die Aktivitäten aus Subprozessen. Entsprechend werden im Folgenden die vier Kernprozesse detailliert modelliert und näher erläutert. Neben der Modellierung werden in jedem Kernprozess die identifizierten unterstützenden Werkzeuge, Datenformate und Standards dargestellt.

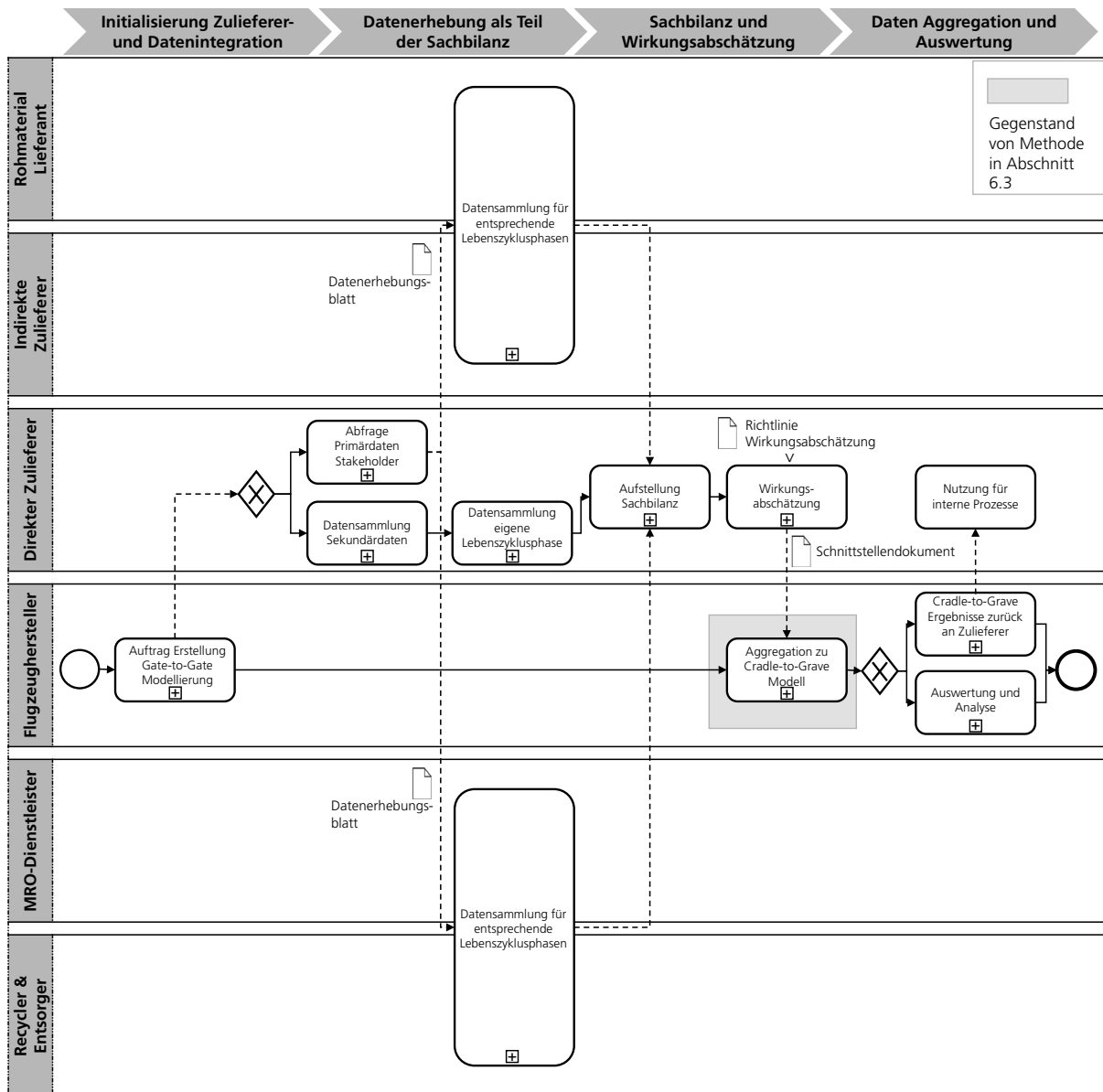


Abbildung 40: Übersicht über das gesamte Prozessmodell

Initialisierung, Daten- und Zuliefererintegration. Der Teilprozess zur Initialisierung der Daten- und Zuliefererintegration (Abbildung 41) beginnt beim Flugzeughersteller mit der internen Information, dass ein neues Bauteil bzw. Baugruppe in den Konfigurationsprozess der Kabine aufgenommen werden soll (1). Hieraus erfolgt zunächst die Prüfung, ob der Zulieferer bereits in den Regelprozess integriert ist (2). Hierzu können bereits bestehende Datenbanken der Zulieferer verwendet werden. Darauf folgt ein Entscheidungsgateway. Soweit der Zulieferer bereits in den Regelprozess integriert ist, wird automatisch ein Auftrag zur Modellierung der Cradle-to-Gate Ökobilanz für das entsprechende Bauteil gegeben (3). Der Zulieferer legt entsprechend des Auftrags einen Modellierungsauftrag an (4), sodass die notwendigen internen Prozesse und Ressourcen zur Verfügung gestellt werden können (5). Hierauf folgt eine erste Bestimmung der Systemgrenzen auf Basis des Expertenwissens und der zu berücksichtigenden ISO-Standards 14040 und 14044. Der Teilprozess der Initialisierung endet für den Zulieferer mit der Aufstellung eines Datensammelplans (6), welcher die Grundlage für die strukturierte Datensammlung darstellt.

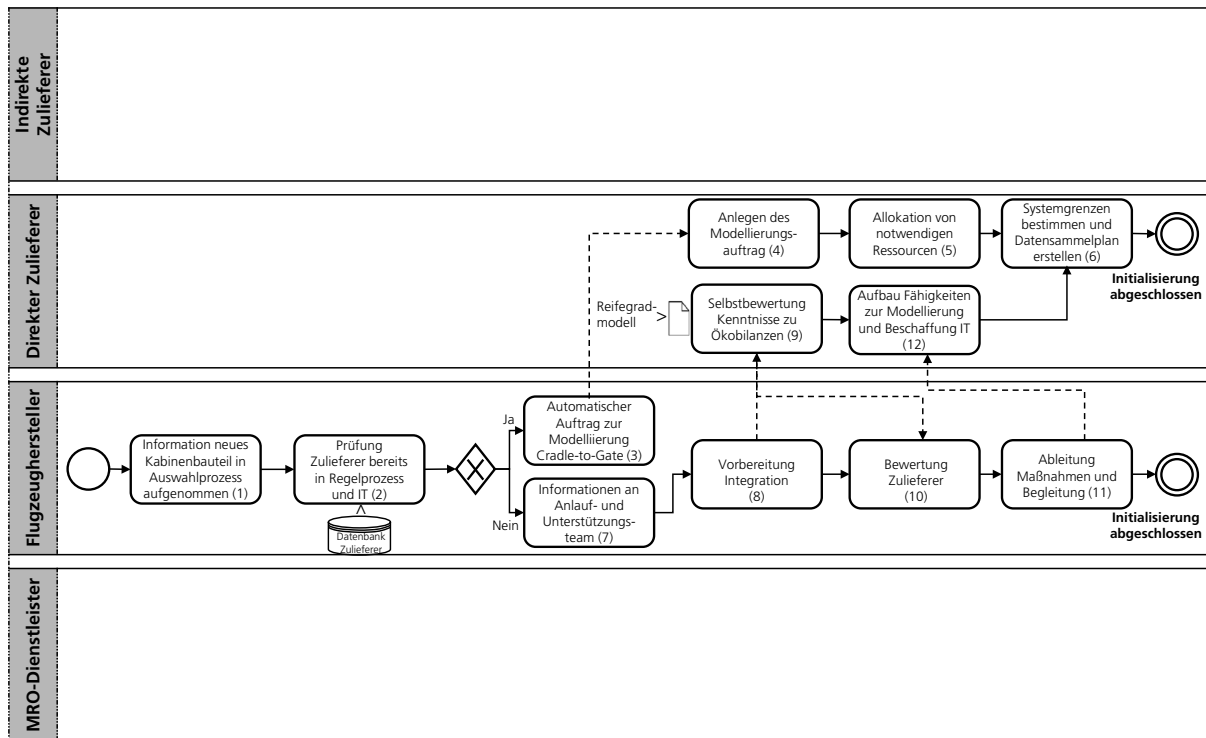


Abbildung 41: Teilprozess Initialisierung Daten- und Zuliefererintegration

Ist der Zulieferer bislang nicht in den Regelprozess integriert, wird entsprechend des Entscheidungsgateways ein Anlauf- und Unterstützungsteam beim Flugzeughersteller informiert (7). Dies begründet sich zum einen in der fragmentierten Zuliefererindustrie (Abschnitt 2.2) und zum anderen in der formulierten Anforderung, dieser gerecht zu werden (Anforderung PM-A2). Das Anlauf- und Unterstützungsteam bereitet die Integration des Zulieferers vor (8), sodass eine ausreichende Datenqualität gewährleistet werden kann. Als Hilfsmittel zur Ableitung von notwendigen Integrationsmaßnahmen führt der Zulieferer eine Selbstbewertung hinsichtlich der vorhandenen Ökobilanz-Kenntnisse durch.

Als methodisches Hilfsmittel zur Bewertung von Ist-Situationen (hier die Selbstbewertung) und zur Ableitung von Maßnahmen werden in Forschung und Praxis **Reifegradmodelle** eingesetzt (Christiansen und Gausemeier 2010). Reifegradmodelle bieten üblicherweise mittels einer Ordinalskala die Möglichkeit zur Selbst- und Fremdeinschätzung für einen konkreten Bezugsrahmen. In der Literatur lassen sich für verschiedenste Anwendungszwecke Reifegradmodelle in unterschiedlichen Ausprägungen finden (Christiansen und Gausemeier 2010). Für den vorliegenden Anwendungsfall, zur Bewertung der Fähigkeiten von Unternehmen (hier die Zulieferer), konnte allerdings kein konkretes Modell identifiziert werden. Hieraus motiviert sich der Bedarf zur Entwicklung eines für den Anwendungsfall geeigneten Reifegradmodells. Die Entwicklung folgt dabei dem vom Becker et al. vorgeschlagenen Vorgehensmodell zur Entwicklung von Reifegradmodellen und gliedert sich in vier übergeordnete Schritte: Problemdefinition, Vergleich bestehender Reifegradmodelle sowie Festlegung der Entwicklungsstrategie, Reifegradmodellentwicklung, Evaluation (Becker et al. 2009). Alle vier Schritte wurden iterativ mehrfach durchlaufen und im Ergebnis zeigt sich das in Abbildung 42 dargestellte Reifegradmodell. Zunächst wurde auf Basis des durchgeführten Vergleichs eine vierstufige Ordinalskala definiert. Diese reicht von 1 (keine Anwendung) bis 4 (vollständige Anwendung) und erlaubt hinreichende Differenzierungsmöglichkeiten. Die Bewertung erfolgt

hierbei entlang von vier Dimensionen: Die erste Dimension stellt die Berücksichtigung von Standards dar. Durch Anwendung der bestehenden Standards, wie beispielsweise der ISO 14040 und 14044 (Abschnitt 3.1.2) wird eine methodisch korrekte Anwendung und Durchführung sichergestellt. Die Bewertung dieser Dimension reicht von keiner Anwendung bis zur vollständigen Anwendung. Die zweite Dimension, Akzeptanz im Unternehmen, motiviert sich durch die Erfolgsfaktoren für Ökobilanzen. Bei hoher Akzeptanz innerhalb des Unternehmens wird die Durchführung deutlich vereinfacht. Dimension drei und vier zielen auf die Durchdringung innerhalb des Unternehmens ab und beschreiben zum einen die Integration von Ökobilanzen in Entscheidungsprozesse sowie die Implementierung in die Unternehmensstrategie.



Abbildung 42: Reifegradmodell zur Bewertung der Zulieferer hinsichtlich der Anwendung von Ökobilanzen

Auf Basis des Reifegradmodells erfolgt eine Bewertung des Zulieferers (10) auf Seiten des Flugzeugherstellers und notwendige Maßnahmen werden abgeleitet (11). Maßnahmen können hier unter anderem Schulungen sein. Darauf folgt der Aufbau der notwendigen Fähigkeiten sowie die Beschaffung möglicher IT-Werkzeuge beim Zulieferer (12). Nach Abschluss der Maßnahmen beginnt der Regelprozess (4).

Datenerhebung als Teil der Sachbilanz. Im zweiten Teilprozess des Prozessmodells erfolgt die notwendige Datenerhebung, welche als Teil der Sachbilanz zu verstehen ist. Als erste Aktivität erfolgt durch den Zulieferer eine Bewertung, inwieweit eine Primärdatenerhebung notwendig bzw. möglich ist (1). Methodisch kann die Entscheidung durch die Anwendung der sogenannten Pedigree-Matrix gestützt werden. Die Pedigree-Matrix stellt eine semi-quantitative Methode zur Bewertung der Datenqualität dar, geht auf Arbeiten von Weidema und Wesnæs zurück (Weidema und Wesnæs 1996) und wird in verschiedenen Ausprägungen verwendet (Europäische Union 2013; Weidema et al. 2013). Diese erste Form der Pedigree-Matrix wurde ausschließlich zur Bewertung der Datenqualität entlang der fünf Kriterien Zuverlässigkeit, Vollständigkeit, zeitliche Korrelation, geografische Korrelation und technologische Korrelation entwickelt. Mittels einer Likert-Skala und Subsumierung der Bewertungsdimensionen kann ein Gesamtqualitätswert (engl.: Data Quality Rating; kurz: DQR) berechnet werden. In Anhang A.9 ist die Pedigree-Matrix zur Entscheidungsunterstützung dargestellt, zudem wird erläutert wie der DQR berechnet wird. Diese kann ex-ante verwendet werden. Wird wie in Tabelle 17 dargestellt ein zu erwartender DQR von 4 überschritten, ist es entsprechend der Empfehlungen der Europäischen Union (Europäische Union 2013) notwendig die Datenqualität zu verbessern.

Tabelle 17: Gesamtdatenqualitätsniveau der Pedigree-Matrix und Implikationen für die Datenerhebung (angelehnt an Europäische Union 2013)

Gesamtdatenqualitätswert	Gesamtdatenqualitätsniveau	Implikation
< 1,6	Ausgezeichnete Qualität	Keine weitere Aktion notwendig
1,6 bis 2,0	Sehr gute Qualität	Keine weitere Aktion notwendig
2,0 bis 3,0	Gute Qualität	Keine weitere Aktion notwendig
3 bis 4,0	Mittlere Qualität	Maßnahmen zur Datenverbesserung empfohlen
> 4,0	Schlechte Qualität	Maßnahmen zur Datenverbesserung zwingend notwendig

Notwendigerweise folgt darauf die Primärdatenabfrage (2) des direkten Zulieferers an die relevanten Stakeholder sowie die eigene Erhebung eigener Primärdaten für die eigenen relevanten Prozesse (z.B. Produktionsschritte). In Aktivität drei werden darauffolgend relevante Primärdaten aller Stakeholder gesammelt (3) und dokumentiert (4). Die Validierung und Bewertung (5) der dokumentierten Daten erfolgt mittels der bereits eingeführten Pedigree-Matrix. Für die mit der Primärdatenerhebung beauftragten Stakeholder endet mit der Übermittlung der Daten (6) an den direkten Zulieferer die Integration in das Prozessmodell. Die so gesammelten Daten werden vom direkten Zulieferer abschließend geprüft (7) und mit der eigenen Datenerhebung zusammengeführt (9). Soweit keine ausreichenden Lieferantenbeziehungen bestehen oder eine fehlende Bereitschaft für das Teilen von Daten besteht (hierzu sei auf die ermittelten Herausforderungen in Unterabschnitt 5.2.1 hingewiesen) ermöglicht das Prozessmodell die Datensammlung mit weiteren Sekundärdaten (8). Abbildung 43 fasst den Teilprozess zur Datenerhebung zusammen.

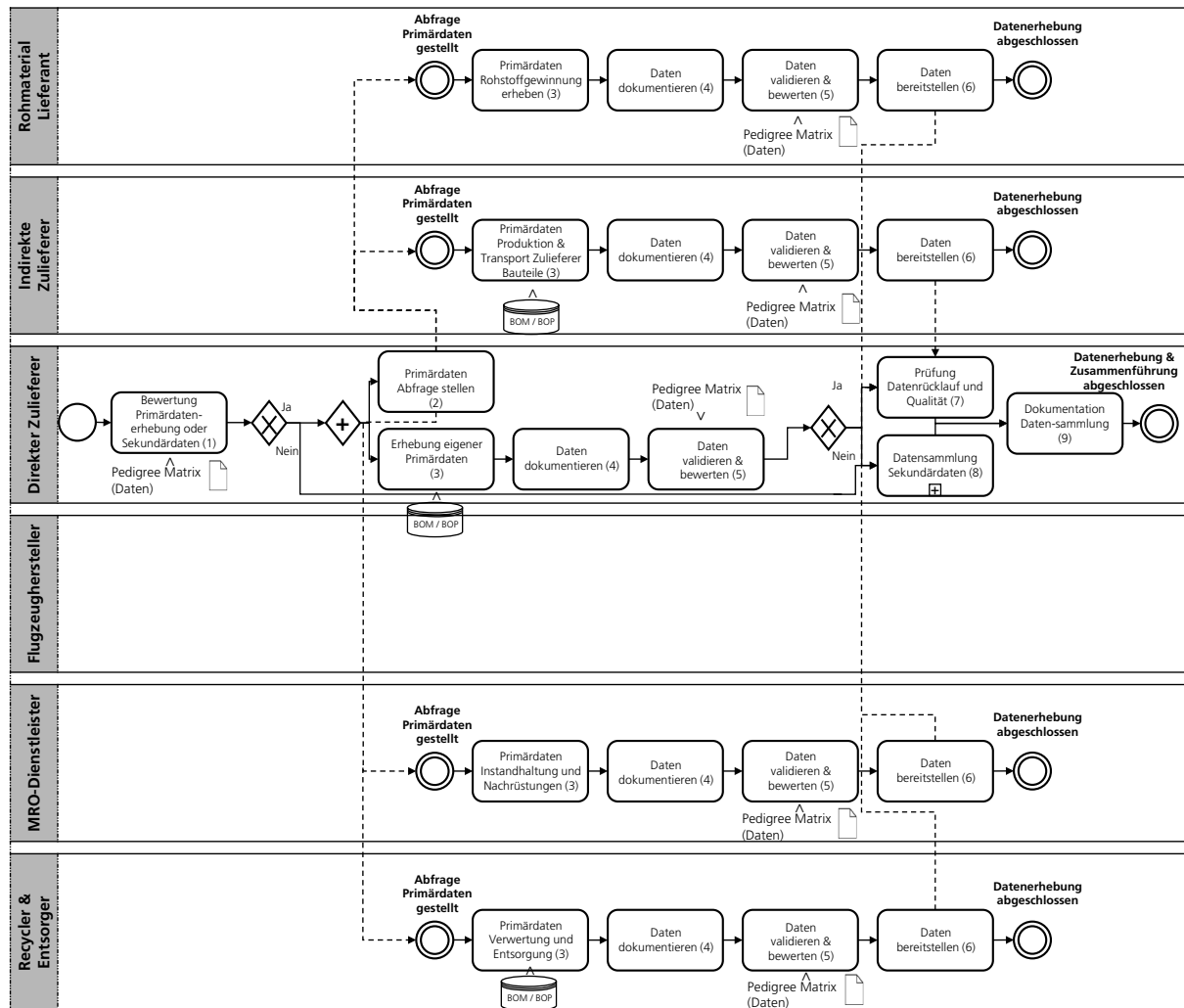


Abbildung 43: Teilprozess Datenerhebung als Teil der Sachbilanz

Sachbilanz und Wirkungsabschätzung. Der dritte Teilprozess des Prozessmodells beschäftigt sich mit der Aufstellung der Sachbilanz und der darauffolgenden Wirkungsabschätzung und ist in Abbildung 44 dargestellt. Dieser ist angelehnt an das typische Vorgehen zur Erstellung von Öko-bilanzen. Die Aufstellung der Sachbilanz beginnt entsprechend mit der Erstellung eines Input-Output Modells (1). Hierbei werden die während der Datensammlung erfassten Daten übersichtlich dargestellt, sodass die weitere Modellierung erleichtert wird. Im zweiten Schritt erfolgt auf Basis des Input-Output-Modells die Modellierung der Emissionsoutputs (2). Das Ergebnis dieses Schrittes ist die Summe aller berücksichtigten Emissionen und schließt somit die Aufstellung der Sachbilanz ab.

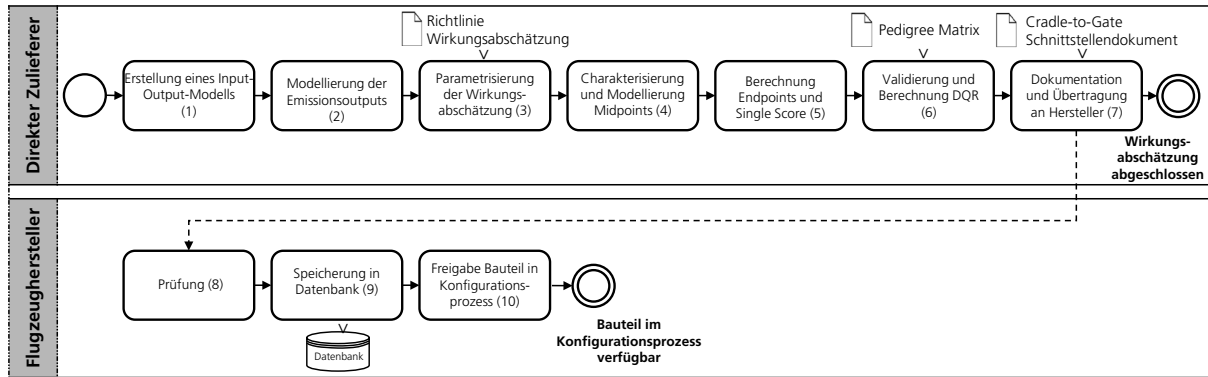


Abbildung 44: Teilprozess Sachbilanz und Wirkungsabschätzung

Die Sachbilanzergebnisse sind im Folgenden in Wirkungsäquivalente zu überführen. Hierzu ist zunächst die Wirkungsabschätzungsmethode zu parametrisieren (3). Wie in Unterabschnitt 3.1.3 dargestellt existieren verschiedene Methoden zur Wirkungsabschätzung und eine Vergleichbarkeit bzw. die Möglichkeit zur Zusammenführung von Teilergebnissen ist ausschließlich möglich, wenn die Wirkungsabschätzung von allen Zulieferern mit derselben Methode durchgeführt wird. Dies zeigt die hohe Relevanz von Anforderung PM-A3. Bedingt durch die Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse sowie Anforderung ÖM-A4 für die Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode wird die ReCiPe-Methode als Standard definiert (Unterabschnitt 5.2.2).

Innerhalb der ReCiPe-Methode können für die Berechnung der Midpoint und Endpoint Indikatoren sowie deren Gewichtung und Normalisierung weitere Spezifikationen vorgenommen werden (Unterabschnitt 3.1.3). Zunächst ist es notwendig, die Wirkungsabschätzungsperspektive zu definieren. Angeboten werden von der ReCiPe-Methode drei Perspektiven: Ein kurzer Zeithorizont von 20 Jahren (Individualist), ein Zeithorizont von 100 Jahren (Hierarchist) sowie ein Zeitraum von 1000 Jahren und länger (Egalitär). Die Perspektive Hierarchist gilt in der Wissenschaft als am weitesten verbreitet und wird daher auch hier angewendet. Weiterhin ist die Wirkungsabschätzungsregion zu wählen. Hier wird aufgrund des globalisierten Flugverkehrs die Region „Welt“ gewählt. Ferner ist abschließend die Gewichtung der Ergebnisse notwendig. Die bereitgestellten Durchschnittsgewichtungen seien hier als Standard definiert. Wie in Abbildung 45 dargestellt ergibt sich so eine Richtlinie zur Wirkungsabschätzung, welche eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse ermöglicht und von allen Zulieferern zu befolgen ist. Alle notwendigen Datensätze sind öffentlich zugänglich und werden je nach Stand der Forschung aktualisiert. Die in der Praxis oftmals verwendeten Softwarelösungen zur Erstellung einer Ökobilanz integrieren die bereitgestellten Daten und ermöglichen die Anwendung der dargestellten Richtlinie.

Wirkungsabschätzungsmethode	
ReCiPe 2016	
Wirkungsabschätzungsperspektive	Notwendige Datensätze und Datenquelle
Hierarchist - Zeithorizont von 100 Jahren als Standard	Notwendige Datensätze <ul style="list-style-type: none"> • Charakterisierungsfaktoren Midpoint Indikatoren • Mid-to-Endpoint Indikatoren • Normalisierungsfaktoren • Gewichtungsfaktoren (Standard) Öffentliche zugängliche Quelle <ul style="list-style-type: none"> • Nationales Institut für öffentliche Gesundheit und Umwelt (RIVM) der Niederlande – <i>Entwickler der ReCiPe Methode</i>
Wirkungsabschätzungsregion „Welt“	

Abbildung 45: Richtlinie zur Wirkungsabschätzung

Nachdem die Auswahl und Parametrisierung der Wirkungsabschätzungsmethode abgeschlossen sind, kann die Charakterisierung der Emissionsoutputs sowie die Modellierung der Midpoint Indikatoren erfolgen (4). Hierzu sind die Charakterisierungsfaktoren der Midpoint Indikatoren notwendig. Die Berechnung der Endpoint Indikatoren sowie des Single Scores erfolgt mithilfe der Mid- to Endpoint Indikatoren im darauffolgenden Schritt (5). Mit dieser Aktivität ist die Wirkungsabschätzung abgeschlossen. Zur Sicherstellung der Daten- und Ergebnisqualität erfolgt die Berechnung des DQR. Hierbei kann erneut die Pedigree-Matrix Verwendung finden. Diese inkludiert neben der Datenqualität weitere Kriterien wie die Qualität der Dokumentation. Im letzten Schritt erfolgt die Dokumentation und Übertragung der Ergebnisse an den Flugzeughersteller (7). Hierzu wurde ein standardisiertes Schnittstellendokument entwickelt (Anforderung PM-A7). Das Schnittstellendokument ist in Abbildung 46 als Ausschnitt dargestellt. Die Struktur ist angelehnt an die in der Industrie bereits bekannten *Environmental Product Declarations* (EPD), welche in verschiedenen Industrien bereits Anwendung finden und beispielsweise in der Bauindustrie weiter standardisiert wurden (DIN EN 15804 2020).

Die Struktur des Dokuments folgt drei Ebenen: Zunächst sind notwendige Metadaten zu dokumentieren. Hierzu gehören der Name des Zulieferers, die bilanzierte Baugruppe sowie Bezeichnung und Angaben zur Lebensdauer und das Gewicht. Diese Informationen ermöglichen zum einen eine eindeutige Zuordnung und zum anderen sind die Daten für weitere Berechnungen im folgenden Abschnitt notwendig (siehe Abschnitt 6.3). Auf der folgenden Ebene werden generelle Informationen zur Datenerhebung notiert. Hierzu gehören der DQR sowie Angaben zu den gewählten Systemgrenzen. Abschließend werden auf Ebene drei die Ergebnisse der Modellierung dargestellt. Hierzu gehören die Mid- und Endpoint Indikatoren sowie der Single Score der entsprechenden Komponente.

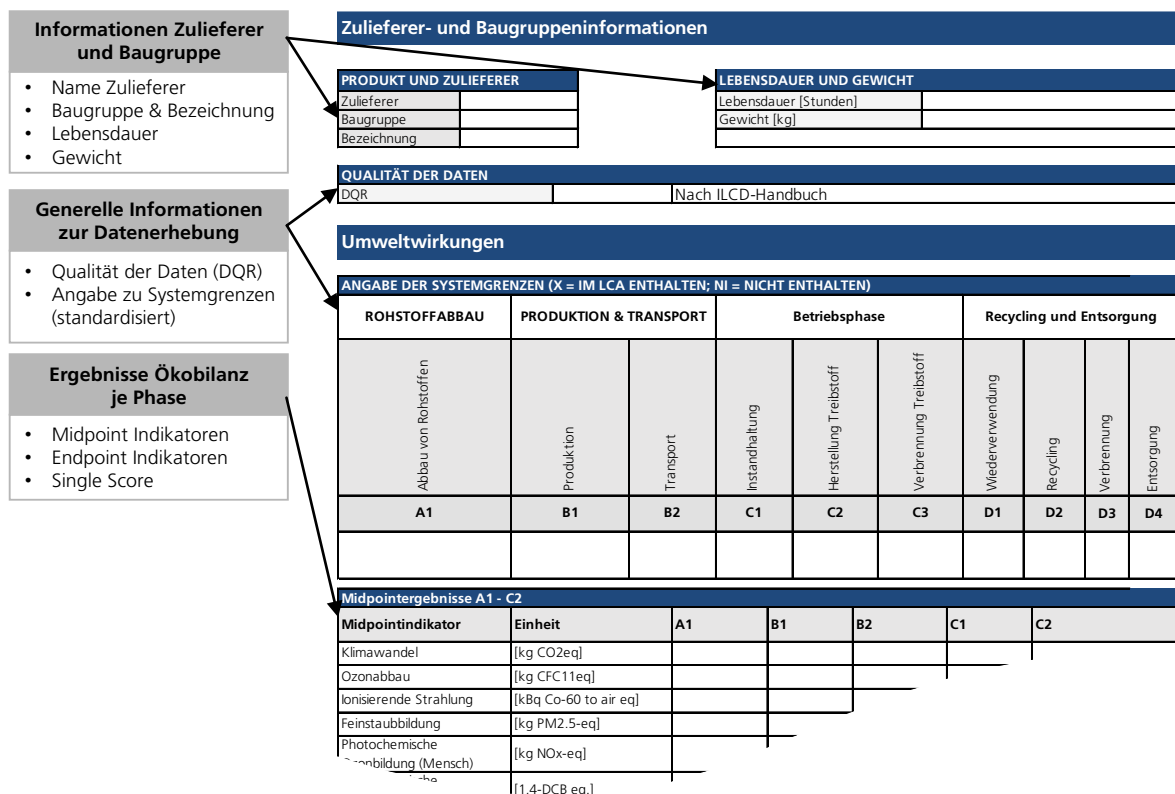


Abbildung 46: Ausschnitt des entwickelten Schnittstellendokuments

Nachdem das Schnittstellendokument an den Flugzeughersteller übermittelt wurde, erfolgt eine Prüfung (8) auf Vollständigkeit und Konsistenz. Im Anschluss werden die jeweiligen Schnittstellendokumente in einer Datenbank gespeichert (9). Abschließend kann die betreffende Baugruppe für den Konfigurationsprozess (10) freigegeben werden und ist somit innerhalb des Konfigurationsprozesses verfügbar.

Daten-Aggregation und Auswertung. Der vierte und letzte Teilprozess resultiert aus der aufgestellten Anforderung eines bidirektionalen Informationsaustausches zur Schaffung von Anreizen für den Datenaustausch (Anforderung PM-A9) und ist in Abbildung 47 dargestellt. Entsprechend dieser Anforderung wird das übermittelte Schnittstellendokument mit der Umweltbilanz für die Treibstoffherstellung und -verbrennung vervollständigt (1). Hierzu können, basierend auf Realdaten, standardisierte Missionsprofile für verschiedene Flugzeugtypen verwendet werden. Die Berechnung der Wirkungsäquivalente erfolgt dann mit der entwickelten Methodik zur Integration Ökobilanzmethode. Nachdem die spezifischen Umweltwirkungen von Treibstoffherstellung und -verbrauch berechnet wurden, werden diese im Schnittstellendokument zusammengeführt (2) und es liegt eine vollständige Ökobilanz über den gesamten Lebenszyklus vor. Diese wird an den Zulieferer übermittelt (3) und kann somit für interne Prozesse verwendet werden (4). Beispiele sind hier zum Beispiel das Marketing oder Fragestellungen in Forschung und Entwicklung.

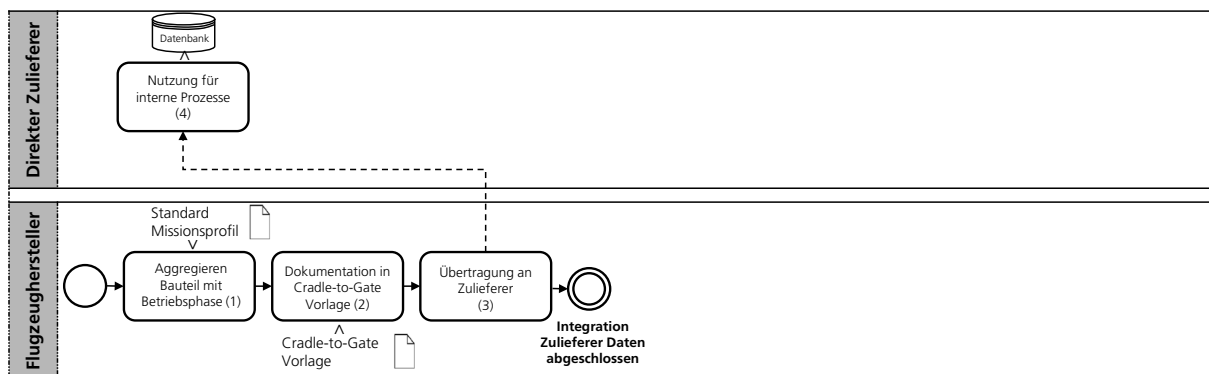


Abbildung 47: Teilprozess Daten-Aggregation und Auswertung

6.2.5 Spezifische Hinweise zur Aufstellung der Sachbilanz

Die Aufstellung der Sachbilanz ist in der Luftfahrtindustrie mit einigen Besonderheiten verbunden. Diese werden in diesem Unterabschnitt kurz dargestellt, sodass eine Berücksichtigung bei der Modellierung ermöglicht wird.

Buy-to-fly-Verhältnis in der Produktion. Das Buy-to-fly-Verhältnis bezeichnet das Verhältnis der Masse des eingesetzten Rohmaterials und zur Masse des Bauteils am Ende Produktion (Watson und Taming 2018). Dieses Verhältnis gilt in der Luftfahrtindustrie als wichtige Metrik für die Umweltbilanz von Bauteilen, unterliegt jedoch je nach Fertigungsprozess und Bauteil großen Streuungen (Ilg 2015). Für die Modellierung der Produktionsphase ist dieses Verhältnis entsprechend zu berücksichtigen.

Recycling und Entsorgung. Bedingt durch den langen Lebenszyklus von Flugzeugen sowie durch die unterschiedlichen Verwerter in dieser letzten Phase eines Flugzeugs sind oftmals keine

Daten für diese Phase vorhanden. Für Zulieferer ist es entsprechend notwendig Annahmen für diese Phase Recycling und Entsorgung zu treffen. In der Literatur finden sich Angaben auf Flugzeugebene zum Recycling mit einer Wiederverwendung von 15 % der Bauteile und einer Werkstoffrückgewinnung von 50 bis 60 % (Woidasky und Jeanvré 2022). Je nach Werkstoff können diese Angaben jedoch stark schwanken.

6.2.6 Zwischenfazit und Diskussion

In diesem Abschnitt wurde das erste Artefakt entwickelt. Das Prozessmodell zur Integration von Zuliefererdaten basiert auf den in Unterabschnitt 5.2.1 aufgestellten Anforderungen. Die aus den Workshops aggregierten Anforderungen stellen insbesondere Barrieren und Herausforderungen des unternehmensübergreifenden Informationsaustausches in den Vordergrund, weshalb die daraus folgenden Implikationen berücksichtigt werden. Auf Basis des mehrstufigen methodischen Vorgehens in diesem Abschnitt wurde zunächst ein tieferes Geschäftsprozessverständnis mittels einer Interaktionsmatrix sowie eines Wirknetzes geschaffen. Daraufaufgehend wurden Prozessmodellvarianten abgeleitet und mit den aufgestellten Anforderungen bewertet. Im nächsten Schritt konnte das Prozessmodell konzeptioniert und notwendige unterstützenden Werkzeuge, Datenformate und Standards identifiziert werden. Die detaillierte Modellierung wurde mit dem Modellierungsstandard BPMN durchgeführt und gliedert sich in vier Teilprozesse: Erstens die Initialisierung der Zulieferer- und Datenintegration, zweitens die Datenerhebung als Teil der Sachbilanz, drittens die Sachbilanz und Wirkungsabschätzung sowie viertens die Daten-Aggregation und Auswertung. Innerhalb dieser Phasen sind klar definierte Aktivitäten und notwendige unterstützende Werkzeuge je Stakeholder definiert. Als integraler Bestandteil des Prozessmodells bietet das entwickelte Schnittstellenstellendokument einen standardisierten Weg zur bidirektionalen Übermittlung von Umweltdaten. Das entwickelte Prozessmodell adressiert somit insbesondere Forschungsfrage eins und beantwortet diese mit dem entwickelten Prozessmodell sowie den definierten Teillinhalten.

Für die Umsetzung eines derartigen Prozessmodells ist besonders der iterative Charakter von Ökobilanzen zu beachten (European Commission 2010). Mit zunehmender Anwendung und Vertrautheit der Methoden ist von einer zunehmend verbesserten Datenqualität auszugehen und die Erweiterung von Standards hinsichtlich der detaillierten Systemgrenzen erscheint notwendig. Ziel muss es hierbei sein die Vergleichbarkeit unter Zulieferern und unter Baugruppen zu erhöhen. Bei der initialen Einführung sind jedoch ausreichend Freiheitsgrade notwendig, um die Hürden für die Einführung möglichst gering zu halten und damit die Akzeptanz zu erhöhen. Von hoher Bedeutung für die Akzeptanz ist ferner eine starke Fokussierung auf die erste Phase des Prozessmodells, da hier bei fehlendem Know-how des Zulieferers eine aktive Unterstützung durch den Flugzeughersteller vorgesehen ist. Für die kontinuierliche Verbesserung und Detaillierung des Prozessmodells ist zudem die Einrichtung von gemeinsamen Arbeitsgruppen und Institutionen notwendig. Beispiel hierfür finden sich unter anderem in der Bauindustrie, welche eine Interessenvertretung für Umweltproduktdeklarationen unterhält (IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V. 2023).

6.3 Entwicklung der Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode

Dieser Abschnitt stellt die entwickelte Methodik zur integrierten Bewertung der Umweltauswirkungen der Flugzeugkabine vor. Grundlage der Entwicklung sind die in Unterabschnitt 5.2.2 ermittelten Anforderungen sowie die identifizierten Standards und Richtlinien. Im nächsten Abschnitt wird das zugrundeliegende methodische Vorgehen zunächst näher erläutert. Darauf aufbauend wird die Methodik konzeptioniert und detailliert dargestellt. Grundlage für dieses Kapitel stellt eine Veröffentlichung (Keiser et al. 2023a) des Autors dar.

6.3.1 Methodisches Vorgehen

Vor der weiteren Konzeption werden in diesem Unterabschnitt zunächst Vorüberlegungen hinsichtlich des methodischen Vorgehens angestellt. Für die Entwicklung von spezifischen Methodiken im Kontext der Ökobilanzmethode existieren keine spezifischen methodischen Vorgehensweisen oder Vorgehensmodelle. Bedingt durch die Komplexität empfiehlt sich allerdings eine begleitende Vorgehensweise zur Strukturierung des Problem- und Lösungsraums. Ausgehend von dem stark modulhaften Charakter von Ökobilanzmethoden, welche sich aus den Lebenszyklusphasen sowie der Vorgehensweise ergibt, begründet sich das in Abbildung 48 dargestellte Vorgehen. Dieses ist angelehnt an das methodische Konstruieren (VDI Richtlinie 2221 1993) und gliedert sich in sieben Schritte: Zunächst ist die Aufgabenstellung zu klären und Anforderungen sind zu ermitteln. Dies ist in Kapitel 4 und 5.2.2 für dieses Artefakt bereits geschehen. Darauf aufbauend werden die Funktionen sowie die übergeordnete Struktur der Methodik definiert und konzeptioniert (Unterabschnitt 6.3.2). Hieraus ergeben sich die zu entwickelnden Module sowie die Detailgestaltung ebendieser (Unterabschnitt 6.3.5 6.3.6 und 6.3.7). Die Gestaltung des Gesamtsystems als vorletzter Schritt erfolgt im Rahmen dieser Arbeit durch die Synthese zur Gesamtsystematik entsprechend des konzeptionellen Rahmens.

Nach VDI 2221 erfolgt abschließend die Erstellung von Nutzungsangaben. Dies ist im Kontext dieser Arbeit nicht notwendig, da eine softwaretechnische Umsetzung vorgesehen ist. Die Anwendung fokussiert hier insbesondere einen strukturierten Programmablauf und eine hohe Benutzerfreundlichkeit (Anforderungen SB-A1 und SB-21 des Artefakts) und weiterführende Informationen werden bei dieser Umsetzung bereitgestellt. Dieser letzte Schritt der VDI 2221 ist somit nicht explizit notwendig und wird implizit durch die Umsetzung berücksichtigt.

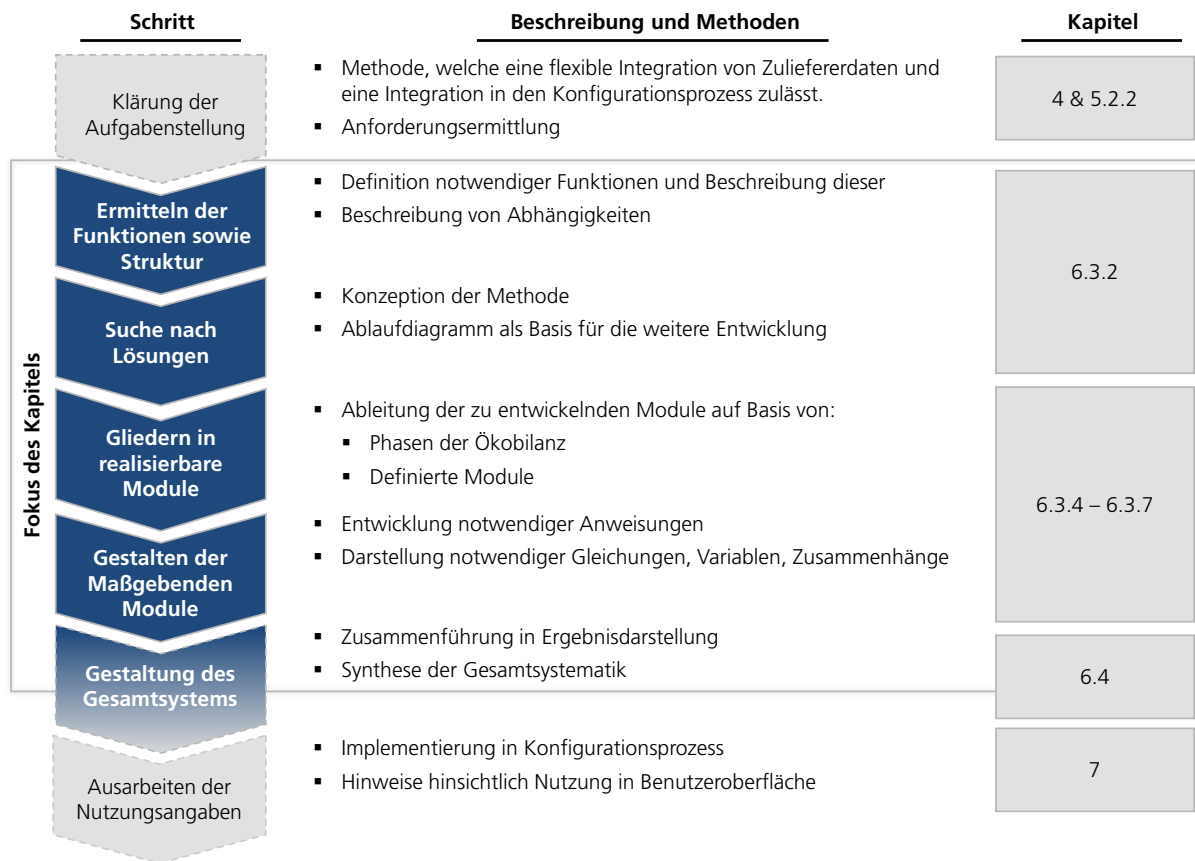


Abbildung 48: Methodisches Vorgehen zur Entwicklung der Methodik (angelehnt an VDI Richtlinie 2221 1993)

6.3.2 Konzeption der Methodik

Für die Konzeption der Methodik sind zunächst die gesammelten Erkenntnisse des übergeordneten konzeptionellen Rahmens (Kapitel 4), der Anforderungsermittlung (Unterabschnitt 5.2.2) sowie des bereits entwickelten Artefakts zur Integration der Zuliefererdaten (Abschnitt 6.2) in einen Zusammenhang zu bringen. Hierzu sind in Abbildung 49 zunächst die betrachteten Lebenszyklusphasen dargestellt. Die Phasen lassen sich für die weitere Konzeption in drei Bereiche kategorisieren: Erstens solche Phasen, welche durch die Zulieferer auf Basis definierter Standards sowie der eigenen Daten modelliert werden. Zu diesen in *grau* dargestellten Phasen gehören der Rohstoffabbau, Produktion und Transport, Instandhaltung und Wartung als Teil der Betriebsphase sowie die abschließende Phase des Recyclings und der Entsorgung. Als zweiter Bereich gilt es, die Endmontage zu berücksichtigen, welche durch den Flugzeughersteller modelliert wird. Zudem gibt es im Gegensatz zur ersten Kategorie keine direkte Interaktion zum Konfigurationsprozess. Als dritter Bereich kann die Treibstoffherstellung und Verbrennung definiert werden. Für diesen Bereich besteht derzeit keine parametrisierbare Methodik, welche direkt in den Konfigurationsprozess der Kabine integriert werden kann und daher die Entwicklung der integrierten Methodik in dieser Arbeit motiviert.

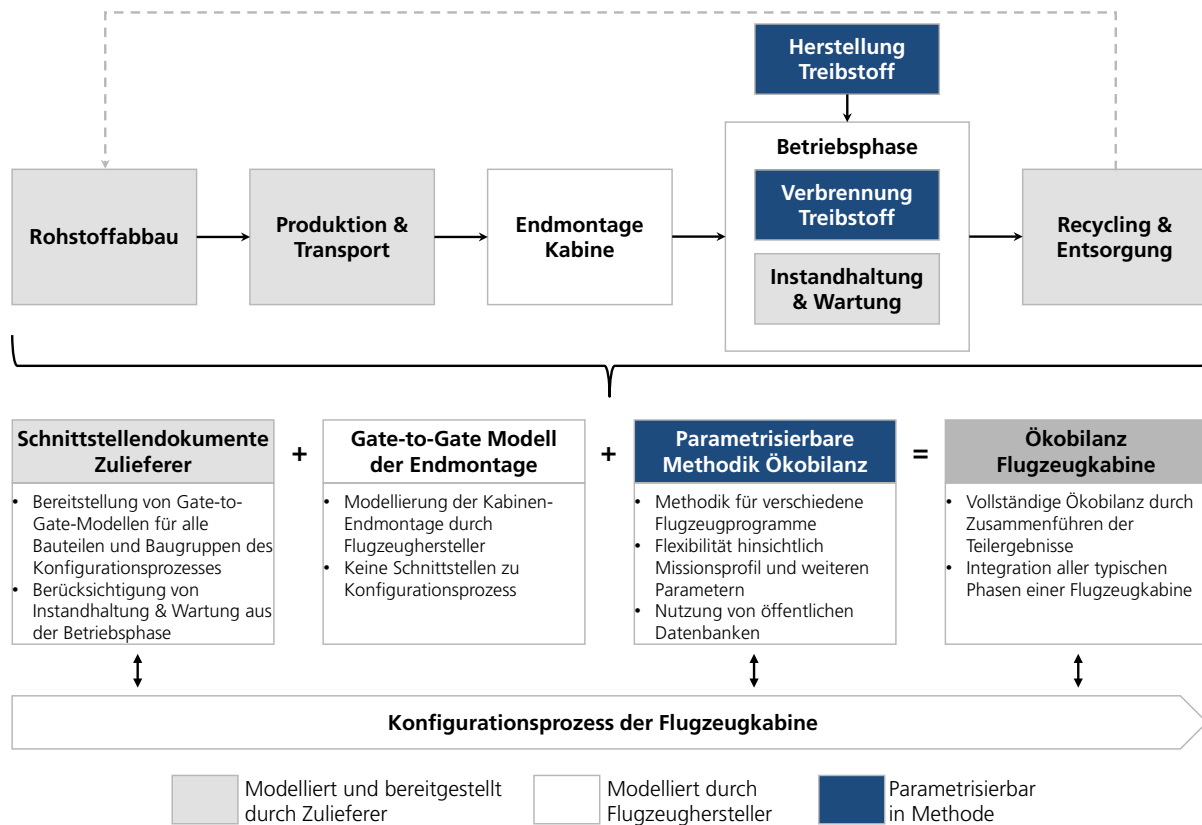


Abbildung 49: Konzeptioneller Rahmen der Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode

Ausgehend von dieser ersten Gliederung können entsprechend des methodischen Vorgehens für die detaillierte Entwicklung der Methodik drei Module definiert werden:

- 1) Verarbeitung Benutzereingaben und Vorbereitung Sachbilanz
- 2) Sachbilanz und Wirkungsabschätzung für Treibstoffherstellung und Verbrennung
- 3) Aggregation mit Zuliefererdaten und Endmontage sowie Auswertung

Die Module folgen einem sequenziellen Ablauf: Im ersten Modul der Methodik sind zunächst notwendige Grundlagen zur Aufstellung der Sachbilanz darzustellen. Hierzu gehören die Berechnung des Treibstoffverbrauchs auf Basis der Benutzereingaben sowie die Berechnung der durchschnittlichen Masse von Flugzeug und konfigurierter Kabine in **Modul eins** (Unterabschnitt 6.3.4). **Modul zwei** stellt auf Basis dieser vorbereitenden Berechnungen die Sachbilanz und Wirkungsabschätzung auf. Hierzu werden in den folgenden Abschnitten notwendige, öffentlich zugängliche Datenbanken eingeführt und entsprechend der Zielstellung eingesetzt (Unterabschnitt 6.3.5.). **Modul drei** fokussiert die Zusammenführung und Aggregation der Zuliefererdaten, sodass eine vollständige Ökobilanz inklusive aller Lebenszyklusphasen dargestellt werden kann (Unterabschnitt 6.3.6). Ferner wird aufgezeigt, wie die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse erfolgen können (Unterabschnitt 6.3.7). In Abbildung 50 werden die drei Module als Flussdiagramm dargestellt, zudem sind innerhalb der Module bereits erste Detaillierungen und übergreifende Informationsflüsse dargestellt. Die Methodik beginnt hierbei immer mit der Zielstellung die Umweltauswirkungen einer spezifischen Flugzeugkabine zu modellieren. Die dazu notwendigen Benutzereingaben sind im ersten Modul dargestellt und werden in den folgenden Abschnitten als Variablen innerhalb der Gleichungen berücksichtigt. In Modul zwei sind die notwendigen Berechnun-

gen sequenziell dargestellt. Je nach Zielstellung ist es so möglich verschiedene Kabinenkonfigurationen hinsichtlich der Umweltwirkungen zu vergleichen. Dies wird im Flussdiagramm durch einen möglichen Rückfluss dargestellt. Zur Sicherstellung der Vergleichbarkeit von Kabinen erfolgt der Wiedereinstieg bei der Kabinenkonfiguration.

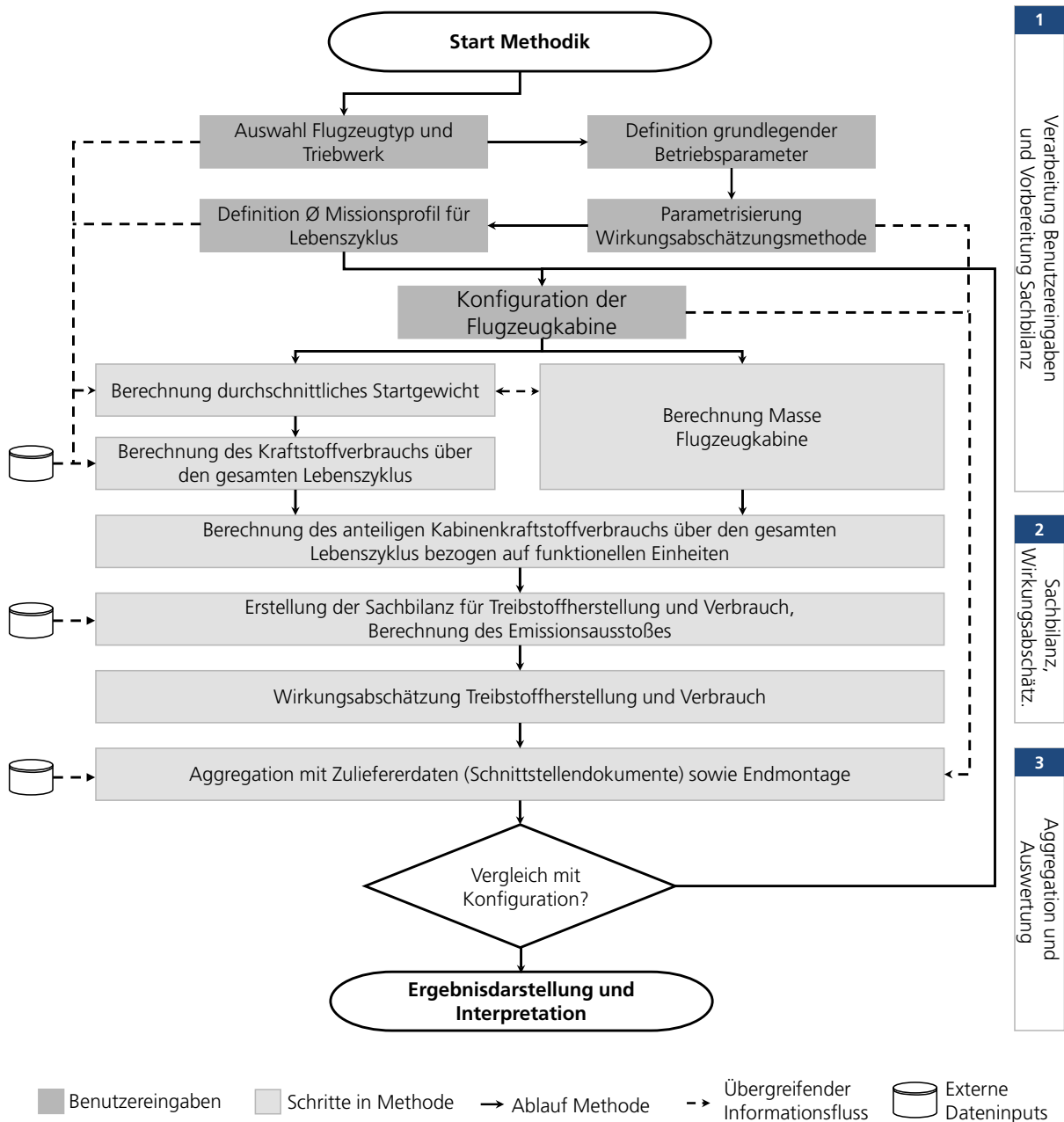


Abbildung 50: Flussdiagramm der entwickelten Methodik (angelehnt an Keiser et al. 2023a)

Im folgenden Unterabschnitt wird zunächst die Eingrenzung der Flugzeugkabine vorgenommen, ferner wird die in der Ökobilanz zu definierende funktionelle Einheiten dargestellt.

6.3.3 Ziel und Untersuchungsrahmen sowie Eingrenzung

Im ersten Schritt von Ökobilanzen sind entsprechend der Vorgehensweise das Ziel und der Untersuchungsrahmen zu klären (Unterabschnitt 3.1.2). Zudem können weitere Eingrenzungen vorgenommen werden. Im Rahmen der hier zu entwickelnden integrierten Methodik wird dieser Schritt einmalig durchgeführt. Demgegenüber stehen die folgenden Schritte der Methodik. Diese können, bedingt durch die Möglichkeit zur Parametrisierung, immer wieder durchgeführt werden.

Ziel der Methodik ist der Vergleich von Flugzeugkabinen sowie deren Teilkomponenten. Damit kann die Methodik den **konsequenzorientierten Ökobilanzen** zugeordnet werden (Unterabschnitt 3.2.2). Je nach Anwendung ist aber auch eine ausschließlich beschreibende Funktion möglich. Bedingt durch die hohe Komplexität von Flugzeugkabinen ist eine weitere Eingrenzung des Untersuchungsgegenstandes notwendig. Hierzu ist zunächst zu klären, auf welcher hierarchischen Ebene die Methodik anzusiedeln ist. Diese hierarchische Gliederung wurde in Abschnitt 2.4 bereits eingeführt und teilt Flugzeugtypen in vier Ebenen ein. Die hier zu entwickelnde integrierte Methodik fokussiert die **Ebene der Module und Submodule**. Motiviert wird dies durch den Konfigurationsprozess, die aufgestellten Anforderungen (beispielsweise Anforderung SB-A5) sowie die stark steigende Komplexität bei einem zunehmenden Detaillierungsgrad. Konkret wird die Flugzeugkabine mit den für das Layout sowie das Markenimage entscheidenden Elementen im Rahmen dieser Arbeit modelliert. Dies sind die Passagiersitze, Flugzeugtoiletten, Bordküchenmodule sowie die Bordküchenausstattung. Abschließend sei hier erneut auf die bereits aufgestellte Systemgrenze der Methodik hingewiesen. Die Methodik fokussiert den gesamten Lebenszyklus der Flugzeugkabine, wobei Teile des Lebenszyklus durch die Zulieferer modelliert werden und im Rahmen des hier vorgestellten Vorgehens eine Aggregation der Daten erfolgt. Nachstehende Tabelle fasst die beschriebene Eingrenzung zusammen.

Tabelle 18: Ziel und Untersuchungsrahmen sowie Eingrenzung der Methodik

Merkmal	Beschreibung	Verweis
Ziel	Ökobilanz von Flugzeugkabinen	Abschnitt 1.1 und 1.2
Untersuchungsrahmen	(Sub-)Modulebene der Flugzeugkabine	Abschnitt 2.4
Eingrenzung der Kabine	Betrachtet werden: <ul style="list-style-type: none"> • Passagiersitze • Flugzeugtoiletten • Bordküchenmodule • Bordküchenausstattung 	Unterabschnitt 2.6.1
Systemgrenzen	Gesamter Lebenszyklus Kabine und Treibstoffherstellung	Unterabschnitt 6.1

Aufbauend auf diesen Vorüberlegungen erfolgt in den nächsten Abschnitten die konkrete Entwicklung der Methodik.

6.3.4 Sachbilanz der Treibstoffproduktion und Verbrennung

Für die Aufstellung der Sachbilanz für die Treibstoffproduktion und Verbrennung sind zunächst verschiedene Berechnungen durchzuführen, vom Treibstoffverbrauch über den gesamten Lebenszyklus bis hin zum anteiligen Treibstoffverbrauch der Flugzeugkabine. Für die Berechnungen werden nachfolgend grundlegende Parameter und Zusammenhänge eingeführt.

Definition und Einführung grundlegender Parameter und Gleichungen. Zur Ermittlung der Sachbilanz eines Flugzeugs sowie dessen Kabine ist zunächst das spezifische Startgewicht zu ermitteln. Dieses unterscheidet sich je nach Missionsprofil stark, setzt sich jedoch immer aus folgenden Bestandteilen zusammen (DIN 9020 1983):

- Betriebsleergewicht Flugzeug (m_{OEW})
- Passagier- und Gepäckgewicht ($m_{PAX,total}$)
- Zuladung ($m_{payload}$)
- Gewicht Treibstoff inklusive „Taxi“-Treibstoff ($m_{fuel,total}$)
- Gewicht Reservetreibstoff ($m_{fuel,reserve}$)

Das Betriebsleergewicht (engl.: Operating Empty Weight) (m_{OEW}) ist für jede Flugzeugserie spezifisch und je nach Ausstattungsmerkmalen können Abweichungen innerhalb der Flugzeugprogramme möglich sein (Oehme 2017). Während der Anwendung der Methodik wird ein typisches m_{OEW} für einen A350-900 dargestellt (siehe Unterabschnitt 8.1.1). Für die Berechnung des gesamten Passagier- und Gepäckgewichts ($m_{PAX,total}$) sind zunächst weitere grundlegende Parameter einzuführen: Zum einen ist der sogenannte Beladungsfaktor (engl.: Loadfactor) (p_{pax}) zu berücksichtigen, welcher die durchschnittliche Passagierauslastung beschreibt. Die ICAO publiziert die globale Passagierauslastung monatlich, beispielsweise ergaben die Untersuchungen für den Mai 2022 einen Beladungsfaktor von 79,1 % (ICAO 2022). Zum anderen ist das spezifische Sitzlayout im Hinblick auf die Anzahl der gesamten Sitze (n_{seat}) zu integrieren. Die Anzahl der Sitze ist hierbei eine Nutzereingabe während des Konfigurationsprozesses und somit dynamisch. Als Referenz können jedoch öffentliche Angaben der Fluggesellschaften genommen werden. Beispielsweise sei hier ein typisches A350-900 Kabinenlayout genannt, welches insgesamt aus 293 Sitzen besteht (Deutsche Lufthansa AG 2022). Hieraus ergibt sich für die Anzahl der Passagiere (n_{PAX}) folgender Zusammenhang:

$$n_{PAX} = p_{pax} \cdot n_{seat} \quad (1)$$

Mit n_{PAX} erfolgt durch Multiplikation mit dem durchschnittlichen Passagiergewicht (m_{PAX}), welches das Gepäck inkludiert, als Produkt das gesamte Passagier- und Gepäckgewicht ($m_{PAX,total}$) wie in Gleichung zwei dargestellt. Als Referenz für m_{PAX} kann dabei 105 kg als durchschnittlicher Wert angenommen werden (Berdowski et al. 2009).

$$m_{PAX,total} = n_{PAX} \cdot m_{PAX} \quad (2)$$

Als individueller Parameter ist weiterhin die Zuladung (engl.: Payload) ($m_{payload}$) einzuführen. Dieser beschreibt die Masse von zugeladener Fracht. Zur Berechnung des spezifischen Startgewichts (ms_{TOW}) erfolgt die in Gleichung drei dargestellte Addition der Teilmassen. Neben den bereits eingeführten Zusammenhängen sind hierzu das Treibstoffgewicht ($m_{fuel,total}$) sowie das Gewicht des Reservetreibstoffes ($m_{fuel,reserve}$) zu berücksichtigen. Diese sind abhängig vom gewählten Missionsprofil und werden in nachfolgenden Abschnitt näher beschrieben.

$$m_{S_{TOW}} = m_{OEW} + m_{payload} + m_{PAX,total} + m_{fuel,total} + m_{fuel,reserve} \quad (3)$$

Zur Plausibilitätsprüfung von ms_{TOW} können die von den Flugzeugherstellern veröffentlichten maximalen Startmassen (m_{TOW}) herangezogen werden. Eine Überschreitung von m_{TOW} ist nicht zulässig.

Berechnung von Treibstoffverbrauch und Masse. Wie bereits eingeführt ist das Gewicht des Treibstoffs ($m_{fuel,total}$) abhängig vom jeweils gewählten Missionsprofil. Zur Berechnung des notwendigen Treibstoffs sind die in Unterabschnitt 3.2.4 eingeführten Phasen eines Fluges zu beachten. Die LTO ($m_{fuel,LTO}$) und CCD ($m_{fuel,CCD}$) Phasen sind somit gesondert zu beachten und abschließend zu addieren:

$$m_{fuel,total} = m_{fuel,LTO} + m_{fuel,CCD} \quad (4)$$

Für die Berechnung des Treibstoffgewichts für den Start- und Landezyklus ($m_{fuel,LTO}$) kann die Emissionsdatenbank für Flugzeugtriebwerke der ICAO (ICAO 2021) verwendet werden. Die Datenbank listet für alle gängigen Triebwerkstypen der zivilen Luftfahrt Verbrauchswerte auf und stellt eine anerkannte Datengrundlage dar (siehe Abschnitt 3.3). Zur Berechnung von $m_{fuel,LTO}$ sind neben den Verbrauchswerten auch zeitliche Annahmen zu treffen. Wie in Tabelle 19 dargestellt werden für das Rollen (t_{Idle}), Starten (t_{TO}), den Steigflug (t_{CO}) sowie den Anflug (t_{App}) üblicherweise folgende standardisierte Werte angenommen.

Tabelle 19: Angenommene Dauer innerhalb des LTO-Zyklus (Mensen 2013)

Rollen (t_{Idle})	Start (t_{TO})	Steigflug (t_{CO})	Anflug (t_{App})
26 min	0,7 min	2,2 min	4,0 min

Unter Verwendung der ICAO-Emissionsdatenbank kann mittels Gleichung fünf $m_{fuel,LTO}$ abschließend berechnet werden. Hierbei stellen ($ff_{Idle}, ff_{TO}, ff_{CO}, ff_{App}$) jeweils den Treibstoffverbrauch je Flugphase dar. Für zwei typische Triebwerkstypen sind in Anhang A.10.1 entsprechende Verbrauchswerte in Kilogramm pro Sekunde angegeben. Bei der Berechnung von $m_{fuel,LTO}$ ist die Anzahl der Triebwerke ($n_{Engines}$) zu berücksichtigen, da die Werte in der ICAO-Datenbank pro Triebwerk angegeben werden.

$$m_{fuel,LTO} = (t_{Idle} \cdot ff_{Idle} + t_{TO} \cdot ff_{TO} + t_{CO} \cdot ff_{CO} + t_{App} \cdot ff_{App}) \cdot n_{Engines} \quad (5)$$

Zur Berechnung des gesamten Treibstoffverbrauchs der LTO-Phase über den gesamten Lebenszyklus ($m_{fuel,LTO,Life}$) ist es zunächst notwendig die Anzahl der Flugstunden auf Basis der Anwendereingaben zu ermitteln. Die Flugstunden für Kurz-, Mittel- und Langstreckenflüge ($t_{Range,S,M,L}$) werden durch Multiplikation der gesamten Flugstunden (t_{Life}) mit den jeweils gewählten Anteilen an Kurz-, Mittel- und Langstreckenflügen ($p_{Range,S,M,L}$) ermittelt. Bei der Eingabe kann hier 1 nicht überschritten werden. Für t_{Life} kann als Referenz bei fehlender Datengrundlage ein Wert von 60 Tsd. Flugstunden angenommen werden (Pfungstl et al. 2022).

$$\mathbf{t}_{Range,S,M,L} = \mathbf{t}_{Life} \cdot \mathbf{P}_{Range,S,M,L} \quad (6)$$

Mittels $t_{Range,S,M,L}$ sowie der in Anhang A.10.2 dargestellten Gleichung zur Interpolation der Flugzeiten ($t_{inerpol,S,M,L}$) kann die Anzahl der Flugzyklen (n_{Zyklus}) berechnet werden:

$$\mathbf{n}_{Zyklus} = \frac{\mathbf{t}_{Range,S}}{\mathbf{t}_{inerpol}_S} + \frac{\mathbf{t}_{Range,M}}{\mathbf{t}_{inerpol}_M} + \frac{\mathbf{t}_{Range,L}}{\mathbf{t}_{inerpol}_L} \quad (7)$$

Hierauf folgend kann $m_{fuel,LTO,Life}$ mittels Multiplikation wie in Gleichung acht dargestellt berechnet werden:

$$\mathbf{m}_{fuel,LTO,Life} = \mathbf{m}_{fuel,LTO} \cdot \mathbf{n}_{Zyklus} \quad (8)$$

Bedingt durch die Freiheitsgrade bei der Eingabe der Flugstrecken ist für die Berechnung der Treibstoffmasse während der CCD-Phase eine Interpolation mit den in der EMEP-Datenbank verfügbaren Verbrauchswerten notwendig (European Environment Agency 2019). Für den Treibstoffverbrauch der CCD-Phase für Kurz-, Mittel und Langstreckenflüge ($m_{fuel,CCD,S,M,L}$) ergibt sich der in Gleichung neun dargestellte Zusammenhang. Je nach gewählter Flugstrecke ($l_{flug(S,M,L)}$) ist für $m_{fuel,CCD(1)}$ und $m_{fuel,CCD(2)}$ der nächstkleinere bzw. nächstgrößere Wert aus der EMEP-Datenbank zu entnehmen. Für $l_{flug(1)}$ und $l_{flug(2)}$ ist analog dazu vorzugehen. Die notwendigen Daten für zwei typische Verkehrsflugzeuge sind in Anhang A.10.2 zu finden.

$$\mathbf{m}_{fuel,CCD,S,M,L} = \mathbf{m}_{fuel,CCD(1)} + \frac{(\mathbf{m}_{fuel,CCD(2)} - \mathbf{m}_{fuel,CCD(1)})}{(l_{flug(2)} - l_{flug(1)})} \cdot (l_{flug(2)} - l_{flug(S,M,L)}) \quad (9)$$

Für die Berechnung von $m_{fuel,CCD,S,M,L}$ bezogen auf den gesamten Lebenszyklus eines Flugzeugs ($m_{fuel,CCD,Life}$) besteht eine Abhängigkeit vom Missionsprofil, welches durch die Anzahl an Kurz-, Mittel- und Langstreckenflügen charakterisiert ist. Die Teilsummen aus Gleichung sieben und neun beschreiben diese Abhängigkeit, sodass durch Multiplikation und Addition $m_{fuel,CCD,Life}$ abhängig vom Missionsprofil berechnet werden kann. $m_{FuelCCD,S,M,L}$ stellt hier den Treibstoffverbrauch für Kurz-, Mittel- und Langstreckenflüge dar, $n_{Life,S,M,L}$ die Anzahl der jeweiligen Flugzeugzyklen.

$$\mathbf{m}_{\text{fuel,CCD,Life}} = \mathbf{m}_{\text{FuelCCD,S}} \cdot \mathbf{n}_{\text{Life,S}} + \mathbf{m}_{\text{FuelCCD,M}} \cdot \mathbf{n}_{\text{Life,M}} + \mathbf{m}_{\text{FuelCCD,L}} \cdot \mathbf{n}_{\text{Life,L}} \quad (10)$$

Durch Addition von $m_{\text{fuel,LTO,Life}}$ und $m_{\text{fuel,CCD,Life}}$ lässt sich abschließend der gesamte Treibstoffverbrauch in kg für den Lebenszyklus ($m_{\text{fuel,Life}}$) mit Gleichung elf berechnen:

$$\mathbf{m}_{\text{fuel,Life}} = \mathbf{m}_{\text{fuel,LTO,Life}} + \mathbf{m}_{\text{fuel,CCD,Life}} \quad (11)$$

Ferner lässt sich der durchschnittlich benötigte Reservetreibstoff ($m_{\text{fuel,reserve}}$) für 30 Minuten berechnen. Dieser wird mittels $m_{\text{fuel,Life}}$ und der zugehörigen gesamten Flugzeit (t_{Life}) mit Gleichung zwölf berechnet (Mensen 2013):

$$\mathbf{m}_{\text{fuel,Reserve}} = \frac{\mathbf{m}_{\text{fuel,Life}}}{t_{\text{Life}}} \cdot 0,5 \text{ h} \quad (12)$$

Im Gegensatz zu $m_{\text{fuel,total}}$ wird $m_{\text{fuel,Reserve}}$ im Rahmen der Wirkungsabschätzung nicht berücksichtigt, da der Reservetreibstoff im regulären Betrieb nicht verwendet wird und dadurch keine Emissionen freisetzt. Dennoch ist $m_{\text{fuel,Reserve}}$ für die folgende Massebetrachtung notwendig, um so die Funktionelle Einheit 1 berechnen zu können. Für die weitere Berechnung wird zunächst jedoch die durchschnittliche Flugzeugmasse ($m_{\emptyset AC}$) mit Gleichung dreizehn berechnet.

$$\mathbf{m}_{\emptyset AC} = \mathbf{m}_{\text{OEW}} + \mathbf{m}_{\text{payload}} + \mathbf{m}_{\text{PAX,total}} + \frac{\mathbf{m}_{\text{fuel,total}}}{2} + \mathbf{m}_{\text{fuel,reserve}} \quad (13)$$

Dabei wird $m_{\emptyset AC}$ analog zur Berechnung von m_{STOW} berechnet. Bedingt durch den Treibstoffverbrauch während des Flugzeuges kann hier vereinfacht die eine Halbierung von $m_{\text{fuel,total}}$ angenommen werden.

Berechnung der Kabinenmasse. Die Berechnung der Kabinenmasse erfolgt auf Basis der vorgenommenen Kabinendefinition in Unterabschnitt 6.3.3. Die Kabinenkonfiguration wird vom Anwender der Methodik individuell gewählt und so kann die Gesamtmasse der Kabine (m_{cabin}) durch Addition der Teilmassen unter Berücksichtigung der jeweiligen Anzahl berechnet werden:

$$\mathbf{m}_{\text{Cabin}} = \mathbf{m}_{\text{Seats}} + \mathbf{m}_{\text{Lav}} + \mathbf{m}_{\text{Gall}} + \mathbf{m}_{\text{GallIn}} \quad (14)$$

Hierbei beschreibt m_{Seats} die Masse aus allen Sitzen, m_{Lav} die Masse aus allen im Layout enthaltenen Flugzeugtoiletten, m_{Gall} die Masse aus allen Bordküchenmodulen und abschließend m_{GallIn} die Gesamtmasse der ausgewählten Bordküchenausstattung.

Bezug des Treibstoffverbrauchs zu funktionellen Einheiten. Mit der berechneten Treibstoffmenge für den gesamten Lebenszyklus ($m_{\text{fuel,Life}}$) aus Gleichung elf sowie dem Verhältnis aus durchschnittlicher Flugzeugmasse ($m_{\emptyset AC}$) und der berechneten Kabinenmasse (m_{cabin}) erfolgt

die Allokation des Treibstoffverbrauchs anteilig zur konfigurierten Kabine. Gleichung 15 ermöglicht es somit den anteiligen Treibstoffverbrauch der Kabine ($m_{fuelLife,Cabin}$) zu berechnen.

$$\mathbf{m}_{fuelLife,Cabin} = \mathbf{m}_{fuel,Life} \cdot \frac{\mathbf{m}_{Cabin}}{\mathbf{m}_{\emptyset AC}} \quad (15)$$

Mit $m_{fuelLife,Kabine}$ kann die funktionelle Einheit *Umweltwirkungen Kabine für den gesamten Lebenszyklus* in der folgenden Wirkungsabschätzung bereits berechnet werden. Entsprechend der Anforderung (Unterabschnitt 5.2.2) die in der Luftfahrtindustrie übliche funktionelle Einheit *Pas-sagierkilometer* (PKM) zu berücksichtigen, ist eine abschließende Umrechnung von $m_{fuelLife,Kabine}$ mittels Gleichung 16 notwendig.

$$\mathbf{m}_{fuelPKM,Cabin} = \frac{\mathbf{m}_{fuelLife,Cabin}}{\mathbf{l}_{flight,total} \cdot \mathbf{n}_{PAX}} \quad (16)$$

Hierbei wird die Flugstrecke über den gesamten Lebenszyklus ($l_{flight,total}$) durch folgenden Zusammenhang ausgedrückt.

$$\mathbf{l}_{flight,total} = \mathbf{l}_{flug,S} \cdot \mathbf{n}_{Life,S} + \mathbf{l}_{flug,M} \cdot \mathbf{n}_{Life,M} + \mathbf{l}_{flug,L} \cdot \mathbf{n}_{Life,L} \quad (17)$$

Für den Anwender der Methodik besteht mit $l_{flug,S}$, $l_{flug,M}$, $l_{flug,L}$ die Möglichkeit die Länge von Kurz-, Mittel und Langstreckenflügen in Kilometern anzugeben. Dies ermöglicht eine direkte Berücksichtigung verschiedener Flugprofile der Fluggesellschaften.

Aufstellung der Sachbilanz: Berechnung der Emissionsoutputs. Zur Berechnung der ausgehenden Emissionen werden die berechneten Treibstoffverbräuche der Kabine für die weitere Aufstellung der Sachbilanz verwendet. Entsprechend des Vorgehens bei Ökobilanzierungen werden mittels der relevanten Emissionsfaktoren ($EF_{fuel(x)}$) die Emissionen ($m_{out(x)}$) berechnet, welche vom Treibstoff und Emissionsprodukt (x) abhängen (Graichen et al. 2010):

$$\mathbf{m}_{out(x)} = \mathbf{m}_{fuel} \cdot \mathbf{EF}_{fuel(x)} \quad (18)$$

Im Rahmen der hier entwickelten Methodik werden die Emissionen der Treibstoffverbrennung sowie Herstellung berücksichtigt. Die relevanten EF können aus den öffentlichen Daten des Umweltbundesamts (Graichen et al. 2010) sowie der bereits eingeführten ICAO-Datenbank verwendet werden (ICAO 2021). Wie in Tabelle 20 dargestellt werden für die bei der Treibstoffverbrennung entstehenden die Emissionen NO_x , HC und CO die Daten der ICAO verwendet. Dies bedingt sich durch die spezifische Darstellung der EF für verschiedene Triebwerkstypen.

Tabelle 20: Emissionsfaktoren für die Verbrennung von Kerosin während der LTO- und CCD-Phase (Graichen et al. 2010; International Civil Aviation Organization (ICAO) 2021)

	CO ₂	CH ₄	N ₂ O	SO ₂	H ₂ O	NO _x	HC	CO	NH ₃	NMVOG	TSP
EF-LTO [g/kg]	3160	0,13	0,09	0,2	1237	<i>Triebwerksspezifisch ICAO (Anhang A.10.1)</i>			0,172	0,9	0,09
EF-CCD [g/kg]	3150	0	0,1	0,2	1237	16,5	1,0	13,5	0,172	13,5	0,2

Zusätzlich zu den Emissionen, welche durch die Verbrennung des Treibstoffs entstehen, werden die Emissionen der Treibstoffherstellung berücksichtigt (Unterabschnitt 6.3.2). Hierfür sind EF für die Treibstoffherstellung notwendig. Tabelle 21 zeigt die verwendeten EF sowie die dazu verwendeten Quellen. Verwendet wurden Daten der Europäischen Union (European Commission 2018) sowie des Nationalen Laboratoriums für Energietechnologie in den USA (National Energy Technology Laboratory (NETL) 2005).

Tabelle 21: Emissionsfaktoren für die Herstellung von Kerosin (European Commission 2018; National Energy Technology Laboratory (NETL) 2005)

	CO ₂	CH ₄	SO ₂	NH ₃	Rohöl	Gas
Kerosin [g/kg]	239	0,293	0,319	0,0026	1.110	57,9

Das Ergebnis der Sachbilanz für die Treibstoffherstellung und Verbrennung ($m_{\text{out,fueltotal}(x)}$) kann durch Summierung aller Emissionen abschließend berechnet werden.

$$\mathbf{m}_{\text{out,fueltotal}(x)} = \mathbf{m}_{\text{out,burn}(x)} + \mathbf{m}_{\text{out,production}(x)} \quad (19)$$

Das Ergebnis der Sachbilanz wird im folgenden Schritt für die Wirkungsabschätzung verwendet.

6.3.5 Wirkungsabschätzung Treibstoffproduktion und -herstellung

Nachdem die Sachbilanz aufgestellt wurde, kann die Wirkungsabschätzung für die Treibstoffproduktion sowie -herstellung erfolgen. Hierzu werden der in Unterabschnitt 6.2.4 bereits definierte Standard zur Wirkungsabschätzung auf Basis der ReCiPe-Methode verwendet. Dies ist notwendig, um im folgenden Schritt die Aggregation mit den Ergebnissen der Zulieferer (Schnittstellendokumente) zu ermöglichen.

Ergänzend sei auf die Möglichkeit zur Berücksichtigung der höhenabhängigen Wirkung auf Basis der von Schwartz und Kroo entwickelten Methode hingewiesen (Schwartz und Kroo 2009). Die Umweltwirkung von durch die Luftfahrtindustrie verursachte Bewölkung (engl.: Aviation-Induced Cloudiness, kurz: AIC) sowie von Stickoxiden hängt von atmosphärischen Bedingungen wie Luftdruck, Temperatur und Feuchtigkeit ab. Da diese atmosphärischen Bedingungen von der Höhe abhängen, ist die Umweltwirkung eines Flugzeuges höhenabhängig zu modellieren. Ausgehend

von der Anforderung nach einer modularen Methodik (Unterabschnitt 5.2.2) kann die höhenabhängige Wirkung optional integriert werden. Dies wird von verschiedenen Autoren mit der von Schwartz entwickelten Methode umgesetzt (Johanning 2017; Koch et al. 2011). In Anhang A.10.3 finden sich dazu weitere Ausführungen in Form der Berechnungsgrundlagen.

Berechnung der Midpoint Indikatoren. Die Berechnung der Midpoint Indikatoren (in Gleichungen als MP abgekürzt) stellt den ersten Schritt der Wirkungsabschätzung dar. Hierfür werden notwendige Charakterisierungsfaktoren (CF) betrachtet. Diese dienen der Umrechnung einer Substanz in die Wirkungsindikatoren der ReCiPe-Methode. Die hier notwendigen Charakterisierungsfaktoren wurden entsprechend der Substanzen aus der ReCiPe-Methode (National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health 2017a) entnommen und sind in Anhang A.10.4 dokumentiert. Mittels der CF der Substanzen ($CF_{(x,PW)}$) kann für jeden Midpoint Indikator ($MP_{i,Fuel(x,PW)}$) die Umweltwirkung mit Gleichung 20 berechnet werden. Hierfür werden alle einer Midpoint Kategorie zugeordneten Substanzen mit dem zugehörigen CF der gewählten Perspektive zur Wirkungsabschätzung (PW) auf den gemeinsamen Wirkungsindikator bezogen (beispielsweise CO_2 -äquivalente Masse für die Kategorie Klimawandel).

$$MP_{i,Fuel(x,PW)} = \sum_{x=1}^n m_{out,total(x)} \cdot CF_{(x,PW)} \quad (20)$$

Berechnung der Endpoint Indikatoren und des Single Scores. Nachdem die Midpoint Indikatoren berechnet wurden, lassen sich die Endpoint Indikatoren ($EP_{(j,PW)}$) mit Gleichung 21 berechnen. Zur Berechnung werden alle MP für PW, welche auf den entsprechenden Endpoint Indikator wirken, mit den Mid-to-Endpoint Faktoren ($MTE_{(j,PW)}$) auf die drei Endpoints bezogen. Die hierzu notwendigen Mid-to-Endpoint Faktoren gliedern sich nach den Endpoint Indikatoren *Menschliche Gesundheit*, *Ökosystem* sowie *Ressourcenverbrauch* und sind in Anhang A.10.5 aufgelistet. Entnommen wurden diese der ReCiPe-Methode (National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health 2017b).

$$EP_{(j,PW)} = \sum_{i=1}^{18} MP_{(i)} \cdot MTE_{(j,PW)} \quad (21)$$

Um die EP miteinander vergleichen zu können, erfolgt durch die Normalisierung und Gewichtung die Bezugnahme auf dieselbe Einheit in einem Single Score (Unterabschnitt 3.1.2). Der Single Score ($S_{Fuel(j,WT,PW)}$), welcher durch die Gewichtungsfaktoren ($W_{(j,WT)}$) und Normalisierungsfaktoren ($NF_{(j,WT)}$) berechnet wird, dient als Bezugsgröße zur Bestimmung des jeweiligen Anteils der einzelnen Mid- und Endpoint Kategorien an der gesamten Umweltwirkung. Dabei ist $W_{(j,WT)}$ abhängig von der gewählten Gewichtungsperspektive (WT), welche gemäß der Empfehlung des RVM standardmäßig auf den Parameter „Average“ gesetzt wird und bereits in Unterabschnitt 6.2.4 definiert wurde. Anhang A.10.6 listet alle notwendigen Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren für Gleichung 22 auf.

$$S_{\text{Fuel}(j,WT,PW)} = \sum_{i=1}^{18} \frac{EP_{(i)} \cdot W_{(j,WT)}}{NF_{(j,PW)}} \quad (22)$$

6.3.6 Aggregation mit Zuliefererdaten und Endmontage

Nachdem für die Treibstoffherstellung sowie den Verbrauch innerhalb der Betriebsphase entsprechend der Anforderung nach einer parametrisierbaren Methodik notwendige Zusammenhänge entwickelt wurden, erfolgt abschließend die Aggregation mit den Schnittstellendokumenten der Zulieferer. Wie im entwickelten Prozessmodell dargestellt werden die Aufstellung der Sachbilanz sowie die Wirkungsabschätzung durch die Zulieferer auf Basis von gegebenen Standards durchgeführt. Entsprechend sind im Gegensatz zur Ermittlung von Treibstoffherstellung und -verbrauch im Rahmen dieser Arbeit keine weiteren allgemeingültigen Detaillierungen¹⁰ für diese Phasen notwendig. Je nach ausgewählter Kabinenkonfiguration ist für die Aufstellung der gesamten Ökobilanz somit ausschließlich die Addition der Midpoint Indikatoren, Endpoint Indikatoren sowie der Single Scores notwendig.

Bei der funktionellen Einheit *Passagierkilometer* ist hierzu zunächst das Verhältnis der gesamten Flugstunden (t_{Life}) zur Lebensdauer der Kabinenmodule ($t_{\text{Subassembly}}$) notwendig. Mit Gleichung 23 kann so der Faktor ($MF_{\text{Subassembly}}$) berechnet werden.

$$MF_{\text{Subassembly}} = \frac{t_{\text{Life}}}{t_{\text{Subassembly}}} \quad (23)$$

Hiermit kann für alle Kabinenmodule für die Lebensphasen *Rohstoffgewinnung, Produktion und Transport, Instandhaltung* sowie *Entsorgung und Recycling* die Normierung auf die funktionelle Einheit PKM erfolgen ($Subassembly_{PKM,Cabin}$):

$$Subassembly_{PKM,Cabin} = \frac{MP_{i,Phasen(x,PW)} \cdot MF_{\text{Subassembly}}}{I_{\text{flight,total}} \cdot n_{\text{PAX}}} \quad (24)$$

Abschließend können alle Midpoint Indikatoren entlang aller Phasen addiert werden. Für jeden Midpoint Indikator ergeben sich somit die Umweltwirkungen entlang des gesamten Lebenszyklus ($MP_{i,total(x,PW)}$). Hierbei stellt $MP_{i,Rohstoff(x,PW)}$ die Umweltwirkungen des Rohstoffabbaus, $MP_{i,Produktion(x,PW)}$ die der Produktion, $MP_{i,Endmontage(x,PW)}$ die der Endmontage, $MP_{i,Instandhaltung(x,PW)}$ die der Instandhaltung, $MP_{i,Fuel(x,PW)}$ die Umweltwirkungen des durch die Methodik berechnete Ergebnisses für Treibstoffherstellung sowie -verbrennung und $MP_{i,Recycling(x,PW)}$ die des Ergebnisses für die Phase Recycling und Entsorgung in Gleichung 25 dar.

¹⁰ Im Rahmen der Anwendung der Methodik in Abschnitt 8.1 dieser Arbeit werden für alle Kabinenmodule exemplarische Sachbilanzen aufgestellt und eine Wirkungsabschätzung durchgeführt.

$$\begin{aligned} \mathbf{MP}_{i,\text{total}(x,PW)} = & \\ \mathbf{MP}_{i,\text{Rohstoff}(x,PW)} + \mathbf{MP}_{i,\text{Produktion}(x,PW)} + \mathbf{MP}_{i,\text{Endmontage}(x,PW)} + \mathbf{MP}_{i,\text{Instandhaltung}(x,PW)} & \quad (25) \\ + \mathbf{MP}_{i,\text{Fuel}(x,PW)} + \mathbf{MP}_{i,\text{Recycling}(x,PW)} & \end{aligned}$$

Analog dazu können die Endpoint Indikatoren sowie der Single Score durch einfache Addition der Lebensphasen berechnet und je nach Ziel der Auswertung und Darstellung ausgewiesen werden.

6.3.7 Auswertung und Interpretation

Der letzte Schritt der entwickelten Methodik folgt dem typischen Vorgehen von Ökobilanzen und fokussiert die Auswertung sowie die Interpretation der Ergebnisse. Für die Auswertung der Ergebnisse stehen dem Anwender zunächst die zwei funktionellen Einheiten zur Verfügung. Zudem lässt die Methode klassische Analysen von Ökobilanzen zu. Zu nennen sind hier unter anderem die Beitragsanalyse der Lebenszyklusphasen sowie der Anteil einzelner Indikatoren am Single Score. Denkbar sind ferner Analysen einzelner Module im Kontext der Gesamtkabine, um so Schwerpunkte bei den Verursachern der Umweltwirkungen zu identifizieren.

Bedingt durch die Anwendung der Methodik in Abschnitt 8.1 wird hier nicht näher auf die Möglichkeiten zur Auswertung eingegangen, da die Anwendung der Methode verschiedene Möglichkeiten zur Auswertung und Interpretation darstellt.

6.3.8 Zwischenfazit und Diskussion

Dieser Abschnitt fokussierte die Entwicklung des zweiten Artefakts im Rahmen dieser Arbeit. Grundlage der Entwicklung waren die ermittelten und vorgestellten Anforderungen für die Synthese (Unterabschnitt 5.2.2). Bedingt durch diese Anforderungen folgte die Entwicklung der Methodik dem typischen Vorgehen von Ökobilanzen und ist damit konform mit der ISO-Normenreihe 14040/14044. Zunächst wurde die Methodik jedoch anhand des konzeptionellen Rahmens dieser Arbeit sowie dem vorgestellten Lebenszyklus von Flugzeugkabinen konzeptioniert. Darauf aufbauend wurden eine Eingrenzung der Flugzeugkabine vorgenommen und der Untersuchungsrahmen weiter präzisiert. Im Ergebnis besteht die Methodik aus drei Modulen: Erstens werden notwendige Benutzereingaben zur Parametrisierung der Methodik verarbeitet, sodass die Sachbilanz vorbereitet werden kann. Dies bedingt unter anderem die Eingabe von typischen Betriebsfaktoren (z. B. Passagierauslastungsfaktor der Kabine) in der Luftfahrtindustrie. Darauf aufbauend folgt in Modul zwei die Aufstellung der eigentlichen Sachbilanz und Wirkungsabschätzung für die Treibstoffherstellung und dessen Verbrennung. Hierzu sind notwendige Datenquellen und Interpolationen mittels Gleichungen beschrieben worden. Das abschließende dritte Modul adressiert die Aggregation der Ergebnisse aus Modul zwei mit den Zuliefererdaten, sodass eine vollständige Beschreibung des Lebenszyklus ermöglicht wird. Abschließend werden die Möglichkeiten zur Auswertung beschrieben. Diese drei Module stellen die entwickelte Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode dar und ermöglichen mit den gegebenen Freiheitsgraden eine Parametrisierung der Betriebsphase. Dieser Abschnitt adressiert und beantwortet somit die zweite Forschungsfrage dieser Arbeit.

Die Entwicklung der Methodik zeigt den großen Bedarf an Daten, der sich durch die Spezifika der Betriebsphase innerhalb des Lebenszyklus von Flugzeugkabinen bedingt. Zudem werden die typischen Herausforderungen von Ökobilanzen deutlich: Mit zunehmender Detailtiefe steigen die Aufwände für die Modellierung sowie die Datensammlung stark an und es sind Experten aus der Industriebranche für die Modellierung notwendig. Dennoch ist das entwickelte Vorgehen für den Endnutzer einfach zu bedienen, da ausschließlich Kernparameter definiert werden müssen.

6.4 Synthese im Konfigurationsprozess mittels Phasenmodell

Dieser Abschnitt stellt die Entwicklung des Phasenmodells zur Synthese und Integration in den Konfigurationsprozess vor. Das Phasenmodell ist als integrierendes Element zu verstehen und dient damit zur Implementierung der bereits entwickelten Artefakte sowie der softwaretechnischen Umsetzung.

6.4.1 Methodisches Vorgehen

Die Entwicklung des Phasenmodells lehnt sich methodisch an das bereits vorgestellte und erfolgreich angewendete Vorgehensmodell für die Neugestaltung von Geschäftsprozessen in Unterabschnitt 6.2.1 an. Für das im Vorgehen beschriebene notwendige Geschäftsprozessverständnis sowie die Identifikation der relevanten Parameter werden für die folgende Konzeption sowohl der dargestellte Stand der Technik (Abschnitt 2.6) als auch das gesammelte Expertenwissen des Autors aus verschiedenen Industrie- und Forschungsprojekten verwendet. Ferner dienen die bereits entwickelten Artefakte als Ausgangspunkt für die Konzeption. Die Darstellung bzw. Modellierung des Phasenmodells folgt der Darstellungsform eines Referenzprozesses, sodass die Übertragbarkeit gegeben ist. Zudem folgt die Entwicklung konzeptionell der Annahme eines projektähnlichen Charakters des Konfigurationsprozesses.

6.4.2 Konzeption des Phasenmodells

Für die übergeordnete Konzeption des Phasenmodells können zunächst die aufgestellten Anforderungen sowie identifizierten Herausforderungen aus Unterabschnitt 5.2.3 herangezogen werden. Die Anforderungen zeigen übergeordnet eine starke Anwendungs- und Kundenorientierung (Anforderungen PH-A1 sowie PH-A6) und ferner eine Fokussierung auf Daten sowie der Visualisierung ebendieser (Anforderungen PH-A2, PH-A3 sowie PH-A8). Ausgehend von diesen Anforderungen gliedert sich das Phasenmodell in drei Phasen innerhalb des Konfigurationsprozesses der Kabine:

- 1)** Vorbereitung und Initiierung
- 2)** Durchführung
- 3)** Abschluss

Wie in Abbildung 51 dargestellt können die drei Schritte des Phasenmodells im Konfigurations- und Individualisierungsprozess verortet werden. Zudem lassen sich die drei in dieser Arbeit entwickelten Artefakte den Schritten zuordnen. Im ersten Schritt ist unterstützend das Prozessmodell für die Integration der Zulieferdaten notwendig, da dieses die Datengrundlage für die Durchführung in Schritt zwei bildet. Innerhalb dieses Schrittes werden sowohl die entwickelte parametrisierbare Methodik als auch die softwaretechnische Umsetzung angewendet.

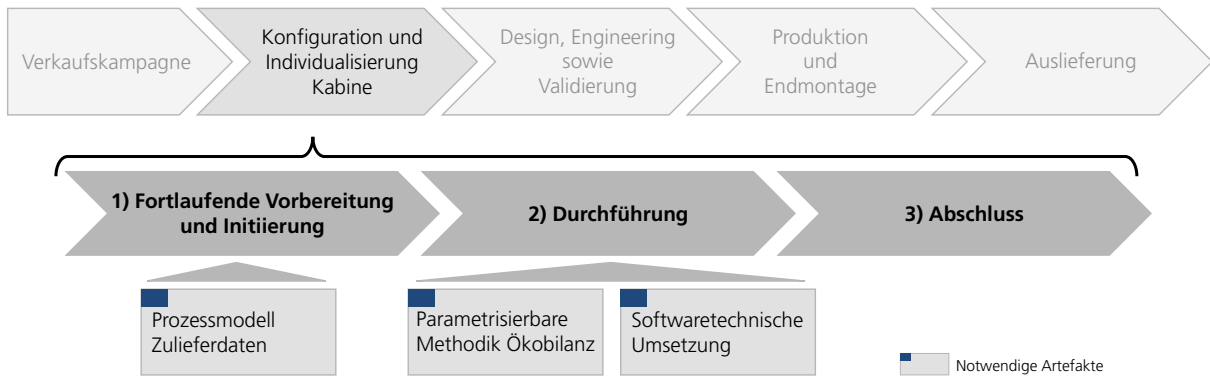


Abbildung 51: Konzeption des Phasenmodells zur Integration in den Konfigurationsprozess

Die weitere Detaillierung und Beschreibung der drei definierten Phasen sowie deren Ziele erfolgt in den folgenden Abschnitten. Hierbei wird eine Unterscheidung der involvierten Stakeholder getroffen.

6.4.3 Fortlaufende Vorbereitung und Initiierung

In dieser ersten Phase erfolgen vorbereitenden Maßnahmen für die Konfiguration und Individualisierung der Kabine. Hierbei ist eine fortlaufende Vorbereitung durch das entwickelte Prozessmodell dieser Arbeit gegeben. Dieses ist den Stakeholdern Flugzeughersteller sowie den direkten Zulieferern zuzuordnen und garantiert die Verfügbarkeit einer ausreichenden Datenbasis in Form der Schnittstellendokumente der Zulieferer. Für den Flugzeughersteller besteht in diesem Schritt jedoch trotzdem die Notwendigkeit zur Prüfung der Daten und ferner der Ökobilanzmethode. Die Ökobilanzmethoden und insbesondere die Wirkungsabschätzungsmethoden unterlagen in der Vergangenheit immer wieder Anpassungen und Änderungen (siehe Unterabschnitt 3.1.3). Zur Gewährleistung der Anwendung nach dem letzten Stand der Forschung ist somit eine fortlaufende Überprüfung der Methodik notwendig.

Neben dieser fortlaufenden Vorbereitung im Zuge dieses ersten Schrittes des Phasenmodells werden konkrete Inhalte jeweils nach der Entscheidung einer Fluggesellschaft für einen Flugzeughersteller sowie Flugzeugtyp adressiert. Der Konfigurationsprozess ist hierbei als projektähnliche Umgebung zu betrachten und beginnt üblicherweise mit einem Kick-Off (Oehme 2017). Vorbereitend ist hierzu auf Seiten des Flugzeugherstellers ein Konfigurationsteam zusammenzustellen. Bedingt durch die neue Möglichkeit zur ökologischen Bewertung der Flugzeugkabine empfiehlt es sich trotz der vereinfachten Methode einen Experten für Ökobilanzen in das Team zu integrieren. So besteht die Möglichkeit schnell auf Unklarheiten oder offene Fragen in Bezug auf die Ökobilanzmethode im Allgemeinen aber auch im Speziellen bei der Anwendung auf die Flugzeugkabine einzugehen. Zudem ist die notwendige Software vorab zu testen. Auf Seiten der Fluggesellschaften empfiehlt sich eine detailliertere Analyse des Streckennetzes sowie der Passagierbedarfe. Diese Analysen können bei der Sammlung der notwendigen Informationen und Daten im Hinblick auf die Anwendung der Ökobilanzmethode unterstützen und schärfen ferner den strategischen Charakter des Konfigurationsprozesses (Unterabschnitt 2.6.1). Auf ebendieser strategischen Ebene kann zudem eine Verortung in ein *Zielkonflikt-Dreieck der Flugzeugkabine unterstützen*, wie dies

in Abbildung 52 dargestellt ist. Dieses lässt sich mit den drei Dimensionen *Passagierkomfort*, *ökologische Nachhaltigkeit* sowie *wirtschaftliche Effizienz der Kabine* aufspannen. Beispielhaft wurden hier qualitativ ein LCC und FSC eingetragen und es zeigen sich bereits erste Zielkonflikte. Bei einem typischen FSC ist die Flugzeugkabine auf Komfort ausgelegt und somit wird eine Bestuhlung gewählt, welche bei der Ökobilanz relativ gesehen schlechter abschneidet. Dieses Werkzeug unterstützt den Flugzeughersteller somit bei der strategischen Verortung.

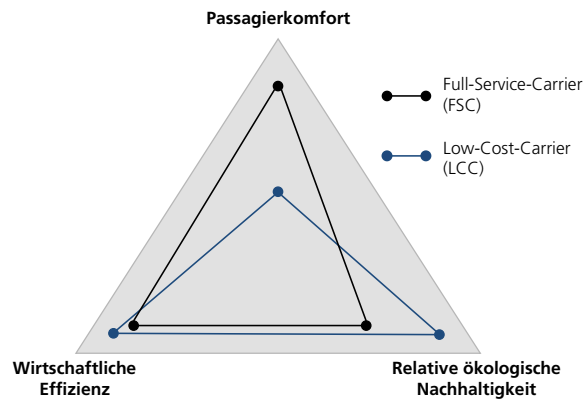


Abbildung 52: Zielkonflikt-Dreieck der Flugzeugkabine. Idealierte Verortung von FSC und LCC

Die Ziele dieses ersten Schrittes im Phasenmodell sind erstens die Sicherstellung der Verfügbarkeit aller notwendiger Daten, zweitens eine klare Definition und Schärfung der strategischen Perspektive aufseiten der Flugzeughersteller sowie drittens die Sicherstellung verfügbarer Kompetenzen innerhalb der Konfigurationsteams. In Tabelle 22 ist der erste Schritt abschließend zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 22: Schritt I des Phasenmodells – Fortlaufende Vorbereitung und Initiierung

Inhalte je Stakeholder		
Flugzeughersteller	Fluggesellschaft	Direkte Zulieferer
<ul style="list-style-type: none"> • Fortlaufende Prüfung der Datenverfügbarkeit (Schnittstellendokumente der Zulieferer) • Fortlaufende Prüfung der Ökobilanzmethode • Vorbereitung des Konfigurationsteams sowie Integration von notwendigen Experten • Vorbereitung der Applikation und Tests • Bereitstellung von Listen notwendiger Daten für Anwendung der Ökobilanzmethode 	<ul style="list-style-type: none"> • Detailanalyse des Streckennetzes sowie der Passagierbedarfe • Vorbereitung und Sammlung notwendiger Daten zur Parametrisierung der integrierten Methodik • Definition und Abgleich der Strategie mit Auswirkungen auf Kabine 	<ul style="list-style-type: none"> • Bereitstellung der notwendigen Schnittstellendokumente
Ziele		
<ul style="list-style-type: none"> • Verfügbarkeit aller notwendiger Daten sichergestellt • Strategische Perspektive auf Flugzeugkabine klar definiert • Notwendiges Konfigurationsteams sowie Experten verfügbar 		

6.4.4 Durchführung

Nachdem der erste Schritt abgeschlossen ist und alle Grundlagen für die Durchführung gelegt wurden, beginnt mit Schritt zwei die eigentliche Anwendung der integrierten Methodik und die mittels des Prozessmodells gesammelten Daten finden Verwendung innerhalb der Ökobilanz. Fokussiert wird in diesem Schritt die Konfiguration der Flugzeugkabine bis hin zur HOV (Unterabschnitt 2.6.2). Der Fokus des Flugzeugherstellers liegt in dieser Phase auf einer unterstützenden und beratenden Funktion. Die Fluggesellschaft konfiguriert mit dieser Unterstützung zunächst verschiedene Kabinenlayouts. Darauffolgend kann die Ökobilanzmethode wie in Unterabschnitt 6.3.4 dargestellt parametrisiert werden und es werden verschiedenen Kabinenlayouts hinsichtlich der Ökobilanzergebnisse miteinander verglichen. Zudem können Detailanalysen durchgeführt werden. Beispielsweise können einzelne Kabinenmodule ausgetauscht und deren jeweilige Auswirkungen auf die Ökobilanz direkt dargestellt werden. Als Teil des dieses Schrittes können verfügbare Ressourcen wie das CDC der Flugzeughersteller verwendet werden. Zudem ist eine IT-Unterstützung vorgesehen. Die konkrete Ausgestaltung einer derartigen softwaretechnischen Unterstützung stellt das vierte Artefakt dieser Arbeit dar und wird in Kapitel 7 vorgestellt. Begleitend können zudem Standards und Richtlinien sowie die technische Machbarkeit überprüft werden. Nachstehende Tabelle 23 fasst die Inhalte der Durchführung zusammen.

Tabelle 23: Schritt II des Phasenmodells – Durchführung

Inhalte je Stakeholder		
<i>Flugzeughersteller</i>	<i>Fluggesellschaft</i>	<i>Direkte Zulieferer</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Begleitende Unterstützung und Beratung bei der Konfiguration durch Konfigurationsteam • Abgleich mit Standards und Richtlinien • Identifikation möglicher Bedarfe für spezielle Design- und Engineering-Lösungen 	<ul style="list-style-type: none"> • Konfiguration verschiedener Kabinenlayouts • Parametrisierung der Methodik • Vergleich verschiedener Layouts hinsichtlich der Ökobilanz • Durchführung von Änderungen in Flugzeugkabine und Analyse Auswirkungen auf Ökobilanz 	
Ziele		
<ul style="list-style-type: none"> • Konfiguration von Kabinenlayouts • Vergleich hinsichtlich der Ökobilanz 		

Im Ergebnis stehen am Ende der Durchführung die verschiedenen Kabinenlayouts sowie deren Ökobilanzen zur Verfügung. Zudem wurde ein Vergleich der Kabinen durchgeführt. Diese Ergebnisse bilden die Basis für Schritt drei, den Abschluss des Konfigurationsprozesses.

6.4.5 Abschluss

Im letzten Schritt des Konfigurationsprozesses erfolgt dessen Abschluss. Wie in Tabelle 24 dargestellt sind sowohl eine Entscheidung für eine Kabinenkonfiguration zu treffen als auch SFE- und BFE-Module zu definieren. Diese Entscheidungen sind auf Basis der strategischen Ausrichtung der Fluggesellschaft zu treffen, entsprechend können die Ergebnisse aus Schritt eins des Phasenmodells Verwendung finden. Der Flugzeughersteller fokussiert in dieser Phase die Dokumentation des Konfigurationsprozesses und die Vorbereitung der folgenden Schritte im FCO-Prozess des Flugzeugs. Ferner ist die Integration von Rückkopplungsschleifen in das Design und die Entwicklung der Kabinen und deren Module in diesem Schritt vorgesehen (Anforderung PH-A7). Durch die Integration der aktuellen Kundenwünsche kann der Flugzeughersteller so frühzeitig Trends erkennen und diese in Form von neuen Entwicklungsprojekten operationalisieren. Abschließend sei auf den Zulieferer hingewiesen: Je nach Einkaufsstrategie der Fluggesellschaften werden parallele Geschäftsprozesse zur Beschaffung von BFE-Kabinenmodulen angestoßen. Zudem können kundenspezifische Anforderungen zu weiteren Aufwendungen bei den direkten Zulieferern führen. Bedingt durch den Fokus dieser Arbeit werden diese jedoch nicht näher detailliert.

Als Ergebnis dieses Schrittes sind eine HOV von der Fluggesellschaft ausgewählt und alle notwendigen Maßnahmen für den weiteren Ablauf des FCO-Prozesses definiert. Damit ist das dreigliedrige Phasenmodell zunächst hinreichend beschrieben. Die Evaluation ebendieses Modell folgt in Unterabschnitt 8.2.1 dieser Arbeit.

Tabelle 24: Schritt III des Phasenmodells – Abschluss

Inhalte je Stakeholder		
<i>Flugzeughersteller</i>	<i>Fluggesellschaft</i>	<i>Direkte Zulieferer</i>
<ul style="list-style-type: none"> • Dokumentation des gesamten Konfigurationsprozesses • Ableitung möglicher Erkenntnisse für Produktverbesserungen (Entwicklung) • Vorbereitung sowie Übergabe für weitere Schritte in FCO-Prozess 	<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidung für eine Kabinenkonfiguration • Entscheidung für SFE- und BFE-Module der Kabine 	<ul style="list-style-type: none"> • Direkter Kontakt zu Fluggesellschaften im Falle von BFE (neuer Geschäftsprozess) sowie bei kundenspezifischen Entwicklungen
Ziele		
<ul style="list-style-type: none"> • Entscheidung für eine Kabinenkonfiguration (HOV) • Maßnahmen für weitere notwendige Klärungsbedarfe definiert 		

6.4.6 Zwischenfazit und Diskussion

In diesem Abschnitt wurde das zu integrierende Phasenmodell dieser Arbeit entwickelt. Die Konzeption dieses Phasenmodells basiert auf dem Geschäftsprozessverständnis und integriert die Erkenntnisse aus dem Stand der Forschung. Das Phasenmodell setzt entsprechend auf dem etablierten FCO-Prozess in der Luftfahrtindustrie auf und fokussiert insbesondere die Interaktion der Akteure entlang dieses Prozesses. Innerhalb der drei Phasen (1) fortlaufende Vorbereitung und Initiierung, (2) Durchführung sowie (3) Abschluss werden die notwendigen Inhalte des Flugzeugherstellers, der Flugzeuggesellschaft sowie der direkten Zulieferer dargestellt. Das Phasenmodell stellt hierbei die Notwendigkeit für eine hinreichende Datenbasis heraus und adressiert diese Herausforderung in der ersten Phase des Phasenmodells. Am Ende von Phase zwei sind mittels dieser Datenbasis verschiedene Kabinenkonfiguration und Layouts inklusive deren entsprechenden Ökobilanzergebnissen verfügbar. Abschließend können diese in der dritten Phase zur Entscheidungsfindung Verwendung finden. Im Ergebnis ist so eine HOV unter Berücksichtigung der erstellten Ökobilanz ausgewählt und die folgenden Schritte des FCO-Prozess werden gestartet.

Das Phasenmodell adressiert somit insbesondere den anwendungsorientierten Charakter dieser Arbeit und unterstützt die Implementierung der entwickelten Artefakte in den Konfigurationsprozess der Flugzeugkabine. Die weitere Detaillierung des Phasenmodells und die Anpassung auf spezifische Kontexte der Flugzeughersteller erscheint in der Praxis notwendig, mit dem Ziel der Übertragbarkeit des Phasenmodells ist dieses im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit jedoch als idealtypisch zu betrachten. Ferner ist eine weitere Diskussion der Auswirkungen der unterschiedlichen Beschaffungsstrategien zu fokussieren. Dennoch dient das hier vorgeschlagene Phasenmodell als Referenz für weitere Spezifizierungen.

7 Softwaretechnische Umsetzung

In diesem Kapitel wird das letzte entwickelte Artefakt, die softwaretechnische Umsetzung, vorgestellt. Im Rahmen des Forschungsvorhabens wurde zur Operationalisierung der Gesamtsystematik ein Softwaredemonstrator entwickelt (Forschungsfrage drei). Ziel dieses Demonstrators ist es, die Umsetzbarkeit der entwickelten Methodik sowie des Phasenmodells darzustellen. Hierzu wird im folgenden Abschnitt zunächst die Infrastruktur der entwickelten Anwendung als auch die Systemarchitektur präsentiert (Abschnitt 7.1). Darauf aufbauend wird in Abschnitt 7.2 die Struktur der Nutzeroberfläche anhand der bereits vorgestellten Anforderungen hergeleitet. Dieses Kapitel schließt mit der Vorstellung der Implementierung in Abschnitt 7.3. Teile der softwaretechnischen Umsetzung wurden zudem bereits im Rahmen der wissenschaftlichen Veröffentlichung (Keiser et al. 2024) publiziert.

Das Prozessmodell zur Integration der Zulieferer ist nicht Teil des Softwaredemonstrators, wurde im Rahmen dieser Arbeit jedoch auch weiter untersucht. Eine mögliche Implementierung in Form einer Benutzeroberfläche (*Mock-UP*) ist in Anhang A.11.1 dieser Arbeit zu finden.

7.1 Infrastruktur und Systemarchitektur

Für die Auslegung der Infrastruktur sowie der Systemarchitektur ist zunächst auf Basis der formulierten Anforderungen eine geeignete Art der Anwendung zu wählen. Für den Anwendungskontext dieser Arbeit ist die Umsetzung in Form einer klassischen Desktopanwendung, einer nativen Anwendung oder einer sogenannten Web-Applikation grundsätzlich denkbar. Bedingt durch die Anforderung einer Orts- und systemübergreifenden Anwendung (Anforderung SB-A5) ist die hier vorgestellte Anwendung als Web-Applikation umgesetzt. Web-Applikationen ermöglichen bei vorhandener Internetverbindung einen orts- und betriebssystemunabhängigen Zugriff und es ist kein Installationsaufwand notwendig. In Kombination mit dem Anwendungskontext sowie den erfüllten Anforderungen von bedingt dies die Entscheidung für eine **Web-Applikation**.

Prinzipiell ist die Entwicklung von Web-Applikationen mit verschiedenen Programmiersprachen, Frameworks und Bibliotheken möglich (Jazayeri 2007). Bei der Auswahl wurde zum einen die Verbreitung ebendieser betrachtet und zum anderen die verfügbaren Entwicklungskompetenzen berücksichtigt. Als modulares Entwicklungsframework findet das von Microsoft entwickelte ASP.NET Core Verwendung. Die Entwicklung der visuellen Elemente (*Front-End*) wurde mittels HTML, CSS sowie JavaScript umgesetzt. Notwendige Abläufe und Bedingungen wurden mit C# implementiert. Als Entwicklungsumgebung wurde Microsofts Visual Studio 2022 verwendet. Des Weiteren wurden das Front-End CSS Framework Bootstrap und die JavaScript-Bibliothek jQuery verwendet. Diese bieten Gestaltungsvorlagen und minimieren somit Entwicklungsaufwände. Prämisse für die Entwicklung ist eine von Endgeräten unabhängige Möglichkeit zur Nutzung. Allerdings ist eine höhere User Experience bei einem möglichst großen Bildschirm erreichbar. Dies bedingt sich durch die Komplexität des Konfigurationsprozesses und damit der Notwendigkeit nach einer guten Übersichtlichkeit. In der nachfolgenden Tabelle 25 sind die infrastrukturellen Randbedingungen der entwickelten Anwendung zusammenfassend dargestellt.

Tabelle 25: Infrastruktur der entwickelten Anwendung

Merkmals	Ausführung
Applikationsart	Web-Applikation
Frameworks	ASP.NET Core, Bootstrap (CSS)
Programmiersprachen	C# (Logik), JavaScript, HTML, CSS (Front-End)
Entwicklungsumgebung	Visual Studio
Bibliotheken	jQuery (JavaScript)
Hardware	Unabhängig von Hardware

Nachdem die grundlegenden technischen Merkmale beschrieben sind, kann die Architekturbeschreibung erfolgen. Hierzu ist insbesondere die Anforderung nach einer modularen Architektur zu berücksichtigen (Anforderung SB-A4). Auf Basis dieser übergeordneten Anforderung wurde das Entwurfsmuster Model-View-Controller (MVC) verwendet. Dieses bietet den Vorteil von klar getrennten Schnittstellen, sodass sich spätere Anpassungen entsprechend leicht implementieren lassen. Zudem ist die Wiederverwendbarkeit von Teilen des Softwarecodes möglich (Goll 2014). Ziel des MVC-Entwurfsmusters ist es, die Benutzeroberfläche von Daten und Abläufen zu trennen. Hierzu enthält das sogenannte *Model* die Daten, welche von der Benutzeroberfläche dargestellt werden. Das Model aktualisiert die Benutzeroberfläche (*View*) und wird vom *Controller* manipuliert (Qureshi und Sabir 2014). Der eigentliche Ablauf der Anwendung, Regeln und Bedingungen werden in diesem Entwurfsmuster durch den Controller gesteuert. Ausgehend von diesem Entwurfsmuster sind notwendige Schnittstellen zu identifizieren und spezifizieren. Für die prototypische Umsetzung wurde Artefakt zwei, die parametrisierbare Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode, in einem Tabellenkalkulationsprogramm umgesetzt. Im Tabellenkalkulationsprogramm wurden für die Bilanzierung des gesamten Lebenszyklus entsprechende Zulieferer Schnittstellendokumente (Artefakt eins) dokumentiert. Wie in Abbildung 53 dargestellt, übermittelt der Controller auf Basis der Nutzereingaben die Konfiguration und alle notwendigen Parameter an das Tabellenkalkulationsprogramm. In diesem erfolgt dann auf Basis dieser Datenpunkte die eigentliche Berechnung der Umweltwirkungen und damit die Ökobilanzierung. Die Ergebnisse werden in einem standardisierten Format zurück an den Controller gesendet, sodass die Darstellung in Form von typischen Diagrammen bei der Interpretation von Ökobilanzen erfolgen kann (siehe Unterabschnitt 8.1.2). Abschließend erfolgt die lokale Speicherung aller relevanter Dateneingaben sowie der Ergebnisse.

Für eine spätere Industrialisierung ist durch diesen Entwurf eine ausreichende Modularität gewährleistet: Erstens kann die Schnittstelle zum Tabellenkalkulationsprogramm durch ein weniger fehleranfälliges und robusteres Softwaremodul (*Back-End*) ersetzt werden, sodass Artefakt zwei vollumfänglich als Software umgesetzt wird. Zweitens besteht die Möglichkeit, den lokalen Speicherort durch z. B. einen Cloud-Speicher zu ersetzen. Hierdurch kann die Datensicherheit und Verfügbarkeit der gespeicherten Daten verbessert werden. Im Rahmen dieser prototypischen Umsetzung sind diese Hinweise jedoch als zukünftige Entwicklungsstufen zu betrachten und werden entsprechend nicht weiter ausgeführt.

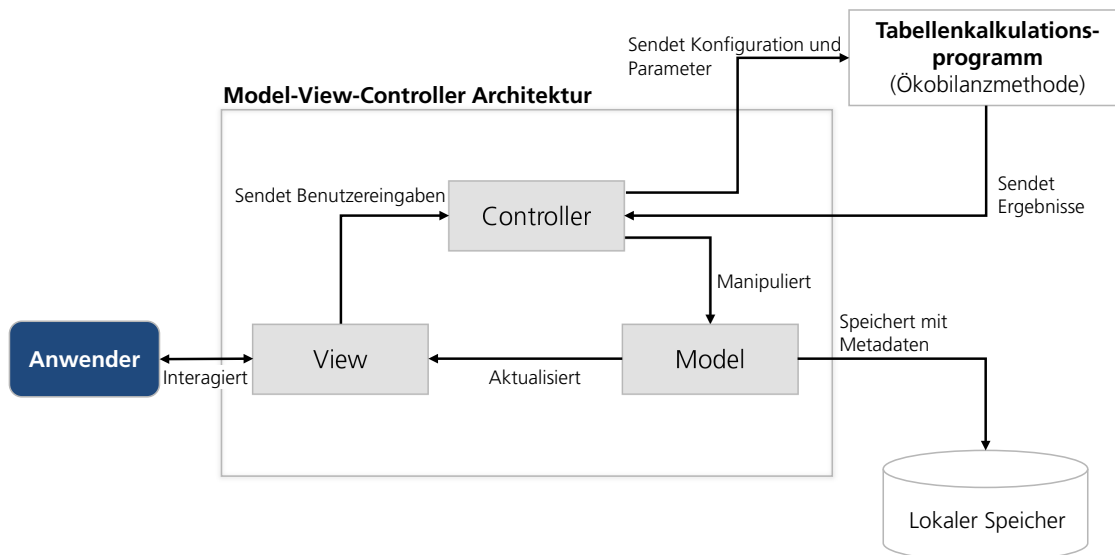


Abbildung 53: Architekturbeschreibung der prototypischen softwaretechnischen Umsetzung

7.2 Vorüberlegungen zur Benutzeroberfläche sowie deren Struktur

Der Benutzeroberfläche kommt eine besondere Rolle zu, da diese die Schnittstelle zum Anwender ist und somit dessen Akzeptanz maßgeblich durch eine benutzerfreundliche Mensch-Maschine Schnittstelle beeinflusst. Entsprechend der Anforderung nach einer möglichst hohen Benutzerfreundlichkeit (Anforderung SB-A1) ist die ebendiese für die weitere Konzeption leitend. Die Benutzerfreundlichkeit beschreibt im Kontext von Mensch-Maschine-Schnittstellen nach DIN EN ISO 9241:

Das Ausmaß, in dem ein Produkt oder eine Dienstleistung durch bestimmte Benutzer in einem bestimmten Nutzungskontext genutzt werden kann, um bestimmte Ziele effektiv, effizient und zufriedenstellend zu erreichen (DIN EN ISO 9421-110 2006).

Entsprechend dieser Definition sind für eine effektive und effiziente Anwendung im Kontext dieser Arbeit zunächst ein Ablauf sowie eine Struktur zu definieren. Aus konzeptioneller Sicht kann die Anwendung als Produktkonfigurator verstanden werden. Diese weisen einen hohen Grad an Strukturierung auf und werden insbesondere für komplexe Produkte verwendet (Leclercq et al. 2020). Diese Beobachtung ist deckungsgleich zur Anforderung SB-A2 (Unterabschnitt 5.2.4) und entsprechend wird nachfolgend der umzusetzende Ablauf wie in Abbildung 54 dargestellt näher erläutert.

Beginnend mit einer Startseite hat der Benutzer die Möglichkeit zur Anmeldung bzw. Registrierung. Daran anschließend kann eine bereits gespeicherte Kabinenkonfiguration geladen oder eine neue Konfiguration begonnen werden. Wird eine neue Konfiguration begonnen, ist zunächst der Flugzeugtyp (z. B. A350-900) zu wählen. Darauf aufbauend sind die für die entwickelte Methodik notwendigen Parameter des Missionsprofils zu wählen. Zudem werden zum Beispiel die Anzahl der Klassen sowie die gesamte Anzahl der Sitzplätze erfasst. Im Anschluss werden methodische Fragestellungen, welche für die Parametrisierung der Ökobilanzmethode notwendig sind, genannt (Unterabschnitt 6.3.2): Die Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethode und der funktionalen

Einheit. Darauf aufbauend beginnt die Konfiguration der Flugzeugkabine. Der Anwender wählt hier entsprechend dem gesetzten Untersuchungsrahmen in 6.3.3 Anzahl, Typ und Zulieferer für Sitze, Toiletten, Bordküchenmodule sowie die Bordküchenausstattung aus. Im Anschluss wird die erstellte Konfiguration manuell überprüft und kann bei Bedarf angepasst werden. Nach der Überprüfung besteht die Möglichkeit zur Konfiguration einer zweiten Kabine. Wird diese Option gewählt, erfolgt der Wiedereinstieg beim Konfigurationsprozess. Die Änderung des Flugzeugtyps, des Missionsprofils oder der gewählten Parameter für die Ökobilanzmethode ist aus Gründen der Vergleichbarkeit beim Vergleich zweier Kabinen nicht möglich. Abschließend werden die Ökobilanzergebnisse als Single Score, Mid- und Endpoint Indikatoren auf Kabinenebene dargestellt und die Ergebnisse können gespeichert werden.

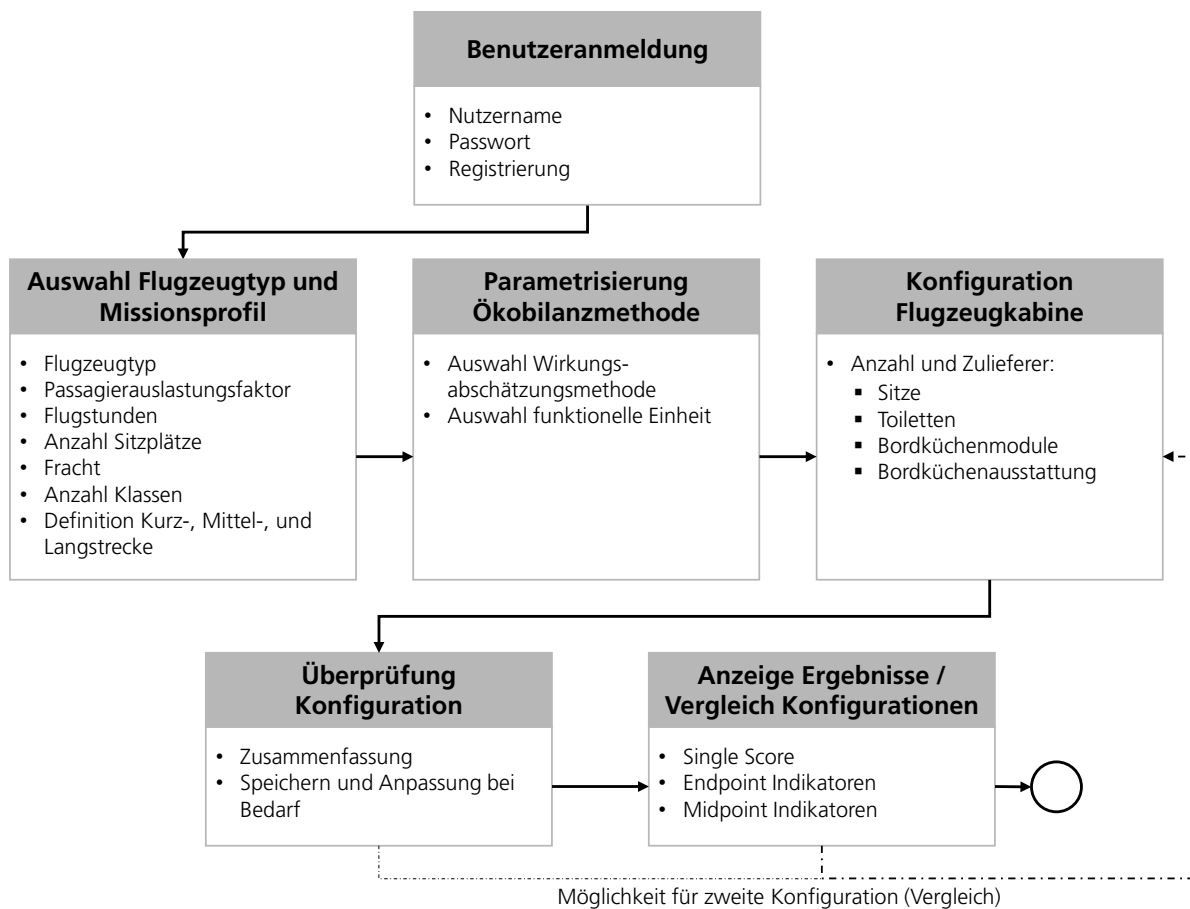


Abbildung 54: Ablauf der Anwendung und Struktur der Nutzeroberfläche

7.3 Implementierung

Nachdem die Struktur der Anwendung konzeptionell entwickelt und beschrieben wurde, bietet dieser Abschnitt abschließend einen praktischen Einblick in die Umsetzung. Zu diesem Zweck sind nachfolgend Ausschnitte der implementierten Benutzeroberfläche abgebildet und beschrieben. Die gesamte Benutzeroberfläche ist in Anhang A.11.2 dokumentiert.

Nachfolgender Ausschnitt (Abbildung 55) zeigt nach der Anmeldung die Möglichkeit zur Wahl des Flugzeugtyps. Die Flugzeugtypen sind nach Flugzeugfamilien sowie Flugstrecke (A350: Langstrecke) gruppiert, sodass eine Filterung ermöglicht wird. Zudem bietet ein Mouseover-Effekt die Möglichkeit zur Anzeige von weiteren Informationen je Flugzeugtyp.

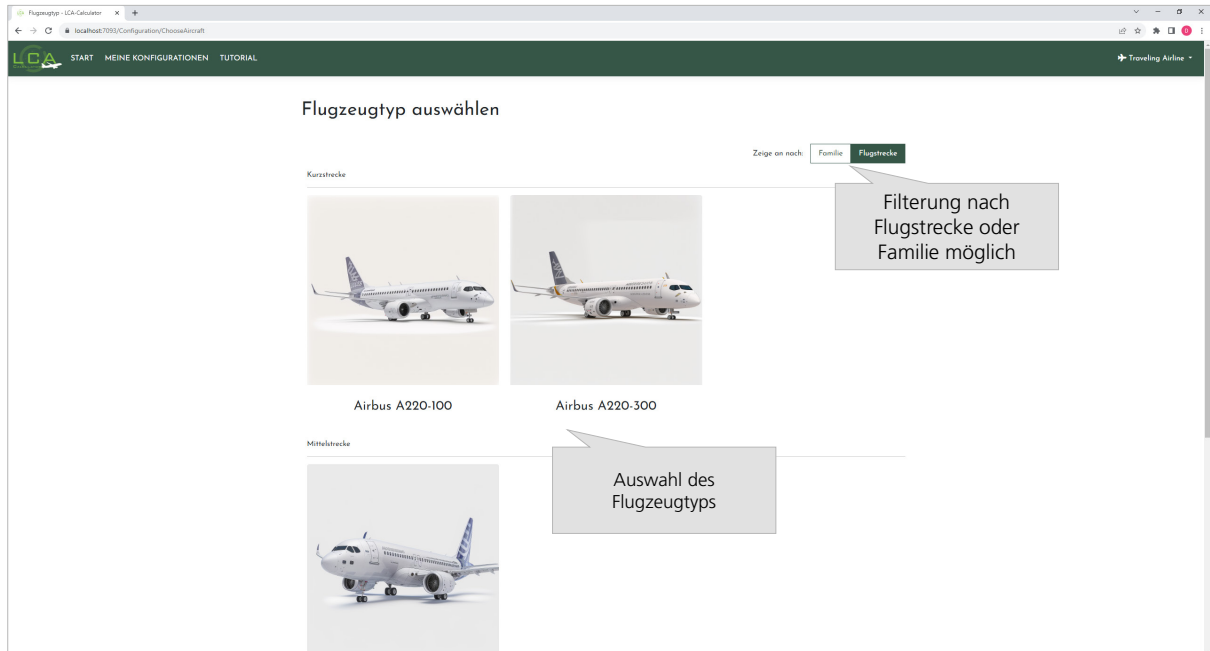


Abbildung 55: Ausschnitt I softwaretechnische Umsetzung: Auswahl Flugzeugtyp¹¹

Entsprechend des beschriebenen Ablaufs erfolgt nach der Auswahl des Flugzeugtyps die Eingabe aller notwendigen Informationen zur Durchführung der Ökobilanzierung. In der Eingabemaske, dargestellt in Abbildung 56, ist hier eine Gliederung nach Flugzeug-Parameter und Parametern des Missionsprofils vorzunehmen. Die Eingabe erfolgt direkt über ein Eingabefeld oder mittels Schieberegler. Zudem führt eine Prozessdarstellung am oberen Ende der Anwendung den Nutzer durch den Konfigurationsprozess.

¹¹ Generierung der Flugzeugbilder mittels Dall-E im April 2023

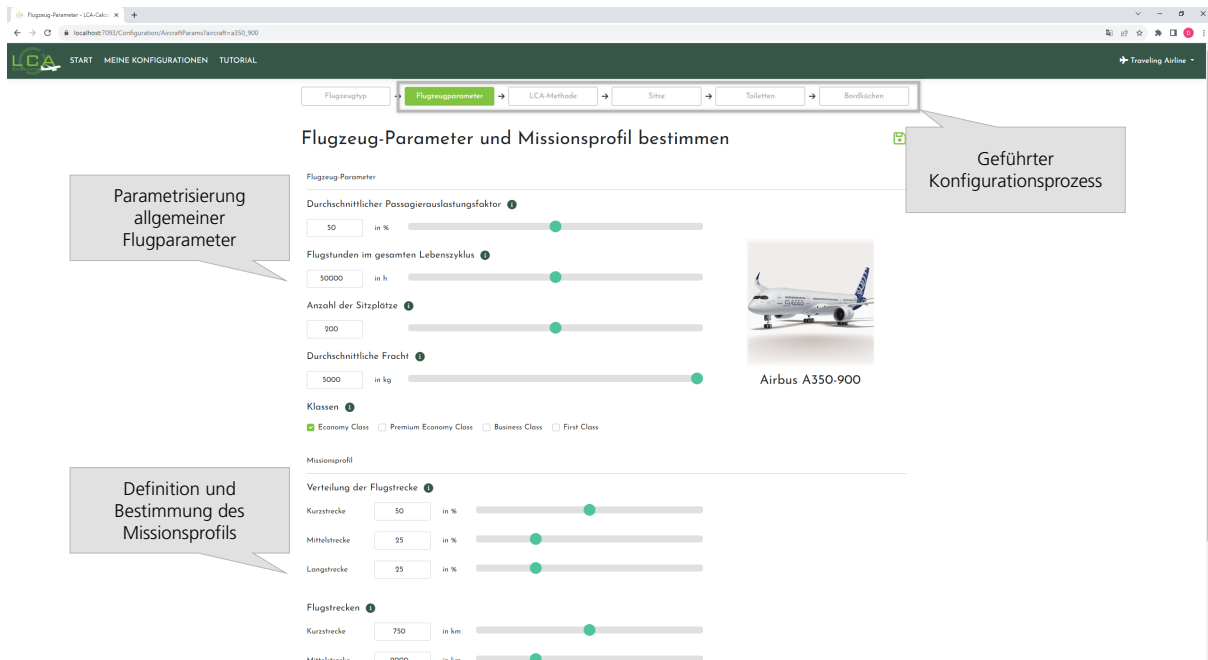


Abbildung 56: Ausschnitt II softwaretechnische Umsetzung: Grundlegende Parameter und Missionsprofil
 Beispielhaft für den gesamten nachfolgenden Konfigurationsprozess ist die Auswahl der Bordküchenausstattung in Abbildung 57 dargestellt. Mithilfe von Eingabefeldern oder Schieberegeln ist es zunächst möglich die Anzahl des entsprechenden Kabinenelements zu definieren. Dies ist ebenfalls für Sitze, Toiletten sowie für die Bordküchenmodule je Klasse möglich. Nachdem die Anzahl festgelegt ist, erlaubt die Anwendung mittels Dropdown-Menüs die Auswahl des Zulieferers sowie die Auswahl eines spezifischen Typs. Zudem sind weiterführende Informationen wie das Gewicht für den Nutzer abrufbar.

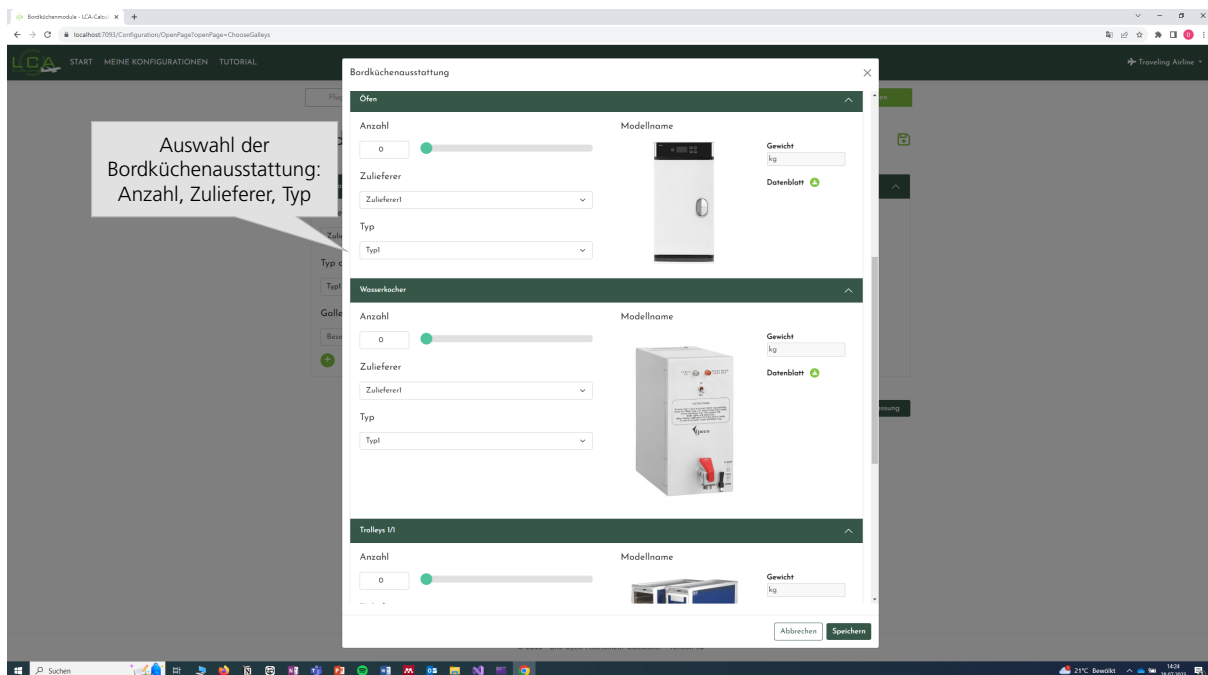


Abbildung 57: Ausschnitt III softwaretechnische Umsetzung: Konfiguration Bordküchenausstattung

Abschließend zeigt Abbildung 58 einen Ausschnitt der Ergebnisdarstellung. Zu sehen ist der Vergleich zweier Kabinenkonfigurationen mittels des Single Scores. Ferner wird das eingesparte CO₂ über den gesamten Lebenszyklus als weitere einfache und gut verständliche Kennzahl visualisiert. Die Visualisierung der Ergebnisse folgt in der Anwendung einem Top-Down Ansatz, sodass zunächst der Single Score angezeigt wird. Werden vom Anwender detailliertere Ergebnisse gewünscht, ist dies in Form von Mid- und Endpoint Indikatoren möglich.

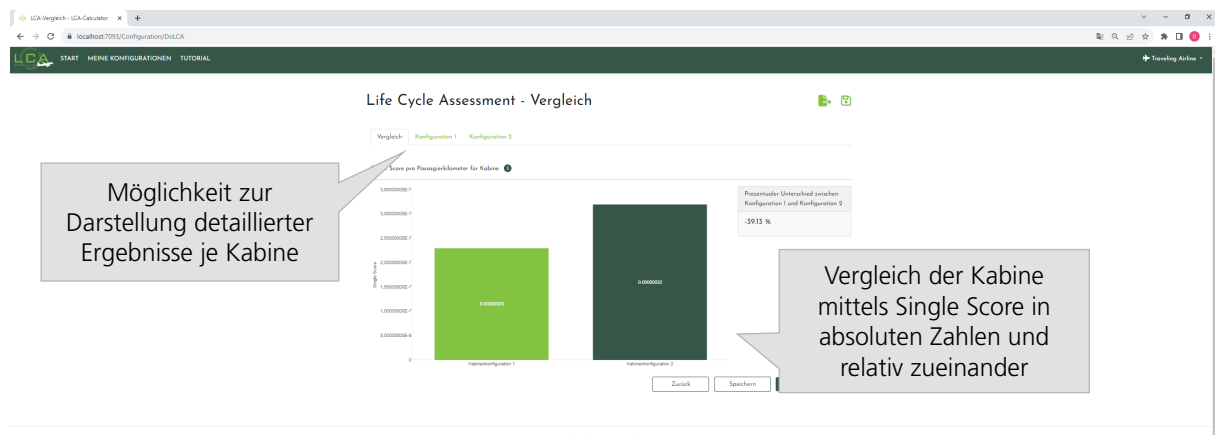


Abbildung 58: Ausschnitt IV softwaretechnische Umsetzung: Vergleich von zwei Flugzeugkabinen (beispielhafte Datensätze)

7.4 Zwischenfazit und Diskussion

In diesem Kapitel wurde die softwaretechnische Umsetzung der Systematik vorgestellt und damit das dritte Artefakt vorgestellt. Damit adressiert dieses Kapitel den in den Grundlagen aufgezeigten Bereich von Produktkonfiguratoren (Unterabschnitt 2.5.2) und die Integration von Ökobilanzen in derartige Systeme. Grundlage für diesen Betrachtungsgegenstand stellte der konzeptionelle Rahmen dieser Arbeit sowie die formulierte Forschungsfrage drei dar: *Wie kann Systematik in ein Produktkonfigurationssystem integriert werden, sodass die Operationalisierung unterstützt wird?*

Zunächst zeigt sich, dass es für die Operationalisierung zwingend einer Softwareunterstützung bedarf. Die hier vorgestellte prototypische Umsetzung stellt die Möglichkeit zur Integration in ein Produktkonfigurationssystem dar. Von besonderer Bedeutung ist dabei die Berücksichtigung der genannten Herausforderungen bei Produktkonfigurationssystemen (Unterabschnitt 2.5.2). Die Komplexität bei der Entwicklung von notwendigen Produktmodellen sowie die inhärenten Herausforderungen während des Entwicklungsprozesses von PCS sind hier im besonderen Maße zu nennen. Unterstützend war hier eine zielgerichtete und detaillierte Ermittlung der Anforderungen sowohl aus theoretischer als auch praktischer Sicht: Bedingt durch die ermittelten Anforderungen folgte die Entwicklung mit dem Ziel eine möglichst hohe Benutzerfreundlichkeit zu erreichen der ISO 9241 (Unterabschnitt 5.2.4). Die so entwickelte Software ermöglicht mit einer ersten Softwarearchitektur die Untersuchung des vorgeschlagenen Ablaufs aus Sicht des Anwenders. Zudem zeigt die Anwendung die Möglichkeit zur Darstellung der komplexen Ergebnisse von Ökobilanzen in einem strukturierten Konfigurationsprozess eines komplexen Produkts und trägt damit zum Forschungsgegenstand dieser Arbeit bei.

Erste Erkenntnisse aus der weiteren praktischen Umsetzung mit einem vollumfänglich ausgestatteten Team an Softwareentwicklern stützt die hier dargestellten Erkenntnisse und Hypothesen: Die Abbildung eines komplexen Produkts wie der Flugzeugkabine und die automatische Berechnung von Ökobilanzen ist mit hohen Investitionskosten und Entwicklungsrisiken verbunden. Dieser erste Prototyp legte für die Industrialisierung dennoch wesentliche Grundlagen und erlaubt ferner weitere wissenschaftliche Untersuchungen. Der innovative Charakter der Systematik zeigt sich neben den bereits zitierten Veröffentlichungen des Autors sowie den getätigten Investitionen und Anstrengungen zur Industrialisierung durch die Projektpartner auch durch die **Patentierung** des Verfahrens und dessen technischer Umsetzung als softwarebasiertem System (Keiser et al. 2022).

8 Anwendung und Evaluation

Ausgehend von der Entwicklung der Systematik inklusive der softwaretechnischen Umsetzung erfolgt in diesem Kapitel zunächst die Anwendung der entwickelten Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode (Abschnitt 8.1). Darauf aufbauend werden alle entwickelten Artefakte sowie die Synthese mithilfe verschiedener Methoden in Abschnitt 8.2 evaluiert. Zur methodischen Absicherung findet zunächst ein Vorgehensmodell zur Planung der Evaluation Anwendung. Mittels des Vorgehensmodells wird für jedes Artefakt eine passende Evaluationsmethodik ausgewählt, in den Unterabschnitten beschrieben und abschließend werden je Artefakt die Ergebnisse dargestellt.

8.1 Anwendung

Die Pilot-Anwendung der entwickelten Methodik folgt dem in Abbildung 59 dargestellten vierphasigen Vorgehen. Zunächst wird die Methodik parametrisiert und eine beispielhafte Flugzeugkabine entsprechend der definierten Systemgrenzen definiert. Mit diesen Eingaben lassen sich bereits die Phase Treibstoffherstellung und dessen Verbrennung während der Betriebsphase automatisiert berechnen. Zur Modellierung der weiteren Lebenszyklusphasen sind in Schritt zwei zunächst notwendige Daten (z. B. Materialien) der Kabinenmodule zu sammeln oder Annahmen zu treffen. Auf Basis dieser Datengrundlage erfolgt die Modellierung der Umweltwirkungen der Module und deren Dokumentation. Für die Modellierung sind die im Artefakt Prozessmodell entwickelten Richtlinien und Hinweise (Unterabschnitt 6.2.4) zu befolgen. Ferner findet die Vorlage des Schnittstellendokuments zur Dokumentation der Teilergebnisse Anwendung. Diese Gate-to-Gate Modelle werden entsprechend der Methodik im vierten Schritt der Anwendung zu einer Cradle-to-Grave Ökobilanz zusammengeführt und die Ergebnisse dargestellt.

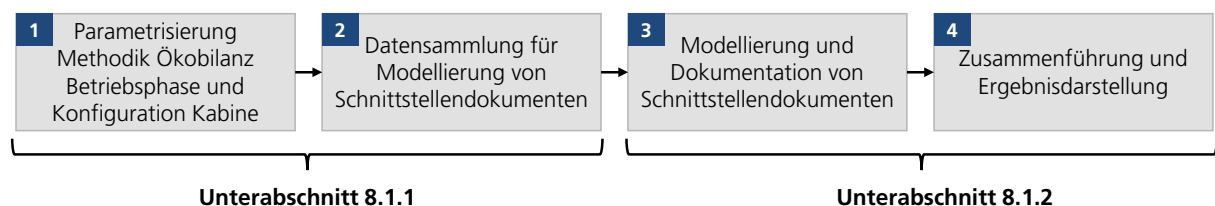


Abbildung 59: Vorgehen für die Anwendung der entwickelten Methodik

Für die Modellierung der notwendigen Schnittstellendokumente ist eine kommerzielle Ökobilanzsoftware notwendig. Am Markt werden hierzu verschiedene Lösungen angeboten (Lüdemann und Feig 2014). Im Zuge dieser Arbeit wurde die Software *Umberto 11* verwendet und auf die Datenbank *ecoinvent* (Version 3.9.1) zurückgegriffen. Im nachfolgenden Abschnitt wird zunächst näher auf die zugrundeliegende Datenbasis für die Anwendung eingegangen und damit Schritt eins des beschriebenen Vorgehens dargestellt.

8.1.1 Zusammenfassung des Anwendungsfalls sowie dessen Datenbasis

Für die Parametrisierung der Methodik ist zunächst ein Flugzeugtyp auszuwählen. In der hier vorgestellten Anwendung wurde ein Airbus A350-900 als Langstreckenflugzeug ausgewählt, da

es sich um eines der modernsten Flugzeuge auf dem Markt handelt. Dem folgend ist das angenommene Flugzeug mit zwei Rolls-Royce Trent XWB-84 Turbofan Triebwerken ausgestattet. Weiterhin wurde ein realitätsnaher Passagierauslastungsfaktor von durchschnittlich 79,1 % angenommen. Als durchschnittliches OEW für einen A350-900 wird zudem ein Gewicht von 115.700 kg angenommen (Flugzeug-Lexikon.de 2023). Wie in folgender Tabelle 26 dargestellt wurden weitere Parameter für die Lebensdauer, die Flugstunden für den gesamten Lebenszyklus sowie das Streckenprofil getroffen.

Tabelle 26: Gewählte Parameter für die Anwendung der Methodik

Merkmal/Parameter	Auswahl für Anwendung
Flugzeugtyp	A350-900
Triebwerktyp	Trent XWB-84
Passagierauslastungsfaktor	Ø 79,1 %
Fracht	Ø 5000 kg
Lebensdauer Flugzeug	25 Jahre
Flugstunden Lebenszyklus	60.000 Stunden
Anteil Kurzstrecke	25 % (1500 km)
Anteil Mittelstrecke	50 % (3000 km)
Anteil Langstrecke	25 % (9000 km)
Anzahl Klassen	3 (285 Sitzplätze)

Auf Basis der definierten Anzahl an Sitzplätzen und der Anzahl der Klassen erfolgt abschließend die Konfiguration der Kabine. Die gewählte Konfiguration ist in Tabelle 27 dargestellt und es sind pro Einheit die Gewichte vermerkt. Diese basieren auf den öffentlich zugänglichen Daten der Hersteller sowie gesammeltem Expertenwissen.

Tabelle 27: Zusammenfassung des gewählten Kabinenlayouts

Kabinenmodul	Anzahl	Gewicht [kg]
Sitze Business Klasse	48	27
Sitze Premium Economy Klasse	21	17
Sitze Economy Klasse	216	10
Toiletten Business Klasse	2	150
Toiletten Economy Klasse	6	100
Bordküchenmodule	9	10
Standardeinheiten (Bordküchenausstattung)	45	3
Kaffeemaschinen (Bordküchenausstattung)	27	7
Wasserkocher (Bordküchenausstattung)	9	6
Trolleys - Groß (Bordküchenausstattung)	36	17
Trolleys - Klein (Bordküchenausstattung)	36	11

Für die Modellierung der notwendigen Schnittstellendokumente sind weitere Annahmen zu treffen. Diese sind im Anhang A.12 dieser Arbeit dokumentiert, die Hinweise aus Unterabschnitt 6.2.5 wurden berücksichtigt.

8.1.2 Ergebnisse¹²

Auf Grundlage der getroffenen Annahmen erfolgt in diesem Abschnitt eine Darstellung der Ergebnisse. Zur besseren Einordnung und Lesbarkeit der Ergebnisse erfolgt die Darstellung hierarchisch: Zunächst wird der ermittelte Single Score sowie die Anteile der Lebensphasen am Single Score vorgestellt. Darauf aufbauend werden die Mid- und Endpoint Indikatoren sowie deren Einfluss auf den Single Score präsentiert. Werden die Ergebnisse einer Ökobilanz einer breiten Öffentlichkeit zugänglich gemacht, empfiehlt sich diese einfache Kommunikation mittels vergleichender Diagramme über den Lebenszyklus sowie der Umweltindikatoren. Dies bedingt sich durch die oftmals fehlende Möglichkeit zur Einordnung von absoluten Datenpunkten. Ausgehend von dieser Herausforderung ist der folgende Unterabschnitt aufgebaut. Für die absoluten Umweltauswirkungen sei auf Anhang A.12 verwiesen.

Zunächst ergibt sich ein gesamter Single Score von $4.46E+07$ für den gesamten Lebenszyklus der Flugzeugkabine. Dies stellt zunächst ausschließlich einen absoluten Wert dar und es empfiehlt sich eine Beitragsanalyse über die Lebensphasen. Hierzu wurde zunächst die in den Schnittstellendokumenten enthaltene Transportphase der Produktion zugeordnet. Ferner wurde die Endmontage der Produktion zugeordnet. Zudem wurden die Phasen Wiederverwertung, Recycling, Verbrennung und Entsorgung zur Phase Recycling und Entsorgung zusammengeführt. Abschließend konnte die Phase Instandhaltung der Betriebsphase zugeordnet werden. Mit dieser Zusammenfassung ergeben sich für die Darstellung die fünf Phasen Rohstoffabbau, Produktion Kabine und Transport, Produktion Treibstoff, Betrieb sowie Recycling und Entsorgung. Wie in Abbildung 60 dargestellt zeigt die Beitragsanalyse einen deutlichen Fokus auf die Betriebsphase mit mehr als 86 % bezogen auf den Single Score der Kabine. Enthalten sind hier die Treibstoffverbrennung sowie die Instandhaltung. Die Instandhaltung ist in der Gesamtbetrachtung jedoch zu vernachlässigen. Darüber hinaus trägt die Herstellung des Treibstoffs mit ca. 11 % zu den gesamten Umweltwirkungen bei. Treibstoffherstellung und Verbrennung tragen damit mit mehr als 97 % zum Single Score bei. Rohstoffabbau, Produktion sowie die Verwertung und Entsorgung sind als Lebensphasen für weniger als 3 % des Single Scores verantwortlich.

¹² Die Ergebnisse wurden mithilfe der entwickelten Ökobilanzmethode sowie den genannten und öffentlich zugänglichen Datenquellen berechnet (siehe Abschnitte 3.3 und 6.3). Es wurden somit ausdrücklich keine unternehmensspezifischen Daten oder Methoden verwendet.

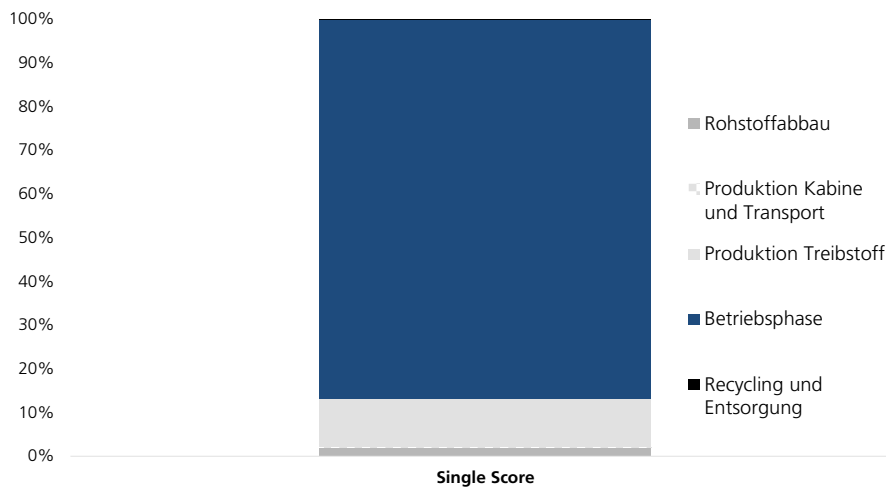


Abbildung 60: Anteil der Lebensphasen am Single Score

Ausgehend vom Single Score stellt die nächste Analyse die Midpoint Indikatoren nach deren Normalisierung und Gewichtung in Bezug auf den Single Score dar. In Abbildung 62 zeigt sich der Midpoint Indikator Klimawandel mit mehr als 49 % Anteil am Single Score als Haupttreiber für die Umweltwirkungen der Flugzeugkabine. Dies bedingt sich unter anderem durch die hohe Gewichtung innerhalb der Gewichtungsfaktoren. Weitere Treiber sind die photochemische Ozonbildung sowie der Verbrauch fossiler Treibstoffe. So haben die vier genannten Midpoint Indikatoren mehr als 80 % Anteil am Single Score.

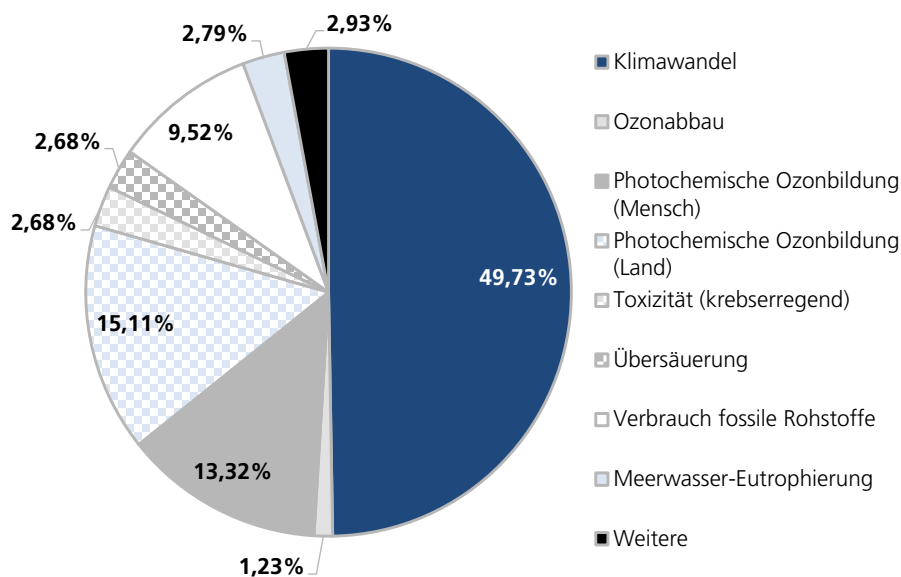


Abbildung 61: Anteil der Midpoint Indikatoren am Single Score nach Gewichtung und Normalisierung

Als letzte übliche Darstellungsform können für alle Midpoint Indikatoren die anteiligen Einflüsse der Lebenszyklusphasen wie in Abbildung 62 dargestellt werden. Hier zeigt sich für den Indikator Klimawandel erneut der starke Einfluss der Betriebsphase. Bei anderen Midpoint Indikatoren hat die Betriebsphase einen deutlich geringeren Einfluss. Dies bedingt sich durch die Charakterisierungsmodelle der zugrundeliegenden ReCiPe-Methode, welche eine Zuordnung der Emissionsfaktoren zu den Midpoint Indikatoren vorsieht.

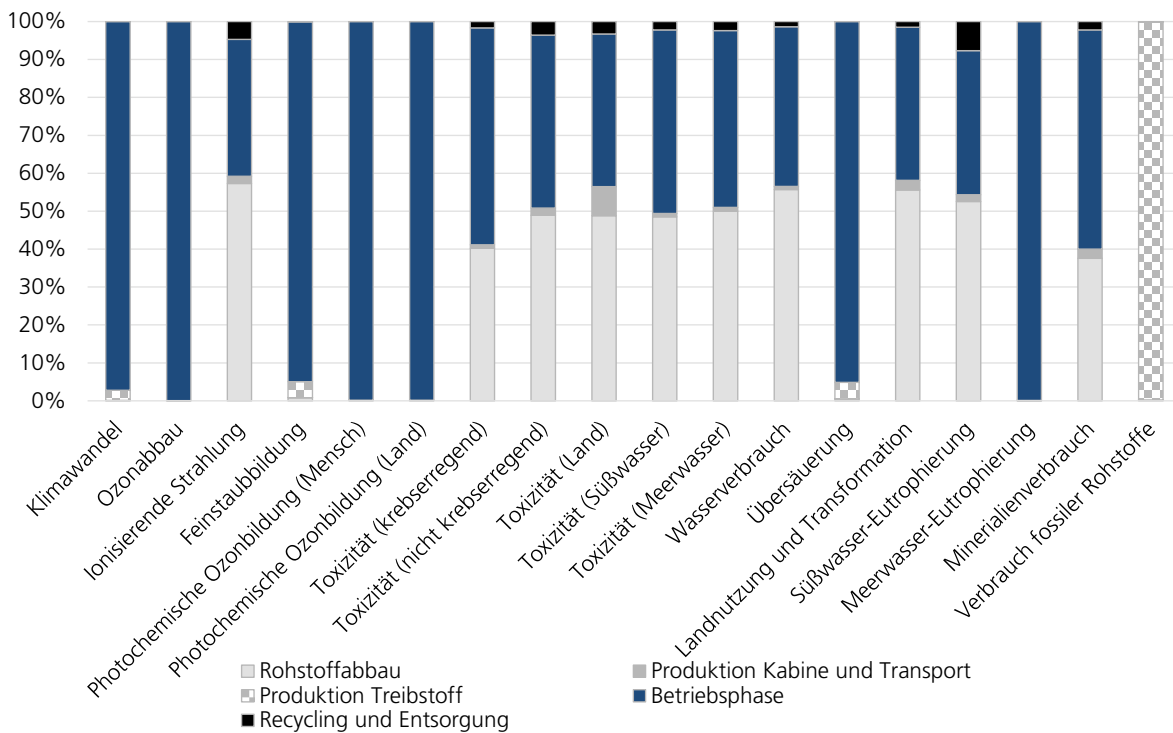


Abbildung 62: Anteil der Lebenszyklusphasen an den Midpoint Indikatoren

Abschließend soll hier noch der Single Score zweier Kabinen mit unterschiedlichen Layouts miteinander verglichen werden. Hierzu wurde die bereits vorgestellte Kabine um weitere 25 Economy Klasse-Sitze erweitert, sodass insgesamt 310 Sitze im Layout integriert sind. Tabelle 28 zeigt das Ergebnis beider Flugzeugkabinen.

Tabelle 28: Vergleich der beiden Kabinenkonfigurationen anhand der Single Scores

Funktionelle Einheit	Ergebnis Kabine	Ergebnis Kabine (+25 Sitze)	Veränderung
Gesamter Lebenszyklus	4,46E+07	4,48E+07	↑
Passagierkilometer Kabine	3,83E-03	3,53E-03	↓

Am dargestellten Beispiel zeigt sich zudem die Relevanz der funktionalen Einheit Passagierkilometer. Bedingt durch das höhere Gewicht weist das Kabinenlayout mit 310 Sitzen einen höheren Single Score aus und ist damit im Hinblick auf die Ökobilanz relativ zur Ausgangskabine schlechter zu bewerten. Wird jedoch die typische funktionale Einheit in der Luftfahrtindustrie berechnet, so kehrt sich das relative Ergebnis der beiden Vergleichskabinen um. Dies bedingt sich durch die stärkere Verdichtung des Kabinenlayouts und zeigt das Spannungsfeld zwischen Komfort und Ökologie auf.

8.2 Evaluation

Nach der prototypischen Anwendung der entwickelten Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode erfolgt in diesem Abschnitt die Evaluation der entwickelten Artefakte sowie der Synthese. Für die Planung und Umsetzung der Evaluation wird das aus vier Schritten bestehende Vorgehen von Venable et al. verwendet (Venable et al. 2012). Das Rahmenwerk ist ausdrücklich für Forschungsarbeiten unter Verwendung des DSR-Prozesses entwickelt worden und eignet sich daher im besonderen Maße zur Unterstützung der Evaluation im Rahmen dieser Arbeit. Das Vorgehen umfasst die folgenden Schritte:

- 1) Analyse des Evaluationsgegenstandes und Definition der Anforderungen (*a bis g*)
- 2) Auswahl der Evaluationsstrategie anhand der Auswahlmatrix
- 3) Auswahl der Evaluationsmethoden anhand der Auswahlmatrix
- 4) Detaillierte Entwicklung der DSR-Evaluation

Schritt eins des Vorgehens bildet die Grundlage für eine zielorientierte Evaluation und wird daher im Folgenden näher erläutert. Ziel dieses Schritts ist die Analyse der Evaluationsgegenstände sowie die Definition der Evaluationsanforderungen. Für diese Analyse schlagen Venable et al. wiederum die sieben in Tabelle 29 dargestellten und für diese Arbeit durchgeführten Schritte (*a bis g*) vor (Venable et al. 2012). Nachfolgend werden diese sieben Schritte weiter erläutert: Im Rahmen dieser Arbeit wurden drei Artefakte entwickelt, welche entsprechend als Evaluationsgegenstände zu bezeichnen sind (*a*). Zudem kann die Synthese mittels des Phasenmodells als Evaluationsgegenstand betrachtet werden. Zur Vereinfachung der Evaluationsplanung sind Prozessmodell und Phasenmodell hier zunächst zusammengefasst. Des Weiteren sind die entwickelte Methodik und die Benutzeroberfläche zu evaluieren. Die Eigenschaften der Artefakte (*b*) unterscheiden sich von einem konzeptionellen Charakter bis hin zu quantitativen und technischen Eigenschaften. Dies bedingt die Wahl der Evaluationskriterien (*c*) sowie die Festlegung der Evaluationsziele (*d*) je Artefakt. Als mögliche Grenzen und Hemmnisse für die Evaluation (*e*) ist zum einen die nur teilweise verfügbare reale Datenbasis (dazu auch Unterabschnitt 8.1.1) sowie der begrenzte Zugang zu Experten (beispielsweise das Fehlen von Vertreter aller Stakeholder) zu nennen. Die Stringenz der Evaluation (*f*) wird durch die Anwendung von wissenschaftlichen Methoden zur Evaluation sichergestellt sowie durch Priorisierung (*g*) der Schritte *a*, *c* und *d*. Diese Priorisierung motiviert sich aus der Anzahl der zu evaluierenden Artefakte.

Die Schritte zwei bis vier des übergeordneten Vorgehens von Venable et al. werden impliziert in den folgenden Unterabschnitten im Zuge der Vorstellung des methodischen Vorgehens berücksichtigt und daher hier zunächst nicht näher dargestellt.

Tabelle 29: Analyse der Evaluationsgegenstände und Definition der Anforderungen
(angelehnt an Venable et al. 2012)

a) Festlegung der Evaluationsgegenstände		
Prozessmodell Zulieferer und Phasenmodell Konfigurationsprozess	Parametrisierbare Methodik Ökobilanz	Benutzeroberfläche sowie deren Struktur
b) Festlegung der Eigenschaften der Evaluationsgegenstände		
Konzeptionell und sozio-technisch	Rechnerisch, quantitative Methode	Technisch, Mensch-Maschine-Schnittstelle
c) Festlegung der Evaluationskriterien		
Anwendbarkeit sowie Nutzbarkeit in der Praxis	Validität der Ergebnisse	Benutzerfreundlichkeit
d) Festlegung der Evaluationsziele		
Qualitative Bewertung der Anwendbarkeit	Nachweis der Validität mittels Vergleichs von Literaturdaten	Grad der Benutzerfreundlichkeit
e) Identifikation und Analyse der Grenzen in der Forschungsumgebung		
Bedingt durch das Umfeld ist der Zugang zu Datensätzen sowie Industrieexperten als eingeschränkt zu beurteilen.		
f) Bestimmung der notwendigen Stringenz der Evaluation		
Die Evaluation muss mit wissenschaftlichen Methoden durchgeführt werden und praxisorientiert sein.		
g) Priorisierung der oben genannten Kontextfaktoren		
Prioritär sind aufgrund der Anzahl der Artefakte die Schritte a), c) sowie d).		

8.2.1 Evaluation von Prozessmodell und Phasenmodell

Innerhalb dieses ersten Unterabschnitts zur Evaluation der Ergebnisse dieser Arbeit werden das Prozessmodell zur Integration der Zuliefererdaten sowie das integrierende Phasenmodell evaluiert. Hierzu wird zunächst das methodische Vorgehen vorgestellt und begründet. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse der Evaluation vorgestellt und diskutiert.

Methodisches Vorgehen. Die Evaluation des entwickelten Prozessmodells sowie des Phasenmodells erfolgt mittels **Experteninterviews**. Die Wahl dieser Methode bedingt sich zum einen durch den qualitativen Charakter der Artefakte und zum anderen werden von Venable et al. unter anderem qualitative Befragungen für ex-post Evaluationen vorgeschlagen (Venable et al. 2012). Zur Vorbereitung der Experteninterviews ist ein Leitfaden zu entwickeln (Mayer 2013). Dieser dient während der Durchführung als Vorgabe zur Gestaltung des Interviews (Helfferich 2022). Die Erstellung des Leitfadens wird durch das bereits bekannte SPSS-Prinzip unterstützt. Zudem erfolgten eine Pilotierung und anschließende Anpassung des Leitfadens. Im Ergebnis wurde ein dreiteiliger Leitfaden für die Evaluation entwickelt: Zunächst erfolgt eine Einleitung durch den Interviewer. Hier werden die Problemstellung sowie die Rahmenbedingungen der Forschungsarbeit vorgestellt. Im zweiten Schritt erfolgen die Vorstellung des entwickelten Prozessmodells und die Formulierung

offener Fragen zur Evaluation an die Experten. Der dritte Bereich der Interviews dient der Evaluation des Phasenmodells. Auch hier werden zunächst das entwickelte Konzept vorgestellt und abschließende Fragen gestellt. Insgesamt wurden die folgenden Leitfragen während der Interviews gestellt:

Leitfragen zur Evaluation des Prozessmodells

- 1) Inwieweit sehen Sie das beschriebene Prozessmodell als geeignetes Vorgehen für die Integration von Zulieferern?
- 2) Inwiefern kann das Prozessmodell zu einer besseren Datenbasis beitragen?
- 3) Wie bewerten Sie die Fokussierung auf direkte Zulieferer und die ausschließlich optionale Einbindung von indirekten Zulieferern (Tier-n)?
- 4) Für wie wichtig erachten Sie einen hohen Standardisierungsgrad bei dem beschriebenen Prozessmodell?
- 5) Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, um das Prozessmodell zu implementieren?
- 6) Wie schätzen Sie die Bereitschaft der Zulieferer hinsichtlich der Umsetzung ein?
- 7) Welche Voraussetzungen müssen vorhanden sein, um eine hohe Bereitschaft aller Stakeholder zu erreichen?
- 8) Wie bewerten Sie den Aufwand für die Umsetzung?
- 9) Inwieweit halten Sie die Art der Modellierung für weitere Untersuchungen für zielführend?

Leitfragen zur Evaluation des Phasenmodells

- 10) Fördert das Phasenmodell aus Ihrer Sicht die Integration von Ökobilanzen (der Systematik dieser Arbeit) in den Konfigurationsprozess?
- 11) Unterstützt das Phasenmodell die Berücksichtigung von ökologischen Aspekten während des Konfigurationsprozesses?
- 12) Wie bewerten Sie die Unterscheidung nach Phasen?
- 13) Für wie wichtig erachten Sie die Fokussierung auf Daten entlang des Phasenmodells?
- 14) Welche Rollen nehmen aus Ihrer Sicht die Fluggesellschaft, Konfigurationsteams und Zulieferer im Rahmen des Phasenmodells ein?
- 15) Sollten aus Ihrer Sicht weitere Stakeholder berücksichtigt werden?
- 16) Was sind die notwendigen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung?

Anschließend sind Experten als Interviewpartner zu wählen. Zunächst zeichnen sich Experten nach Bogner et al. durch spezifisches Praxis- und Expertenwissen in einem klar definierten Problembereich aus (Bogner et al. 2014). Die Auswahl der Experten folgt zum einen dieser Definition und zum anderen dem Ziel, eine möglichst holistische Perspektive aller relevanter Stakeholder zu gewinnen. Hierbei sind jedoch auch die in Abschnitt 8.2 identifizierten Grenzen zu berücksichtigen. Insgesamt wurden somit drei Experten interviewt. Die Experten wurden bei einem Flugzeughersteller akquiriert und zeichnen sich durch crossfunktionale Funktionen im untersuchten Themengebiet aus. Die Interviews wurden digital durchgeführt und für die weitere Verarbeitung aufgezeichnet.

Die nachfolgende Darstellung der Ergebnisse erfolgt auf Basis der Antworten der Experten, beginnend mit dem Themenbereich Prozessmodell. Die einzelnen Interviews wurden zu diesem Zweck

transkribiert (Anhang A.13.1). Für eine eindeutige und einfache Auswertung der Ergebnisse wurden die Antworten der Experten codiert. Diese Codierung wird nachfolgend zur Vorstellung der Ergebnisse verwendet. Die aufsteigende Nummerierung zeigt hierbei den Experten an und der Index die Fragenummer. Hierdurch wird eine differenziertere Darstellung möglich und abweichende Perspektiven können strukturierter diskutiert werden. Für die Evaluation des Prozessmodells wurden zunächst grundlegende Fragestellungen (Frage eins bis vier) hinsichtlich der Erfüllung der Zielstellung sowie der aufgestellten Anforderungen diskutiert. Darauf aufbauend fokussieren die gestellten Fragen mögliche Herausforderungen bei der Umsetzung. Abschließend wurde mit Frage neun die Art der Modellierung untersucht. Der Leitfaden zum Phasenmodell ist ähnlich strukturiert, bedingt durch den Fokus dieser Arbeit ist die Anzahl der Fragen hier jedoch reduziert.

Ergebnisse Prozessmodell. Mit Frage eins wurde das grundlegende Ziel des Prozessmodells, die Integration von Zulieferern sowie deren Daten untersucht. Alle drei Experten halten das entwickelte Prozessmodell für ein geeignetes Mittel ($E1_{F1}$, $E2_{F1}$, $E3_{F1}$), um Zuliefererdaten einzubinden. Hier sei jedoch zu beachten, dass der Flugzeughersteller selbst auch ein möglicher Zulieferer sein könne ($E1_{F1}$). Ein Experte weist direkt bei der ersten Frage auf die Notwendigkeit zur Standardisierung hin ($E12_{F1}$). Demnach sei eine Systematisierung der Prozessschritte notwendig. Eine weitere Perspektive wird von Experten drei aufgeworfen: die praktische Ebene der vertraglichen Situation ($E3_{F1}$), bei der auf die Vergleichbarkeit hingewiesen wird. Zudem weist Experte drei abschließend auf den partnerschaftlichen Charakter hin, welcher durch das Prozessmodell gegeben sei ($E3_{F1}$), da ein bidirektionaler Datenfluss zwischen Zulieferer und Flugzeughersteller vorgesehen ist. Mit Frage zwei wurde eine der Kernherausforderungen von Ökobilanzen, die oftmals fehlende Datenbasis (siehe Unterabschnitt 5.2.1), adressiert. Die Datenbasis könne laut den Experten eins und zwei definitiv ein grundsätzliches Verständnis für den Gesamtprozess schaffen und zur besseren Datenverfügbarkeit beitragen. Hier gehen beide Experten jedoch auch direkt auf die praktischen Notwendigkeiten ein und nennen die Notwendigkeit einer Vertragsgrundlage ($E1_{F2}$, $E2_{F2}$). Laut Experte drei sei neben der Datenverfügbarkeit auch die Reproduzierbarkeit zu beachten ($E1_{F3}$) und ferner eine Systematisierung von z. B. der Datenablage notwendig. Mit der folgenden Leitfrage konnte evaluiert werden, inwieweit die Fokussierung auf die direkten Zulieferer als zielführend erachtet wird und Vernetzungen mit weiteren Stakeholdern ausschließlich optional im Prozessmodell vorgesehen sind. Alle drei Experten geben hier Antworten ($E1_{F3}$, $E2_{F3}$, $E3_{F3}$) mit einer großen Zustimmung für dieses Vorgehen. Dieses Vorgehen sei in der Luftfahrtindustrie auch bei technischen Spezifikationen ($E1_{F3}$) so üblich und trage laut Experte drei zur Wirtschaftlichkeit bei und ermögliche die Nutzung etablierter Kommunikationswege ($E3_{F3}$). Eine langfristige Perspektive könne jedoch die Einbindung von Materiallieferanten sein ($E2_{F3}$). Entlang der Anforderungsanalyse für das Prozessmodell wurde die Notwendigkeit zur Standardisierung hervorgehoben (siehe Unterabschnitt 5.2.1). Dies wird durch Frage fünf adressiert. Die Antworten der Experten betonen alle den hohen Bedarf zur Standardisierung und sehen hier Risiken im Hinblick auf die Vergleichbarkeit ($E1_{F4}$, $E2_{F4}$, $E3_{F4}$). Standardisierte Vorgehensweisen seien zwingend notwendig ($E1_{F4}$) und von zwei der Experten wird zudem auf das Risiko von „Greenwashing“ hingewiesen. Dies könne mit transparenten Standards verhindert werden ($E2_{F4}$, $E3_{F4}$). Hierbei wird von Experte drei jedoch darauf hingewiesen, dass eine Standardisierung nur unter der Voraussetzung einer wirtschaftlichen Umsetzbarkeit forciert werden könne ($E3_{F4}$).

Die weiteren Leitfragen adressieren, bedingt durch den anwendungsorientierten Charakter dieser Arbeit, notwendigen Voraussetzungen und Herausforderungen für die Umsetzung in der Praxis. Dazu wird in Frage fünf direkt nach notwendigen Voraussetzungen für die Implementierung gefragt. Hierbei geht Experte eins nochmals auf die vertraglichen Grundlagen ein. Diese seien die größte und wichtigste Voraussetzung und Hürde für die Implementierung (E1_{F5}). Zunächst wird dies von einem weiteren Experten unterstützt (E2_{F5}), ferner jedoch auch darauf hingewiesen, dass notwendiges Wissen und entsprechende Voraussetzungen geschaffen werden müssen. Dies sei bei allen Stakeholdern notwendig (E2_{F5}). Weitere Aspekte werden von Experte drei aufgeworfen. Es sei zwingend notwendig, die Komplexität des Prozessmodells und die Ergebnisse so darzustellen, dass Kunden und Nicht-Experten ein Verständnis entwickeln können (E3_{F5}). Zudem sei es wichtig, den Kunden der Daten zu berücksichtigen (E3_{F5}). Bedingt durch das inhärente *Information-Sharing* (siehe Unterabschnitt 5.2.1) welches durch das Prozessmodell vorgeschlagen wird, untersuchen Frage sechs und sieben die Umsetzungsbereitschaft der Zulieferer im Speziellen und aller Stakeholder im Allgemeinen. Laut Experte eins sei ein grundlegendes Verständnis der Zulieferer hinsichtlich der Notwendigkeit zur Transparenzsteigerung mit Daten vorhanden (E1_{F6}). Experte zwei zieht für die Antwort bisherige Gespräche mit Zulieferern heran, welche grundsätzlich positiv verlaufen seien. Es bestünde eine grundlegende Bereitschaft für die Umsetzung, jedoch immer unter dem Vorbehalt der Kostenneutralität (E2_{F6}) Experte drei stimmt der Herausforderung der Kosten zu und sieht grundsätzlich bei der Umsetzung mögliche Widerstände (E3_{F6}). Dennoch sei allen klar, dass es Notwendigkeiten für entsprechende Daten und deren Reporting gibt (E3_{F6}). Bezogen auf alle Stakeholder könne die Einführung von Regularien und Standards die Bereitschaft zur Umsetzung unterstützen, ferner jedoch auch das Interesse des Markts in Form der Fluggesellschaften und damit verbundene wirtschaftliche Vorteile (E1_{F7}). Für Stakeholder, mit denen die Fluggesellschaft keine direkten Verträge unterhalte, sei hier laut Experte zwei eine Herausforderung zu sehen (E2_{F7}). Experte drei stimmt dieser Sichtweise zu und hält es daher für eine notwendige Voraussetzung, Möglichkeiten der gemeinschaftlichen Erarbeitung und Diskussion in diesem Themenfeld zu etablieren (E3_{F7}). Zudem gebe es einen großen Bedarf für die Digitalisierung über den gesamten Lebenszyklus im Hinblick auf die Datenerhebung (E3_{F7}). Neben der Bereitschaft der Stakeholder wurde mit Frage acht der Aufwand für die Umsetzung des Prozessmodells in die Praxis diskutiert. Experte eins schätzt den Aufwand als hoch ein und gibt ferner zu bedenken, dass es sich um ein crossfunktionales Themengebiet handelt (E1_{F8}). Zudem seien hunderte von Zulieferern mit verschiedenen Herausforderungen zu integrieren. Dies sei in der Praxis aufwendig und langwierig (E1_{F8}). Experte zwei hält eine Schätzung für schwierig, es sei jedoch von signifikanten Investitionen auszugehen. Eine Implementierung dürfte mehrere Jahre dauern und mit großen Anstrengungen verbunden sein (E2_{F8}). Dies sei jedoch alternativlos, da eine Transparenz entlang des gesamten Lebenszyklus unerlässlich sei. Zudem gibt Experte zwei zu bedenken, dass auch bereits entwickelte und verfügbare Baugruppen bei der Aufwandsschätzung berücksichtigt werden müssten (E2_{F8}). Diese Sichtweise nimmt auch Experte drei ein. Zudem sei belastbare Schätzung ohne bestehende Verträge als schwierig einzuschätzen (E3_{F8}). Abschließend wurde mit Frage neun die Art der Modellierung evaluiert. Alle drei Experten (E1_{F9}, E2_{F9}, E3_{F9}) halten die Art der Modellierung und Darstellung für sehr hilfreich für die Praxis. Experte eins sieht insbesondere bei der Diskussion mit Zulieferern eine Stärke (E1_{F9}). Laut Experte drei würden die Modelle in der Praxis am Ende anders aussehen, aber dennoch würde diese Art der Darstellung die weitere Spezifikation unterstützen (E3_{F9}).

Ergebnisse Phasenmodell. Abschließend sollen hier die Ergebnisse der Leitfragen zum zweiten Themenkomplex dargestellt werden. Dieser stellt die Synthese mittels des vorgeschlagenen Phasenmodells dar und soll die Integration der entwickelten Artefakte in den Konfigurationsprozess unterstützen (siehe Kapitel 4). Fragen zehn und elf adressieren diese unterstützende Zielstellung. Laut aller interviewten Experten unterstützte das Phasenmodell die Integration der Artefakte in den Konfigurationsprozess der Flugzeugkabine ($E1_{F10}$, $E2_{F10}$, $E3_{F10}$). Alle drei Experten geben zudem die hohe Kundenorientierung innerhalb des Konfigurationsprozesses zu bedenken. Dies sei zudem eine Chance, denn so könne der Innovationsdruck hinsichtlich der Verbesserung der Ökobilanz auch für die Zulieferer erhöht werden ($E2_{F10}$). Experte drei gibt hier jedoch zu bedenken, dass die Anforderungen hinsichtlich der Datenqualität sowie deren Transparenz extrem hoch seien – insbesondere bei Produkten mit derartig hohen Investitionen ($E3_{F10}$). Die Analyse der Antworten zu Frage elf stützen dies. Hier sei es laut Experte eins notwendig mit den Fluggesellschaften zu kommunizieren und die Möglichkeiten innerhalb des Phasenmodells darzustellen ($E1_{F11}$). Experte drei weist hier auf die Sonderstellung der Flugzeugkabine hin (siehe Abschnitt 2.6). Hier seien die Gestaltungsfreiräume sehr hoch und eine Beratung der Kunden zwingend notwendig ($E3_{F11}$). Mit Frage zwölf werden die drei vorgeschlagenen Phasen des Phasenmodells diskutiert. Grundsätzlich sei diese Unterscheidung nachvollziehbar und für den Anwendungsfall zielführend ($E1_{F12}$, $E2_{F12}$). Experte drei gibt hier zu bedenken, dass der Konfigurationsprozess iterativ sei und über mehrere Monate dauern könnte. Daher sei der Abschluss in Phase drei noch final zu definieren, beispielsweise müsse es einen Bericht am Ende dieser Phase geben. ($E3_{F12}$). Die aufgestellte Anforderung zur Fokussierung auf Daten entlang des gesamten Phasenmodells (siehe Unterabschnitt 5.2.3) wurde mit Frage dreizehn adressiert. Hier geben alle drei Experten an, dass dies zwingend notwendig sei und einen Kernaspekt darstelle ($E1_{F13}$, $E2_{F13}$, $E3_{F13}$). Hier seien jedoch auch große Herausforderungen und Risiken zu finden ($E1_{F13}$, $E3_{F13}$). Neben diesen funktionellen Fragestellungen schlägt das Phasenmodell die Integration von verschiedenen Stakeholdern vor. Die Leitfragen vierzehn und fünfzehn adressieren diese auf Stakeholdern basierende Beschreibung. Zunächst diskutiert Frage vierzehn die Rollen der Stakeholder. Zunächst gibt Experte eins zu bedenken, dass es sich hierbei um Annahmen handeln würde, da der Prozess so noch nicht in der Praxis angekommen sei ($E1_{F14}$). Experte drei gibt zudem zu bedenken, dass unterschiedliche Interessenlagen je Stakeholder vorlägen ($E3_{F14}$). Hinsichtlich der Rolle der Zulieferer stimmen alle drei Experten überein. Dieser sei zunächst als Datenlieferant zu beschreiben ($E1_{F14}$, $E2_{F14}$, $E3_{F14}$). Die Schnittstelle zu den Fluggesellschaften sei dann der Flugzeughersteller. Dessen Aufgabe bestehe darin, die notwendigen Daten zusammenzuführen ($E2_{F14}$) und eine beratende Rolle einzunehmen ($E3_{F14}$). Die Fluggesellschaft würde innerhalb des Konfigurationsprozesses die Rahmenbedingungen hinsichtlich der Produktnutzung setzen ($E2_{F14}$). Alle Experten stimmen zudem überein, dass zunächst keine weiteren Stakeholder involviert werden sollten ($E1_{F15}$, $E2_{F15}$, $E3_{F15}$). Abschließend wurden mit Frage sechzehn notwendige Voraussetzungen für die Implementierung untersucht. Hier fokussiert Experte eins wieder die Notwendigkeit für eine ausreichende Datenbasis ($E1_{F16}$). Es sei notwendig Anfragen der Fluggesellschaften datenbasiert beantworten zu können, dies sei die Grundvoraussetzung für die Implementierung ($E1_{F16}$). Experte zwei sieht je Stakeholder verschiedene Voraussetzungen. Zunächst sei es notwendig, die Zulieferer zu befähigen, indem die Prozesse etabliert würden ($E2_{F16}$). Für die Flugzeughersteller sei es notwendig, die Transparenz hinsichtlich der Ökobilanz als Ziel zu formulieren und entsprechende Werkzeuge zur Erreichung dieses Ziels bereitzu-

stellen ($E2_{F16}$). Abschließend müssten die Entscheidungsunterstützungswerkzeuge von den Fluggesellschaften verwendet und eingefordert werden ($E2_{F16}$). Diese Sichtweise wird von Experte drei gestützt. Es sei zwingend notwendig, den Anwender (in diesem Fall die Fluggesellschaft) in den Fokus zu rücken und ein entsprechendes Stakeholdermanagement zu etablieren. Hier seien auch interne Anstrengungen notwendig, da der FCO-Prozess bereits bestünde und somit eine Anpassung der bestehenden Prozesslandschaft notwendig sei ($E3_{F16}$).

8.2.2 Evaluation der Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode

Der Evaluationsgegenstand in diesem zweiten Unterabschnitt stellt die entwickelte Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode dar. Dieser Abschnitt ist im Gegensatz zum vorherigen Abschnitt quantitativ geprägt und nutzt Teilergebnisse der bereits vorgestellten Anwendung aus Abschnitt 8.1.

Methodisches Vorgehen. Für die Evaluation der Methodik wurde ein zweiphasiges Vorgehen gewählt. Bedingt durch die Umsetzung in einem Tabellenkalkulationsprogramm wurde zunächst untersucht, inwieweit fehlerhafte Gleichungen, Bezüge oder andere typische Fehler bei derartigen Tabellen und Berechnungen ausgeschlossen werden können. Motiviert wird dieser erste Schritt durch die hohe Fehleranfälligkeit bei der Umsetzung von komplexen Berechnungen mit derartigen Programmen. Um Fehler auszuschließen, wurden die Umweltwirkungen der Treibstoffherstellung sowie der Verbrennung mit identischen Annahmen sowie Inputparametern mit der bereits vorgestellten Ökobilanzsoftware Umberto nachmodelliert und das Resultat mit den Ergebnissen aus dem Tabellenkalkulationsprogramm verglichen. Der Vergleich erfolgte dabei auf Midpoint und Endpoint Ebene. Abschließend wurde der Single Score verglichen. Damit dient dieser erste Schritt nicht der direkten Evaluation, sondern vielmehr der Sicherstellung der richtigen Umsetzung. Für die Evaluation der Methodik wurden anschließend die Ergebnisse in Form einer **Beitragsanalyse** bezogen auf die Lebensphasen mit Angaben aus der Literatur verglichen. Diese Art der Evaluation motiviert sich aus der fehlenden Vergleichbarkeit der absoluten Ergebnisse. Die Vergleichbarkeit von absoluten Ökobilanzergebnissen ist vor dem Hintergrund divergierender Annahmen und unterschiedlicher Methoden oft nur sehr eingeschränkt gegeben. Die Methode der Ökobilanz gibt Modellierern weitere Freiheitsgrade bei der Durchführung von Ökobilanzen (Unterabschnitt 3.1.5). Zudem weist Johanning auf die fehlende Anzahl an vergleichbaren Veröffentlichungen in der Flugzeugindustrie hin (Johanning 2017). Daher stellt die vergleichende Beitragsanalyse ein adäquates Vorgehen zur Erreichung der Evaluationsziele dar.

Ergebnisse. Entsprechend des methodischen Vorgehens finden sich im Anhang A.13.2 die Resultate für den Vergleich der Ergebnisse mit der Modellierungssoftware Umberto sowie der Umsetzung im Tabellenkalkulationsprogramm. Dargestellt sind Umweltwirkungen für die Treibstoffherstellung sowie dessen Verbrauch. Als Grundlage für den Vergleich wurde das bereits für die Anwendung verwendete Missionsprofil mit dessen Annahmen verwendet. Der Vergleich der Single Scores zeigt eine Abweichung von etwas unter 1 %. Erstens zeigt das Ergebnis, dass die Umsetzung im Tabellenkalkulationsprogramm erfolgreich war. Zweitens zeigt sich durch die Abweichung jedoch auch die Herausforderung einer exakt gleichen Modellierung. Die limitierten Möglichkeiten zur Modellierung der höhenabhängigen Wirkung in der Modellierungssoftware führt

bei einigen Midpoint Indikatoren (beispielsweise Ozonabbau) zu Abweichungen. Da diese durch die Gewichtung und Normalisierung jedoch nur einen sehr geringen Effekt auf den Single Score haben ist dieser nahezu identisch. Der weitere Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur wurde in Form einer übergeordneten Beitragsanalyse durchgeführt. Die von Johanning vorgestellte Studie allokiert mehr als 99 % der Umweltwirkungen auf die Betriebsphase, exkludiert jedoch die Instandhaltung (Johanning 2017). Eine weitere Analyse von Lopes kommt zu einem ähnlichen Ergebnis und allokiert auch mehr als 99 % der Umweltwirkungen auf die Betriebsphase (Lopes 2010). Die in Abschnitt 8.1 bereits vorgestellte Anwendung der hier entwickelten Methodik allokiert mehr als 97 % der Umweltwirkungen auf die Betriebsphase und kommt damit zu ähnlichen Ergebnissen wie Johanning und Lopes. Mögliche Abweichungen ergeben sich zum Beispiel durch die Anwendung verschiedener Wirkungsabschätzungsmethoden. So wurde von Johanning die ReCiPe-Methode aus 2008 verwendet, im Rahmen dieser Arbeit jedoch bereits eine aktualisierte Version aus 2016. Ferner sind die gewählten Systemgrenzen oftmals nicht vergleichbar. So kommt eine Studie aus 2008 zu dem Ergebnis, dass zwischen 75 und 81 % der Umweltwirkungen auf die Betriebsphase entfallen (Chester 2008). Hierbei wurde jedoch die Treibstoffherstellung nicht berücksichtigt. Zusammenfassend kann jedoch festgehalten werden, dass für heutige Flugzeugtypen die Umweltwirkungen mit mehr als 90 % auf die Betriebsphase zurückzuführen sind (Krieg et al. 2012). Die Ergebnisse der entwickelten Methodik entsprechen im Hinblick auf die Beitragsanalyse damit dem Stand der Wissenschaft.

8.2.3 Evaluation der softwaretechnischen Umsetzung

Dieser Unterabschnitt widmet sich dem letzten Artefakt und stellt insbesondere die Evaluation der Benutzeroberfläche vor. Entsprechend der gewählten Struktur der Evaluation wird zunächst das methodische Vorgehen dargestellt.

Methodisches Vorgehen. Im Rahmen der Evaluationsplanung wurde für das Artefakt Benutzeroberfläche der Grad der Benutzerfreundlichkeit als Evaluationsziel bestimmt. Vor diesem Hintergrund ergibt sich die Auswahl der **Nutzerstudie** als geeignete Methode. Für die Durchführung der Nutzerstudie wurden zunächst das Studiendesign festgelegt und hieraus ein Ablauf mit den folgenden drei Schritten entwickelt:

- 1) Einführung mit Aufgabenstellung
- 2) Durchführung
- 3) Fragebogen und Abschluss

Zunächst werden die Probanden mittels einer einleitenden Präsentation in die Thematik und den Kontext der Nutzerstudie eingeführt, anschließend erhalten sie die Möglichkeit zur Formulierung von offenen Fragen oder Unklarheiten. Am Ende dieser ersten Phasen wird ein Testszenario mit einer präzisen Aufgabenstellung an die Probanden verteilt. Die Aufgabenstellung beinhaltet alle notwendigen Daten zur Konfiguration einer beispielhaften Kabine, welche die Aufgabenstellung darstellt. Zudem wird jedem Probanden eine eindeutige ID zugeordnet. Mit diesen Informationen führen die Probanden die gestellte Aufgabe durch. Hierzu ist die Anwendung bereits gestartet, sodass keine technischen Probleme provoziert werden. Nach der Durchführung wird von allen

Probanden ein Fragebogen ausgefüllt. Der Fragebogen nimmt zunächst demografische Daten der Probanden auf und zur weiteren Charakterisierung sind Fragen zur Vorerfahrung mit Ökobilanzen sowie die technische Affinität (engl.: Affinity for Technology Interaction, kurz: ATI) inkludiert. Zur Bewertung der technischen Affinität wurde der standardisierte Fragebogen nach Wessel verwendet (Wessel et al. 2019). Die Quantifizierung der Benutzerfreundlichkeit erfolgte mithilfe des System-Usability-Scores (SUS). Hierzu wurde der weit verbreitete Fragebogen nach Brooke verwendet. Der Fragebogen besteht aus zehn Fragen, wobei jede Frage mit einer fünf-Punkte-Likert-Skala beantwortet wird (Brooke 1996). Neben dem vorgestellten Fragebogen wurden die Probanden während der Durchführung beobachtet und die Dauer der Durchführung protokolliert. Der vorgestellte Ablauf wurde mehrfach prototypisch durchgeführt und auf Basis der Erkenntnisse angepasst. Die Auswahl der Probanden orientiert sich an der von Krug dargestellten Feststellung, wonach die Probanden bei einer initialen Evaluation der Benutzerfreundlichkeit nicht direkt der Zielgruppe entsprechen müssen (Krug 2013).

Ergebnisse. Für die Evaluation der Benutzerfreundlichkeit wurde die Nutzerstudie mit insgesamt 21 Probanden durchgeführt (Daten der Evaluation in Anhang A.13.3). Die Testpersonen hatten zum Zeitpunkt der Studie ein Alter von 22 bis 40 Jahren mit einem durchschnittlichen Alter von 29,7 Jahren und einer Standardabweichung (SD) von 5,6. Der berufliche Hintergrund der Versuchsteilnehmer ist in den Ingenieurwissenschaften zu verorten, wobei 15 der 21 Teilnehmer als Wissenschaftler arbeiten. Die verbleibenden 6 Teilnehmer sind Studierende der Ingenieurwissenschaften. 17 der Probanden und damit mehr als 80 % geben an, keine Vorerfahrungen oder Wissen hinsichtlich der Konfiguration von Flugzeugen zu haben und 48 % der Teilnehmer haben keine Erfahrungen mit Ökobilanzen. Bedingt durch das Ziel der Evaluation sowie der bereits dargelegten Definition von Kruger sind die Probanden trotz des fehlenden Expertenwissens als geeignet für die Evaluation der Benutzerfreundlichkeit zu betrachten. Dennoch wurde bei der Einführung und der Beschreibung der Aufgabenstellung ein besonderes Augenmerk auf eine kontextbasierte Erklärung gelegt, sodass der Anwendungszweck der entwickelten Anwendung deutlich für alle Probanden war. Mit einer technischen Affinität (ATI) von durchschnittlich 4,4 (SD 0,4) zeichnen sich die Versuchsteilnehmer durch eine hohe technische Affinität aus. Als Vergleich dazu wurde von Wessel für die deutsche Bevölkerung eine durchschnittlicher ATI von 3,5 nachgewiesen (Wessel et al. 2019). Der signifikant höhere ATI der befragten Gruppe lässt sich jedoch durch den starken technischen Hintergrund erklären.

Wie in Abbildung 63 dargestellt und anhand von Bangor et al. eingeordnet zeigt sich mit einem durchschnittlichen SUS-Scale von 90,84 (SD 5,14) ein sehr guter Wert. Damit kann zunächst festgehalten werden, dass die entwickelte Benutzeroberfläche eine sehr gute Benutzerfreundlichkeit aufweist. Hierbei ist insbesondere die gute Nutzerführung durch die Strukturierung aufgefallen und die relativ geringe Komplexität für den Anwendungskontext (Item zwei im SUS-Fragebogen). Zudem zeigt sich durch Item fünf eine gute Integration der verschiedenen Funktionalitäten. Dies ist vor dem Hintergrund der Integration von Ökobilanzen in den Konfigurationsprozess von besonderer Bedeutung und als besonders positiv zu bewerten. Die durchschnittliche Dauer zur Durchführung der gestellten Aufgabe beläuft sich auf gerundet 17 Minuten. Zum einen zeigt sich hier, dass die aufgestellte Anforderung nach einer Dauer von bis zu 30 Minuten erfüllt wurde (Unterabschnitt 5.2.4). Zum anderen ist die Abweichung unter den Probanden recht hoch (SD

6:32 Minuten). Ferner wurde eine einfache Konfiguration ohne Restriktionen verwendet, sodass keine Überforderung der Versuchsteilnehmer eintritt.

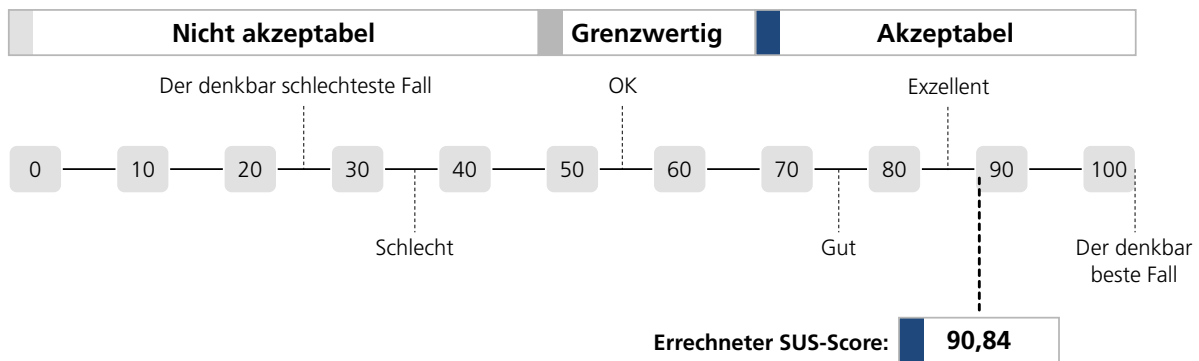


Abbildung 63: Einordnung des erreichten SUS-Score der Nutzerstudie (Einordnung und grafische Darstellung angelehnt an Bangor et al. 2009)

Weitere Erkenntnisse konnten aus der Beobachtung sowie den qualitativen Rückmeldungen der Probanden gewonnen werden. Positives Feedback wurde zur Flugzeugauswahl sowie der Konfiguration der Flugzeugkabine gegeben. Dies unterstreicht die Effizienz dieser Funktionen und bestätigt den sehr guten SUS-Score. Demgegenüber zeigten sich bei den Probanden Herausforderungen bei der Parametereingabe für den Streckenverlauf sowie bei der Bordküchenauswahl. Die Bordküchenauswahl wurde teilweise als zu komplex empfunden, da es von der einfachen Eingabe der weiteren Kabinenmodule abweicht. Hier werden erste Komplexitätstreiber von Produktkonfiguratoren bedingt durch die Produktkomplexität deutlich (Unterabschnitt 2.5.2). Weiterhin wurden die integrierten Schieberegler als nicht zwingend erforderlich empfunden.

8.2.4 Zusammenfassende Diskussion der Ergebnisse

In diesem Kapitel wurden sowohl die entwickelte Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode prototypisch mittels einer beispielhaften Flugzeugkabine angewendet als auch die entwickelten Artefakte sowie die Synthese evaluiert. Zunächst wird daher die Anwendung zusammengefasst. Darauf aufbauend werden die Ergebnisse der Evaluation zusammengefasst und diskutiert.

Die **Anwendung** fokussierte insbesondere die Durchführung der entwickelten Methodik mit einer beispielhaften Flugzeugkabine. Hierzu wurden notwendigen Daten gesammelt und darüber hinaus Annahmen getroffen. Nachfolgend konnten die notwendigen Schnittstellendokumente modelliert und dokumentiert werden. Die Anwendung der integrierten Methodik zeigt zunächst, dass eine Zusammenführung der Daten möglich ist und so der gesamte Lebenszyklus der Flugzeugkabine flexibel modelliert werden kann. Im Hinblick auf die Analyse der Ergebnisse zeigt sich ein deutlicher Schwerpunkt der Umweltwirkungen auf die Betriebsphase. Zudem lässt sich etwa die Hälfte der Umweltwirkungen auf den Midpoint Indikator *Klimawandel* allozieren. Bedingt wird dies durch die Normalisierung und Gewichtung der Verbrennung des Treibstoffs während der Betriebsphase. Abschließend soll hier die Relevanz der funktionellen Einheit *Passagierkilometer Kabine* dargestellt werden. Der Vergleich der absoluten Ergebnisse mit der funktionellen Einheit *Gesamter Lebenszyklus* zeigt, dass es zu Fehlinterpretationen kommen kann, sobald das Ergebnis

ausschließlich für den gesamten Lebenszyklus dargestellt wird. Mit der Berücksichtigung der Funktion der Kabine in Form der funktionellen Einheit *Passagierkilometer Kabine* wird dies vermieden und ein echter Vergleich von Kabinenlayouts ermöglicht.

Die **Evaluation** innerhalb dieser Arbeit erfolgte methodisch gestützt für jedes Artefakt. Ferner wurde das Phasenmodell evaluiert. Für die Evaluation des **Prozessmodells** zur Integration von Zuliefererdaten wurden Experteninterviews durchgeführt. Die Ergebnisse zeigen grundsätzlich die Praxistauglichkeit des entwickelten Prozessmodells. Es werden jedoch auch die Herausforderungen in der Praxis deutlich. So betrachtet das Prozessmodell nicht die praktischen Implikationen hinsichtlich der fehlenden vertraglichen Grundlagen sowie der notwendigen Regularien. Die Herausforderung wird zwar durch Anforderung PM-A4 adressiert, das Prozessmodell kann hier allerdings keine Lösung anbieten. Dennoch zeigen die Experteninterviews, dass die aufgestellten Anforderungen in Unterabschnitt 5.2.1 auch die Herausforderungen in der Praxis adressieren. Die Berücksichtigung der inhomogenen Zulieferstruktur (Anforderung PM-A2) und damit die Fokussierung auf direkte Zulieferer wird als sehr positiv bewertet. Zudem wird die Notwendigkeit zur Standardisierung durch die Experten gestützt (Anforderung PM-A3, PM-A6, PM-A7). Die Evaluation des **Phasenmodells** wurde, bedingt durch die konzeptionellen Ähnlichkeiten mit dem Prozessmodell (siehe Abschnitt 8.2), gemeinschaftlich durchgeführt. Für die Ergebnisse dieser Teilevaluation kann ein ähnliches Ergebnis skizziert werden. Die kundenorientierte und flexible Konzeption (Anforderung PH-A6, Anforderung PH-A5) wird durch die Experten bestätigt und sei durch das Phasenmodell gegeben. Ferner sei die starke Fokussierung auf Daten (Anforderung PH-A8) wichtig und durch das Phasenmodell gegeben.

Die entwickelte **Methodik** wurde durch den Vergleich mit Ergebnissen aus der Literatur durchgeführt. Es lassen sich jedoch auch Erkenntnisse der Experteninterviews für die weitere Diskussion dieses Artefakts nutzen. Zunächst kann jedoch festgehalten werden, dass die Beitragsanalyse im Hinblick auf die Lebenszyklusphasen ähnliche Ergebnisse wie die Literatur liefert. Ein direkter Vergleich der absoluten Ergebnisse ist hierbei jedoch nicht möglich (siehe Unterabschnitt 8.2.2). Zunächst kann die entwickelte Methodik jedoch als dem Stand der Wissenschaft entsprechend eingeordnet werden, auch wenn weitere Evaluationsstufen dies näher untersuchen müssen. Die Betrachtung der aufgestellten Anforderungen (siehe Unterabschnitt 0) und den Ergebnissen der Experteninterviews zeigt, dass diese die Herausforderungen in der Praxis adressieren. Insbesondere die Nutzung von Standards (Anforderung ÖM-A1 und ÖM-A4) wird von den Experten im Kontext des Prozessmodells bestätigt. Zudem stützen die Experten mit Ihren Einschätzungen die Notwendigkeit hinsichtlich der flexiblen Implementierung (Anforderung ÖM-A6), um eine Parametrisierung durch die Fluggesellschaften zu ermöglichen. Die Experten weisen jedoch auch auf die Notwendigkeit einer möglichst hohen Ergebnisqualität hin. Dies zeigt auch aus Sicht der Praktiker den Bedarf für weitere Evaluationsstufen über diese Arbeit hinaus.

Abschließend soll hier die durchgeführte Evaluation der **softwaretechnischen Umsetzung** diskutiert und zusammengefasst werden. Im Fokus der durchgeführten Evaluation stand die entwickelte Benutzeroberfläche sowie deren Benutzerfreundlichkeit (Anforderung SB-A1). Entsprechend dieser Zielstellung wurde eine Nutzerstudie mit 21 Probanden durchgeführt. Das Ergebnis dieser Nutzerstudie lässt sich mit dem SUS-Scale zusammenfassen. Dieser beträgt für die entwickelte Benutzeroberfläche einen errechneten Wert von 90,84. Nach Bangor et al. ist dies ein exzellentes Ergebnis, wodurch von einer hohen Benutzerfreundlichkeit ausgegangen werden kann. Ferner wurde der hohe Grad der Strukturierung innerhalb der Anwendung (Anforderung SB-A2) von den Probanden positiv bewertet. Die entwickelte Systemarchitektur sowie deren zugrundeliegenden Anforderungen (Anforderung SB-A3 und SB-A4) konnte mit der Nutzerstudie nicht evaluiert werden. Bedingt durch den Fokus dieser erscheint hier keine Evaluation notwendig. Für die Praxis sind diese Anforderungen jedoch von hoher Relevanz. Abschließend sei darauf hingewiesen, dass weitere Evaluationsstufen mit Praktikern notwendig sind, um eine abschließende Benutzeroberfläche zu entwickeln. Die Integration der Konfigurationsteams aufseiten der Flugzeughersteller sowie der Fluggesellschaften als Kunden sollte hierbei fokussiert werden.

9 Schlussbetrachtungen

Dieses abschließende Kapitel beinhaltet zunächst eine Zusammenfassung und orientiert sich hierzu an der gewählten Struktur dieser Arbeit (Abschnitt 9.1). Im Anschluss werden die Forschungsfragen abschließend aufgenommen und der Forschungsbeitrag dargestellt (Abschnitt 9.2). Zudem erfolgt in dieser Schlussbetrachtung die Untersuchung des entwickelten Ansatzes im Hinblick auf dessen Übertragbarkeit auf weitere Industriebranchen sowie Produktsysteme (Abschnitt 9.3). Ferner beinhaltet Abschnitt 9.4 eine kritische Reflexion und die Grenzen des entwickelten Ansatzes werden resümiert. Das Kapitel schließt mit einem Ausblick und zeigt weitere Desiderate im Kontext der aufgezeigten Forschungsfelder.

9.1 Zusammenfassung

Ziel dieser Arbeit war die Entwicklung einer Systematik zur ökologischen Bewertung von Flugzeugkabinen zur Integration in den Konfigurationsprozess unter Verwendung von Lebenszyklusdaten. Motiviert wurde diese Arbeit durch die gesteckten ökologischen Ziele der gesamten Luftfahrtindustrie sowie die steigende gesellschaftliche Diskussionsbereitschaft im Hinblick auf eine ökologische Mobilität. Ausgehend von diesen Rahmenbedingungen sind neben technologischen Innovationen auch Maßnahmen zur Steigerung der Transparenz sowie der integrierten ökologischen Entscheidungsfindung entlang der gesamten Wertschöpfungskette innerhalb der Luftfahrtindustrie notwendig.

Auf Basis dieser Ausgangssituation sowie der abgeleiteten Zielstellung wurde in dieser Arbeit ein Ansatz zur Integration von Ökobilanzen in den Konfigurationsprozess von Flugzeugkabinen entwickelt. Die Systematik fokussiert hierzu die Integration von Zuliefererdaten mit dem Ziel den gesamten Lebenszyklus modellieren zu können. Folglich wurden für den konzeptionellen Rahmen dieser Arbeit folgende drei Forschungs- und Entwicklungsschwerpunkte definiert:

- 1) Die Untersuchung von Möglichkeiten zur Integration von Zulieferern sowie deren Daten mit dem Ziel eine ausreichende Datenbasis zu gewährleisten.
- 2) Die Entwicklung einer spezifischen und parametrisierbaren Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode, welche eine Modellierung der Betriebsphase sowie Aggregation von Lebenszyklusdaten ermöglicht.
- 3) Die anwendungsorientierte Untersuchung und Entwicklung einer softwaretechnischen Umsetzung, sodass eine Operationalisierung ermöglicht wird. und ferner die Konzeption einer Synthese, welche die Implementierung der Systematik in den Konfigurationsprozess erlaubt.

Das Vorgehen für diese Arbeit orientierte sich an den Problemlösungsprozess des DSR, innerhalb dessen verschiedene wissenschaftliche Methoden angewendet werden konnten. Als Einstiegspunkt für den DSR-Prozess wurde der problemzentrierte Startpunkt gewählt. Kapitel 1 leitete dazu das Thema dieser Arbeit in Form einer Motivation her. Dazu wurden insbesondere die Herausforderungen der Luftfahrtindustrie im Hinblick auf die ökologische Transformation fokussiert. Zudem

konnten die Ergebnisse einer eigens durchgeführten Umfrage unter Passagieren die gesellschaftliche Diskussionsbereitschaft zu ökologischen Themen in der Luftfahrtindustrie belegen. Kapitel 1 nahm außerdem eine Eingrenzung des Themas vor und ferner wurden der gewählte DSR-Prozess sowie die eingesetzten Methoden innerhalb der Schritte des DSR anhand der Struktur dieser Arbeit vorgestellt. Kapitel 2 stellte die Grundlagen zum System Flugzeug und zu Konfigurationsprozessen vor. Es wurden zunächst der typische Lebenszyklus in der Luftfahrtindustrie sowie der Aufbau der Wertschöpfungskette dargestellt. Ferner wurde der Begriff der Lebenszyklusdaten für diese Arbeit definiert. Es erfolgte zudem die Strukturierung und Modularisierung von Verkehrsflugzeugen anhand bestehender Gliederungsebenen. Weiterhin stellte Kapitel 2 das Konzept des *Mass Customization* vor, welche die strategische Grundlage für die Individualisierung und Konfiguration von Produkten darstellt und damit den Bedarf von Produktkonfigurationsprozessen initiiert. Schließlich wurden der in dieser Arbeit betrachtete Konfigurationsprozess von Flugzeugkabinen dargestellt und die Spezifika erläutert. Kapitel 3 stellte zunächst die methodischen Grundlagen von Ökobilanzen vor. Hierzu erfolgten sowohl eine Abgrenzung der Methode als auch die Vorstellung der Vorgehensweise sowie die Darstellung der Anwendungsfelder. Außerdem wurde in diesem Kapitel die Methode kritisch betrachtet. Darauf aufbauend wurde in diesem Kapitel ferner der Stand der Forschung zu Ökobilanzierungen in der Luftfahrtindustrie präsentiert. Grundlage dieses Standes der Forschung stellte die durchgeführte systematische Literaturanalyse dar. Abschließend konnten verfügbare und für die spätere Entwicklung notwendige Datenquellen zur Umweltbewertung innerhalb der Luftfahrtindustrie identifiziert werden.

Kapitel 4 leitete auf Basis der Zielstellung sowie der dargestellten Grundlagen den konzeptionellen Rahmen dieser Arbeit her, sodass konkrete Forschungsfragen für diese Forschungsarbeit formuliert werden konnten. Auf der Basis dieses konzeptionellen Rahmens konnten anschließend die zu entwickelten Artefakte identifiziert werden. Diese stellen erstens das Prozessmodell zur Integration von Zuliefererdaten, zweitens eine parametrisierbare und integrierte Ökobilanzmethodik für Flugzeugkabinen sowie drittens eine prototypische softwaretechnische Umsetzung mit dem Ziel der Operationalisierung dar. Ferner wurde für die Synthese ein Phasenmodell, welches die Implementierung in den Konfigurationsprozess fokussiert, in den konzeptionellen Rahmen aufgenommen. Kapitel 5 diente zunächst zur weiteren Absicherung des identifizierten Anwendungsfalls und bewertete dessen Potenzial. Weiterhin wurden für die identifizierten Artefakte sowie die Synthese dieser Arbeit Anforderungen hergeleitet. Die Definition dieser Anforderungen erfolgte methodisch gestützt unter Einbezug der industriellen Praxis.

In Kapitel 6 wurden die Artefakte methodisch gestützt und auf Basis der Anforderungen entwickelt. Zunächst erfolgte dazu in Abschnitt 6.1 die Definition von übergeordneten Systemgrenzen anhand des bereits eingeführten Lebenszyklus für die Luftfahrtindustrie. Abschnitt 6.2 widmete sich anschließend der Entwicklung des Prozessmodells zur Integration von Zuliefererdaten. Hierzu wurde für die Ableitung möglicher Varianten unter anderem eine Interaktionsmatrix aufgestellt. In Abschnitt 6.3 wurde die integrierte Methodik für die Flugzeugkabine entwickelt. Die Entwicklung des Phasenmodells erfolgte in Abschnitt 6.4. In Kapitel 7 erfolgt die Darstellung der softwaretechnischen Umsetzung. Dieses letzte Artefakt stellte im Sinne des DSR-Prozesses den Abschluss der Entwicklungsphase dar.

Die Demonstration bzw. Anwendung sowie die Evaluation der Artefakte erfolgte in Kapitel 8 dieser Arbeit. In Abschnitt 8.1 wurde für die Anwendung der Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode zunächst eine Referenzkabine vorgestellt und darauf aufbauend die entwickelte Methodik parametrisiert und anschließend die Ergebnisse vorgestellt. Die Evaluation der Artefakte sowie der Synthese erfolgten methodisch gestützt durch das Vorgehensmodell von Venable et al. (Venable et al. 2012). Mit der Kommunikation der Ergebnisse wurden damit die sechs Schritte des DSR-Prozesses vollumfänglich durchlaufen.

Die Ergebnisse dieser Arbeit zeigen, dass die ökologische Bewertung von Flugzeugkabinen innerhalb des Konfigurationsprozesses möglich ist und mittels der entsprechenden Daten der Zulieferer der gesamte Lebenszyklus einer Flugzugkabine modelliert werden kann. Die entwickelte Systematik zeigt somit, wie die Methode der Ökobilanz in der Luftfahrtindustrie einen kurzfristigen Beitrag zur Erreichung der gesteckten ökologischen Ziele leisten kann. Im folgenden Abschnitt wird überdies der Beitrag für die Forschung dargestellt und die aufgestellten Forschungsfragen werden abschließend aufgegriffen.

9.2 Forschungsbeitrag und Forschungsfragen

Diese Arbeit folgte den in Kapitel 4 aufgestellten Forschungsfragen und dem daraus hergeleiteten konzeptionellen Rahmen. In diesem abschließenden Kapitel sollen die Forschungsfragen hier aufgegriffen und zusammenfassend beantwortet werden. Die forschungsleitende und damit zentrale Fragestellung dieser Arbeit lautete:

Wie kann eine systematische und prozessintegrierte ökologische Bewertung innerhalb des Konfigurationsprozesses von Flugzeugkabinen erfolgen?

Diese zentrale und forschungsleitende Fragestellung zielte auf eine systematische Untersuchung des Betrachtungsgegenstandes ab und führte zum aufgestellten konzeptionellen Rahmen. Dieser prägte die weitere Struktur dieser Arbeit und zeigte die Interdisziplinarität, welche für die Bearbeitung und abschließenden Beantwortung dieser Fragestellung notwendig war. Die Erkenntnisse dieser Arbeit zeigen, dass eine Integration nur möglich ist, wenn die verschiedenen Herausforderungen der tangierenden Bereiche berücksichtigt werden. Hierzu gehören die Forschungsfelder der ökologischen Bewertung von komplexen Produktsystemen, die kooperative Datenbereitstellung in Wertschöpfungsnetzen sowie die Produktkonfiguration mit integrierten Bewertungsmethoden. Die vorgestellte Systematik in dieser Arbeit zeigt, wie eine systematische und prozessintegrierte Bewertung innerhalb des Konfigurationsprozesses von Flugzeugkabinen ermöglicht werden kann. Die konsequente Erforschung und Entwicklung der Teilbereiche innerhalb des konzeptionellen Rahmens stellt einen Forschungsbeitrag über den Anwendungsfall in der Luftfahrtindustrie hinaus dar und liefert damit einen maßgeblichen Beitrag zu dem adressierten wissenschaftlichen Desiderat dieser Arbeit. Für den Forschungsprozess gliederte sich die zentrale Forschungsfrage in weitere Betrachtungsgegenstände (siehe Abschnitt 9.1) mit dezidierten Forschungsfragen. Anschließend folgt daher eine Würdigung der Ergebnisse dieser Arbeit im Hinblick auf die Beantwortung dieser Forschungsfragen.

Wie können die notwendigen Lebenszyklusdaten standardisiert für den gesamten Lebenszyklus von Flugzeugkabinen erfasst und aggregiert werden, sodass eine ausreichende Datenbasis für die Ökobilanzierung besteht?

Diese Forschungsfrage lässt sich wie in Abschnitt 1.2 eingeführt dem Forschungsfeld der kooperativen Datenbereitstellung in Wertschöpfungsnetzen zuordnen. Im Rahmen dieser Arbeit konnte hier ein Beitrag durch die Entwicklung des ersten Artefakts, des Prozessmodells, geleistet werden. Das Prozessmodell verdeutlicht, welche Herausforderungen im Hinblick auf die Kooperation der Stakeholder sowie der notwendigen Standardisierung bestehen. Hierbei konnte gezeigt werden, dass ein Cradle-to-Gate Ansatz mit einer standardisierten Schnittstelle sowie methodischen Vorgaben zu einer ausreichenden Datenbasis beitragen. Dies gilt im Besonderen für Phasen (z. B. Phase der Produktion), bei denen es einem Flugzeughersteller aufgrund der geringen Fertigungstiefe an Daten mangelt. Weiterhin konnten durch die empirische Ermittlung der Anforderungen Erkenntnisse hinsichtlich der Anforderungen für das *Information-Sharing* gesammelt werden. Von hoher Relevanz sind hier die Themenbereiche Datenschutz und die Schaffung von Anreizen für alle Stakeholder (siehe Unterabschnitt 5.2.1). Hier bietet diese Arbeit mit der Fokussierung auf einen dezentralen Modellierungsansatz eine Möglichkeit, ohne Bedenken hinsichtlich des Datenschutzes außer Acht zu lassen.

Wie kann die Ökobilanz von Flugzeugkabinen mittels einer parametrisierbaren Methodik vereinfacht werden, sodass eine direkte Integration in den Konfigurationsprozess ermöglicht wird?

Forschungsfrage zwei adressiert zum einen das Ziel der ökologischen Bewertung von Flugzeugkabinen und durch die Parametrierbarkeit den Anwendungskontext des Konfigurationsprozesses. Bedingt durch die hohe Komplexität der Kabine lässt sich diese Forschungsfrage dem Forschungsfeld der ökologischen Bewertung von komplexen Produktsystemen zuordnen (siehe Abschnitt 1.2) und liefert hier einen konkreten und anwendungsorientierten Beitrag zum Stand der Forschung. Die entwickelte Methodik zur Integration von Ökobilanzen (Artefakt zwei) zeigt, wie Methodiken für komplexe Produktsysteme entwickelt werden können: Die Methodik wurde durch Zerlegung in drei Module gegliedert und beginnt zunächst mit der Definition von notwendigen Benutzereingaben (z. B. Passagierauslastungsfaktor der Kabine). Dies erlaubt eine Parametrierbarkeit der Methodik, insbesondere für die Phase des Betriebs. Modul zwei stellt die Sachbilanz auf und nimmt die Wirkungsabschätzung vor. Hierzu werden die luftfahrtspezifischen Datenbanken verwendet und in die Methodik integriert. Das abschließende dritte Modul adressiert die Aggregation der Ergebnisse mit den Zuliefererdaten.

Wie kann die Systematik zur ökologischen Bewertung von Flugzeugkabinen in ein Produktkonfigurationssystem integriert werden, sodass die Operationalisierung ebendieser unterstützt wird?

Mit der dritten Forschungsfrage wurde der anwendungsorientierte Charakter dieser Arbeit adressiert, um eine spätere Operationalisierung zu ermöglichen. Konkrete Forschungsarbeiten zur Integration von Ökobilanzen in den Konfigurationsprozess der Luftfahrtindustrie existierten zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit nicht (siehe Unterabschnitt 2.5.2) und mit der Beantwortung dieser letzten Forschungsfrage konnte diese Lücke geschlossen werden. Zunächst zeigt mit der

softwaretechnischen Umsetzung, dass eine Integration IT-gestützt erfolgen muss. Dies bedingt sich durch die hohe Produktkomplexität sowie der Parametrierbarkeit der Methodik und den damit verbundenen Rechenoperationen zur Erstellung der Sachbilanz. Von besonderer Bedeutung ist ein hoher Grad an Strukturierung entlang des gesamten Konfigurations- und Bilanzierungsprozesses, um die inhärente Produkt- und Prozesskomplexität beherrschbar zu machen. Mit Artefakt drei zeigt diese Arbeit, wie dies möglich und praktisch umsetzbar ist. Ferner wird das Phasenmodell als weiteres unterstützendes Werkzeug vorgeschlagen. Dieser Bereich der Arbeit lässt sich dem Forschungsfeld von Produktkonfiguration und integrierten Bewertungsmethoden zuordnen (siehe Abschnitt 1.2) und hier einen Beitrag für die Integration von ökologischen Aspekten in den Konfigurationsprozess von komplexen Produktsystemen. Der Beitrag geht hier über die Flugzeugkabine hinaus, zeigt jedoch gleichzeitig eine Möglichkeit zur konkreten Umsetzung.

Ausgehend von der konkreten Beantwortung der Forschungsfragen stellen sich für dieses letzte Kapitel jedoch die Frage der Übertragbarkeit sowie der Grenzen des entwickelten Ansatzes. Daher sollen beide Bereiche nachfolgend adressiert und weiter ausgeführt werden.

9.3 Übertragbarkeit des entwickelten Ansatzes

Der Anwendungskontext dieser Arbeit fokussierte speziell die Anwendung der entwickelten Systematik in der Luftfahrtindustrie. Während die zugrundeliegenden Anforderungen sowie die Auslegung der Artefakte daher insbesondere die Flugzeugkabinen mit deren Randbedingungen berücksichtigen, lassen sich die entwickelten Ansätze auf andere Betrachtungsgegenstände und Branchen übertragen. Nachfolgend soll die Übertragbarkeit bewertet werden. Hierbei wird nach der unmittelbaren sowie mittelbaren Übertragbarkeit unterschieden.

Unmittelbare Übertragbarkeit. Flugzeuge und insbesondere deren Kabinen lassen sich als Verkehrsmittel mit anderen Verkehrsmitteln vergleichen. Für die Bewertung der Übertragbarkeit des entwickelten Ansatzes werden hier die beiden Verkehrsmittel *Personenzüge* und *Personenbusse* für den öffentlichen Verkehr herangezogen. Dies bedingt sich durch eine funktionelle sowie konzeptionelle Ähnlichkeit im Hinblick auf den Innenraum (Kabine, Fahrgastraum, Innenraum). Zunächst werden diese Verkehrsmittel bzw. deren Konfigurationsprozesse daher einem qualitativen Vergleich mittels eines morphologischen Kastens unterzogen. Die Methode des morphologischen Kastens ist als Kreativitätstechnik bekannt und zerlegt komplexe Sachverhalte in abgrenzbare Teile und ermöglicht dadurch eine Kombination der Teilsysteme (Schlicksupp 2004). Die Methode kann durch die Zerlegung jedoch auch für den Vergleich von (technischen) Systemen oder Prozessen verwendet werden. Das Ergebnis ebendieser Anwendung ist für den Konfigurationsprozess der dargestellten Transportmittel in Abbildung 64 dargestellt. Zunächst zeigen sich für das Flugzeug, den Personenzug sowie den Bus übergeordnete Ähnlichkeiten. Alle drei verglichenen Mobilitätsmittel sowie deren Konfigurationsprozesse lassen sich als Business-to-Business (B2B) Modelle charakterisieren. Ferner ist der Konfigurationsgegenstand gleich und als Fahrgast- bzw. Passagierkabine zu bezeichnen. Unterschiede lassen sich in der Praxis jedoch bei den regulatorischen Anforderungen feststellen. Wie bereits im Zuge dieser Arbeit ausgeführt, ist die Luftfahrtindustrie hier gesondert mit komplexen Zulassungshürden konfrontiert. Dies bedingt die begrenzten Möglich-

keiten zur Individualisierung. Der Komplexitätsgrad des Konfigurationsprozesses ist bei Flugzeugkabinen darüber hinaus als relativ hoch im Vergleich zu Bussen zu beurteilen. Die Konfiguration der Fahrgastkabinen in Zügen ist mit einer mittleren Komplexität zu beurteilen. Alle drei Konfigurationsprozesse sind bedingt durch den B2B-Charakter als stark strukturiert zu bewerten, jedoch mit einer unterschiedlich hohen Anzahl an Einflussfaktoren. Die Lebensdauer divergiert zudem, auch wenn bei allen drei Transportmitteln Anpassungen während des Lebenszyklus im Hinblick auf den Passagierraum vorgenommen werden.

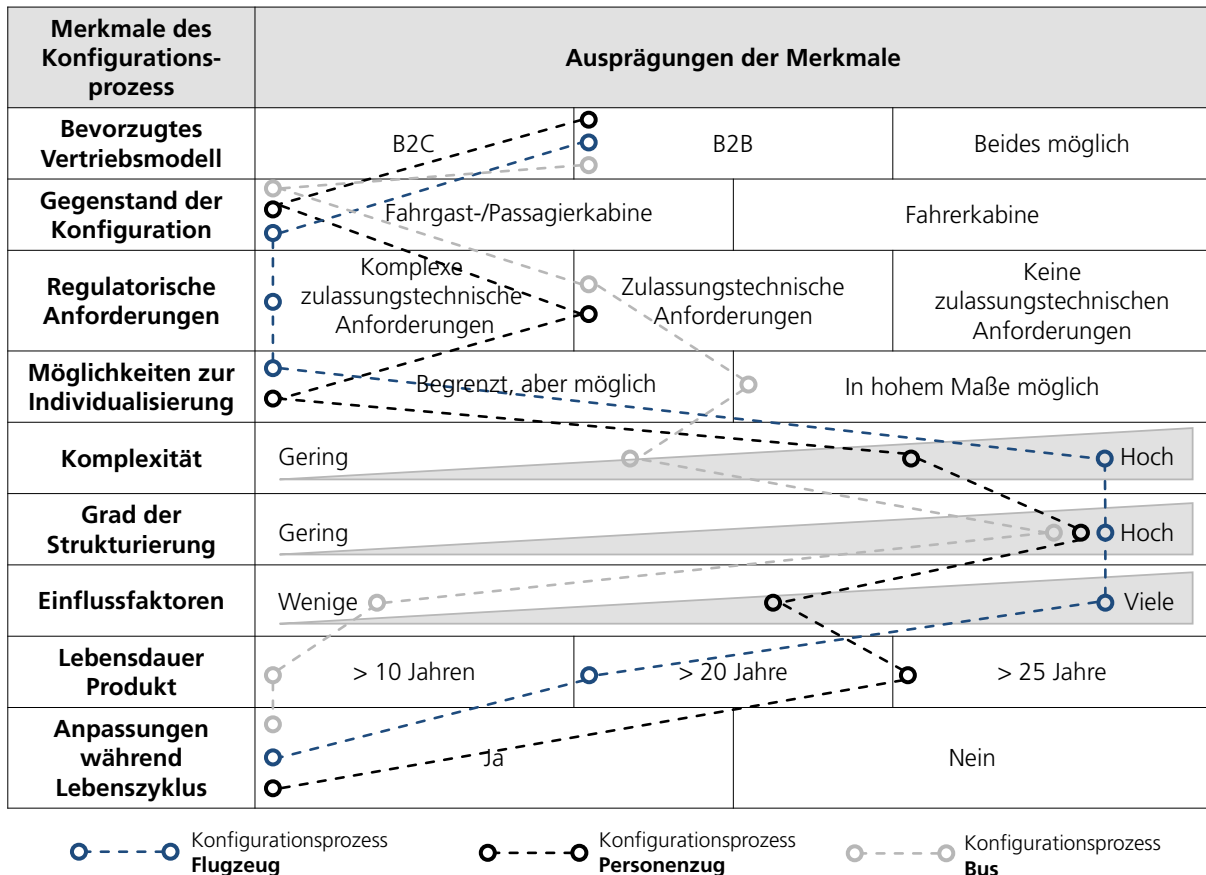


Abbildung 64: Morphologie für den Vergleich verschiedenerer Konfigurationsprozesse

Der Vergleich zeigt gewisse Ähnlichkeiten der Konfigurationsprozesse. Eine Übertragbarkeit des entwickelten Gesamtansatzes ist zwar näher zu untersuchen, durch die konzeptionellen Ähnlichkeiten jedoch möglich. Notwendige Anpassungen betreffen insbesondere die speziell für die Kabine entwickelte Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode. Die luftfahrtspezifischen Parameter, Berechnungen sowie Datenquellen für die Betriebsphase sind für das jeweilige Transportmittel anzupassen und zu ersetzen. Andere berücksichtigte Faktoren, wie zum Beispiel der Passagierauslastungsfaktoren, können und sollten übertragen werden. Ferner ist die funktionelle Einheit bezogen auf den Passagier/Fahrgast als übertragbar zu erachten. Abschließend sind das entwickelte Prozessmodell sowie das Phasenmodell unabhängig vom Betrachtungsgegenstand der Kabine nutzbare Artefakte und sowohl die Übertragbarkeit als auch die praktische Anwendung in anderen Industrien und Produktsystemen ist gegeben. Hieraus folgend gibt der nächste Abschnitt einen Einblick in die mittelbare Übertragbarkeit.

Mittelbare Übertragbarkeit. Neben der beschriebenen unmittelbaren und damit direkten Übertragbarkeit lässt sich die Übertragbarkeit auch auf mittelbarer Ebene darstellen. Für komplexe Investitionsgüter im Kontext von B2B Beziehungen werden auch zukünftig Konfigurationsprozesse notwendig sein. Die Integration von ökologischen Gesichtspunkten in diese Entscheidungsprozesse wird in Zukunft immer mehr Einzug halten. Erste Ansätze zeigen sich zum Beispiel bei der Auswahl von Nutzfahrzeugen (Volvo Group 2023). Der entwickelte konzeptionelle Rahmen dieser Arbeit kann bei derartigen integrierten Systematiken die Operationalisierung unterstützen, da die Herausforderungen bei komplexen Produktsystemen als ähnlich zu beurteilen sind. So ist die Integration von Zulieferern zum Zwecke der Datenbereitstellung mit dem entwickelten Prozessmodell möglich und fokussiert damit eine typische Herausforderung. Ferner ist die Integration in Konfigurationsprozesse mit dem Phasenmodell möglich. Die entwickelte Systematik mitsamt der Artefakte lässt sich somit auf andere komplexen Produktsysteme mit Konfigurationsprozessen übertragen. Hierbei stellt auch der hergeleitete Anforderungskatalog je Artefakt einen möglichen Ausgangspunkt für Wissenschaftler und Praktiker mit ähnlichen Zielstellungen dar.

9.4 Grenzen des entwickelten Ansatzes sowie kritische Reflexion

In den Abschnitten 9.1 und 9.2 wurden eine Zusammenfassung dieser Arbeit sowie die Übertragbarkeit und damit die Potenziale für weitere Anwendungsfelder der entwickelten Systematik dargestellt. Die Abschnitte zeigen zum einen die Möglichkeit zur Integration in der Luftfahrtindustrie und zum anderen die Möglichkeit zur Übertragbarkeit des Ansatzes auf weitere komplexe Produktsysteme. Dennoch sind der Systematik auch Grenzen gesetzt. Diese sollen hier in Zusammenhang mit einer kritischen Reflexion des Vorgehens dieser Arbeit dargestellt werden.

Zunächst lässt sich feststellen, dass die aufgestellten Anforderungen an die Artefakte mit einigen Ausnahmen erfüllt werden. Es zeigt sich jedoch auch, dass dem entwickelten Prozessmodell Grenzen hinsichtlich dem gesamten Themenkomplex Vertraulichkeit von Daten (Anforderung PM-A4) gesetzt sind. Diese Anforderung ließ sich mit dem gewählten Ansatz zur Modellierung nicht abbilden und ist vielmehr im Rahmen einer industriellen Umsetzung von größter Bedeutung. Für die entwickelte Methodik zeigen sich aufgrund der fehlenden Referenzwerte Grenzen bei der Evaluation der absoluten Ergebnisse (Anforderung ÖM-A6). Abhilfe konnte hier jedoch die Verwendung der Beitragsanalyse und der Vergleich mit der einschlägigen Literatur schaffen (Unterabschnitt 8.2.2). Das Phasenmodell sieht zwar eine Rückkopplungsschleife zu Entwicklungs- und Designprozessen vor (Anforderung PH-A7), dennoch sind dem Phasenmodell hier Grenzen gesetzt. Dies bedingt sich insbesondere durch die Fokussierung auf den Konfigurationsprozess innerhalb dieser Arbeit. Des Weiteren sind die in Konfigurationsprozessen notwendigen Plausibilitätsprüfungen nicht integriert worden und die Flugzeugkabine wurde im Rahmen dieser Arbeit auf die Hauptkomponenten beschränkt. Die aufgestellten Anforderungen an die prototypische softwaretechnische Umsetzung konnten erfüllt und auch evaluiert werden (Unterabschnitt 8.2.3). Es sei hier jedoch für die weitere Umsetzung in der Praxis auf die beschriebenen Schwierigkeiten und Herausforderungen in bei derartigen Projekten hingewiesen (Unterabschnitt 2.5.2).

Darüber hinaus sind unabhängig von den hier aufgestellten Anforderungen die generellen methodischen Grenzen von Ökobilanzen zu nennen. Ökobilanzen dienen zur Steigerung der Transparenz und quantifizieren die Umweltwirkungen von Produkten oder Dienstleistungen. Zu einer Verbesserung der Umweltbilanz führt dies zunächst nicht. Somit ist die Implementierung der Ergebnisse aus den Ökobilanzen in entsprechende Entscheidungsprozesse notwendig. Schließlich ist das bereits in Unterabschnitt 3.1.5 beschriebene Problem der Vergleichbarkeit von Ökobilanzen zu nennen: Zum einen für die Gesamtergebnisse, zum anderen auch für die Ergebnisse der Zulieferer. Trotz des entwickelten Schnittstellendokuments sowie der Richtlinie zur Wirkungsabschätzung (Unterabschnitt 6.2.4) sind innerhalb der Modellierung Freiheitsgrade und damit Unterschiede möglich. Hier zeigt sich besonders deutlich eine Diskrepanz zwischen der theoretischen Vergleichbarkeit und den großen Herausforderungen in der Praxis.

Neben den dargestellten Grenzen soll die kritische Reflexion anhand der in Abschnitt 1.4 bereits eingeführten DSR-Leitlinien von Hevner et al. (2004) erfolgen (Hevner et al. 2004): Leitlinie 1 stellt das Ergebnis des DSR-Prozesses heraus. Als Ergebnisse werden Artefakte definiert, welche unter anderem Konzepte, Modelle und Verfahren sein können. Die Artefakte dieser Arbeit wurden auf Basis des konzeptionellen Rahmens dargestellt und durchgängig von der Anforderungsermittlung bis hin zur Evaluation betrachtet. Dennoch erscheint es sinnvoll die Interdependenzen über die durchgeführte Analyse hinaus weiter zu untersuchen. Leitlinie 2, die Problemrelevanz, wurde mit Kapitel 1 dieser Arbeit hinreichend belegt und zudem mit der Potenzial- sowie Bedarfsanalyse in Kapitel 5 gestützt. Mit Leitlinie 3 wird die Evaluation als wichtiger Aspekt während der Anwendung des DSR-Prozesses hingewiesen. Die Evaluation der Artefakte erfolgte im Rahmen dieser Arbeit unterstützt durch das Vorgehensmodell von Venable et al. Dennoch werden zukünftig weitere Ressourcen für die Evaluation der Systematik aufzubringen sein. Zum einen werden alle Stakeholder inklusive Fluggesellschaften und Zulieferer in die Evaluation einzubinden sein. Möglicherweise werden hierdurch neue Erkenntnisse und Anforderungen aus der Praxis zu weiteren Iterationsschleifen entsprechend dem DSR-Prozess führen. Zum anderen stellen Sensitivitätsstudien und die Integration von Modellierungsexperten bei der weiteren Evaluation der Ökobilanz einen sinnvollen nächsten Schritt dar. Leitlinie 4 fokussiert einen klaren Forschungsbeitrag. Dies wurde durch die Identifikation der relevanten Forschungsfelder in Abschnitt 1.2 sowie der abschließenden Diskussion im letzten Abschnitt dieser Arbeit sichergestellt. Mit Leitlinie 5 beschreiben Hevner et al. die Relevanz von fundierten wissenschaftlichen Methoden innerhalb des DSR-Prozesses. Diese Leitlinie ist rückblickend als essenziell für die Entwicklung der Artefakte im Rahmen dieser Arbeit zu bezeichnen. Der Einsatz der in Abschnitt 1.5 dargestellten Methoden hat die Gestaltung der Artefakte sowie deren Evaluation maßgeblich geprägt. Dennoch sei auch hier auf die inhärenten Schwächen einzelner Methoden hingewiesen. Zu nennen ist insbesondere die Subjektivität bei dem Einsatz von Methoden zur multikriteriellen Entscheidungsanalyse oder den Experteninterviews. Der ausführliche Stand der Forschung sowie die Durchführung einer systematischen Literaturanalyse und die Beachtung der Restriktionen innerhalb des Konfigurationsprozesses von Flugzeugkabinen tragen insbesondere zur Leitlinie 6 bei. Die Leitlinie stellt die Lösungssuche unter Berücksichtigung bestehender Ressourcen und Rahmenbedingungen in den Fokus. Die letzte Phase des DSR-Prozesses ist wortgleich mit der aufgestellten Leitlinie 7 und fokussiert die Kommunikation der Ergebnisse. Wie bereits in der Zusammenfassung dieser Arbeit erwähnt erfolgt dies primär durch diese Schrift sowie die bereits veröffentlichten wissenschaftlichen Beiträge zum

Themenkomplex dieser Arbeit. Zudem tragen die angemeldeten Patente zu einer hohen Sichtbarkeit in der Praxis bei. Zahlreiche Vorträge in Forschung und Praxis leisteten außerdem einen Beitrag zur Leitlinie 7. Relevante Veröffentlichungen und Patente sind in Anhang A.2 dieser Arbeit aufgelistet.

9.5 Ausblick

Die Integration einer ökologischen Perspektive in den Konfigurationsprozess von komplexen Investitionsgütern ermöglicht einen transparenten Vergleich verschiedener Konfigurationen im Hinblick auf die ökologische Dimension des Nachhaltigkeitsdreiecks. Das methodische Gerüst hierfür wird auch zukünftig die Methode der Ökobilanz sein. Der hier vorgestellte Ansatz für die Konfiguration von Flugzeugkabinen zeigt, dass auch in komplexen Produktsystemen eine Integration möglich ist. Dabei müssen jedoch Vereinfachungen vorgenommen werden und die Systemgrenzen sind zudem eng zu ziehen. Dies wird bedingt durch die heute weiterhin fehlende vollständige digitale Abbildung der Flugzeugkabine über den gesamten Lebenszyklus hinweg notwendig. Die weiter fortschreitende digitale Abbildung von Produkten durch Konzepte wie digitalen Zwillingen wird kurz- und mittelfristig die Datenbasis weiter verbessern und so eine deutlich detailliertere Konfiguration ermöglichen. Die Umsetzung erfordert jedoch ein durchgängiges Komplexitätsmanagement und die Weiterentwicklung durch verschiedenste Experten in der Luftfahrtbranche. Diese notwendigen Weiterentwicklungen sowie Problemstellungen lassen sich anhand der relevanten Forschungsfelder sowohl allgemein als auch spezifisch für den Anwendungsfall darstellen.

Die kooperative Datenbereitstellung und damit die Integration von Zulieferern ist in der Praxis weiterhin als große Herausforderung zu sehen. Inwieweit eine Bereitstellung der notwendigen Daten für eine vollständige Ökobilanz erfolgt, ist nicht abschließend geklärt. Die Akzeptanz aller Zulieferer zur Anwendung des entwickelten Ansatzes wird in der Praxis weiter untersucht werden müssen. Regulatorische Eingriffe und ferner die Gestaltung von Anreizsystemen zur Schaffung von Vorteilen werden dazu einen Beitrag leisten. Im Hinblick auf den standardisierten Austausch von Lebenszyklusdaten werden zukünftige Forschungsarbeiten technische sowie organisatorische Randbedingungen schaffen und neue Ansätze für den Datenaustausch untersuchen (Rolinck et al. 2021). Notwendig wird hier eine intensive und interdisziplinäre Zusammenarbeit der entsprechenden Fakultäten sein, beginnend mit Experten zu Ökobilanzierung bis hin zur Involvierung von Rechtswissenschaftlern zur Klärung der rechtlichen Rahmenbedingungen.

Für die Anwendung von Ökobilanzen innerhalb eines Produktkonfigurationsprozesses werden für Produktsysteme zunehmend vereinfachte und parametrisierbare Ökobilanzierungsmethoden Einzug halten. Die erfolgreiche Einführung hängt von der zielgerichteten Kommunikation und Darstellung der Ergebnisse ab. Zukünftige Forschungsarbeiten werden entsprechend einen Beitrag zur weiteren Vereinfachung der Methode beitragen müssen und damit zur Erhöhung der Akzeptanz beitragen. Spezifisch für die Luftfahrtindustrie wird die methodische Aufgabe darin bestehen neue technologische Entwicklungen wie elektrische Antriebe und neuartige Treibstoffe hinsichtlich der Umweltbilanz bewertbar zu machen. Diese Modellierungen werden mit hohen Unsicherheiten verbunden sein, sodass auf Szenarien basierende Methoden und Modelle notwendig sein

werden. Dies bildet die Grundlage zur Integration von Ökobilanzen in weitere Entscheidungs- und Geschäftsprozesse entlang der gesamten Wertschöpfungskette in der Luftfahrtindustrie.

Schließlich stellt die Integration von Bewertungsmethoden in den Produktkonfigurationsprozess einen kritischen Erfolgsfaktor dar. Der entwickelte konzeptionelle Rahmen dieser Arbeit kann hierzu als Metamodell dienen und als Ausgangspunkt für andere Forscher dienen. Dennoch werden weitere Forschungsarbeiten mittels Fallbeispielen und allgemeinen Leitfäden zur Anwendung in anderen Bereichen beitragen müssen. Für den konkreten Anwendungsfall des Konfigurationsprozesses der Flugzeugkabine ist die vollständige Abbildung des Nachhaltigkeitsdreiecks für zukünftige Erweiterungen zu fokussieren. Ökonomische Aspekte werden auch weiterhin eine entscheidende Rolle bei der Konfiguration von Flugzeugkabinen spielen. Entsprechend werden Fluggesellschaften Beratungs- und Entscheidungssysteme von den Flugzeugherstellern einfordern. Ferner ist zu untersuchen, wie soziale Aspekte der Wertschöpfungskette als Entscheidungsmetriken erstens quantifiziert und zweitens bei der Konfiguration von Flugzeugkabinen eine Rolle spielen können.

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass diese Arbeit einen Beitrag zur Integration einer ökologischen Bewertung in den Konfigurationsprozess komplexer Produktsysteme leistet. Über den Anwendungsfall der Flugzeugkabine hinaus trägt die entwickelte Systematik zur Steigerung der Transparenz entlang des gesamten Lebenszyklus bei. Weitere Forschungsarbeiten werden die Systematik jedoch auf den jeweiligen Anwendungsfall sowie dessen Rahmenbedingungen anpassen müssen.

Literaturverzeichnis

(Abrantes et al. 2021)

Abrantes, I.; Ferreira, A.F.; Silva, A.; Costa, M. (2021): Sustainable aviation fuels and imminent technologies - CO₂ emissions evolution towards 2050. In: *Journal of Cleaner Production*, 313, S. 127937. DOI: 10.1016/j.jclepro.2021.127937.

(Ackert 2013)

Ackert, S. (2013): Commercial Aspects of Aircraft Customization. Aircraft Monitor. Report.

(Airbus Group 2019)

Airbus Group (2019): Airbus' Airspace Customer Definition Centre opens new cabin customization areas for A320 and A330 programmes. URL: <https://www.airbus.com/en/newsroom/press-releases/2019-04-airbus-airspace-customer-definition-centre-opens-new-cabin>. Abgerufen am: 27.05.2023.

(Airbus Operations GmbH 2022)

Airbus Operations GmbH (2022): Interne Präsentation zur Auswertung der Anwendungsfälle von Ökobilanzen innerhalb der Kabine.

(Airbus SE 2023)

Airbus SE (2023): Cabin Configuration Tool. URL: <https://aircraft.airbus.com/en/services/enhance/cabin-and-connectivity-upgrades/cabin-configuration-tool%0A>. Abgerufen am: 12.08.2023.

(Al-Lami et al. 2018)

Al-Lami, A.; Hilmer, P.; Sinapius, M. (2018): Eco-efficiency assessment of manufacturing carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in aerospace industry. In: *Aerospace Science and Technology*, Elsevier Masson SAS, 79, S. 669–678. DOI: 10.1016/j.ast.2018.06.020.

(Altuntas et al. 2014)

Altuntas, O.; Ekici, S.; Yalin, G.; Karakoc, T.H. (2014): Comparison of Auxiliary Power Unit (APU) and Ground Power Unit (GPU) with Life Cycle Analysis in Ground Operations: A Case Study for Domestic Flight in Turkey. In: *Applied Mechanics and Materials*, 629, S. 219–224. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMM.629.219.

(Andes 2019)

Andes, L. (2019): Methodensammlung zur Nachhaltigkeitsbewertung - Grundlagen, Indikatoren, Hilfsmittel. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Bericht.

(André und Hajek 2019)

André, N.; Hajek, M. (2019): Robust Environmental Life Cycle Assessment of Electric VTOL Concepts for Urban Air Mobility. Präsentiert auf: 2019, *AIAA Aviation 2019 Forum*, S. 3473. DOI: 10.2514/6.2019-3473.

(atmosfair gGmbH 2016)

atmosfair gGmbH (2016): atmosfair Flug-Emissionsrechner. URL: <https://www.atmosfair.de/de/kompensieren/flug/>. Abgerufen am: 20.03.2022

(Ausberg et al. 2015)

Ausberg, L.; Ciroth, A.; Feifel, Si.; Franze, J.; Kaltschmitt, M.; Klemmayer, I.; Meyer, K.; Saling, P.; Schebek, L.; Weinberg, J.; et al. (2015): Lebenszyklusanalysen. In: Kaltschmitt, M.; Liselotte, S. (Hrsg.), *Umweltbewertung für Ingenieure - Methoden und Verfahren*. Berlin, Heidelberg: Springer, S. 203–306.

(Bachmann et al. 2018)

Bachmann, J.; Yi, X.; Gong, H.; Martinez, X.; Bugada, G.; Oller, S.; Tserpes, K.; Ramon, E.; Paris, C.; Moreira, P.; et al. (2018): Outlook on ecologically improved composites for aviation interior and secondary structures. In: *CEAS Aeronautical Journal*, 9 (3), S. 533–543. DOI: 10.1007/s13272-018-0298-z.

(Bachwich und Wittman 2017)

Bachwich, A.R.; Wittman, M.D. (2017): The emergence and effects of the ultra-low cost carrier (ULCC) business model in the U.S. airline industry. In: *Journal of Air Transport Management*, 62, S. 155–164. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2017.03.012.

(Backes und Traverso 2022)

Backes, J.G.; Traverso, M. (2022): Life cycle sustainability assessment as a metrics towards SDGs agenda 2030. In: *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry*, 38, S. 100683. DOI: 10.1016/j.cogsc.2022.100683.

(Badea et al. 2018)

Badea, V.E.; Zamfiroiu, A.; Boncea, R. (2018): Big Data in the Aerospace Industry. In: *Informatica Economica*, 22, S. 17–24. DOI: 10.12948/issn14531305/22.1.2018.02.

(Badurdeen et al. 2018)

Badurdeen, F.; Aydin, R.; Brown, A. (2018): A multiple lifecycle-based approach to sustainable product configuration design. In: *Journal of Cleaner Production*, 200, S. 756–769. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.07.317.

(Bahns et al. 2013)

Bahns, T.; Gebhardt, N.; Krause, D. (2013): A modularization approach for aircraft cabin components. In: *Proceedings of 4th International Workshop on Aircraft System Technologies (AST)*, Hamburg, S. 201-210.

(Bangor et al. 2009)

Bangor, A.; Kortum, P.; Miller, J. (2009): Determining What Individual SUS Scales Mean: Adding an Adjective Rating Scale. In: *Journal of Usability Studies*, 4 (3), S. 114–123.

(Barahmand und Eikeland 2022)

Barahmand, Z.; Eikeland, M.S. (2022): Life Cycle Assessment under Uncertainty: A Scoping Review. In: *World*, 3, S. 692–717. DOI: 10.3390/world3030039.

(Bare et al. 2003)

Bare, J.C.; Norris, G. a; Pennington, D.W. (2003): The Tool for the Reduction and Assessment Impacts. In: *Journal of Industrial Ecology*, 6 (3), S. 49–78.

(Barke et al. 2021)

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. In: *Procedia CIRP*, 98, S. 660–665. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.171.

(Beck et al. 2011)

Beck, A.J.; Hodzic, A.; Soutis, C.; Wilson, C.W. (2011): Influence of implementation of composite materials in civil aircraft industry on reduction of environmental pollution and greenhouse effect. In: *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, DOI: 10.1088/1757-899X/26/1/012015.

(Becker et al. 2009)

Becker, J.; Knackstedt, R.; Pöppelbuß, J. (2009): Entwicklung von Reifegradmodellen für das IT-Management - Vorgehensmodell und praktische Anwendung. In: *Business and Information Systems Engineering*, 51, S. 249–260. DOI: 10.1007/s11576-009-0167-9.

(Becker et al. 2012)

Becker, J.; Probandt, W.; Vering, O. (2012): Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung - Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement. Berlin, Heidelberg: Springer Gabler. DOI: 10.1007/978-3-642-30412-5_4.

(Beelaerts van Blokland et al. 2007)

Beelaerts van Blokland, W.W.A.B.; Fiksiński, M.A.; Amoa, S.O.B.; Santema, S.C. (2007): The Lean Value Network System: Co-Investment And Co-Innovation As Drivers For A Sustainable Position In The Marketplace. Präsentiert auf: 2007, 23rd IMP-Conference Manchester.

(Belton und Stewart 2002)

Belton, V.; Stewart, T.J. (2002): Multiple Criteria Decision Analysis - An Integrated Approach. Dordrecht: Springer-Science+Business Media. DOI: 10.1007/978-1-4615-1495-4.

(Berdowski et al. 2009)

Berdowski, Z.; Van den Broek-Serlé, F.N.; Jetten, J.T.; Kawabatta, Y.; Schoemaker, J.T.; Versteegh, R. (2009): Survey on standard weights of passengers and baggage. URL: https://www.easa.europa.eu/system/files/dfu/Weight_Survey_R20090095_Final.pdf. Abgerufen am: 20.03.2022.

(Bergs et al. 2021)

Bergs, T.; Grünebaum, T.; Fricke, K.; Barth, S.; Ganser, P. (2021): Life cycle assessment for milling of Ti-and Ni-based alloy aero engine components. In: *Procedia CIRP*, 98, S. 625–630. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.165.

(Bicalho et al. 2017)

Bicalho, T.; Sauer, I.; Rambaud, A.; Altukhova, Y. (2017): LCA data quality: A management science perspective. In: *Journal of Cleaner Production*, Elsevier Ltd, 156, S. 888–898. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.03.229.

(Bitzan und Peoples 2016)

Bitzan, J.; Peoples, J. (2016): A comparative analysis of cost change for low-cost, full-service, and other carriers in the US airline industry. In: *Research in Transportation Economics*, 56, S. 25–41. DOI: 10.1016/j.retrec.2016.07.003.

(Bjorn et al. 2018)

Bjorn, A.; Owsianiak, M.; Molin, C.; Hauschild, Z.M. (2018): LCA History. In: Hauschild, M.Z.; Rosenbaum, R.K.; Olsen, S.I. (Hrsg.), *Life Cycle Assessment - Theory and Practice*. Cham: Springer, S. 17–30. DOI: 10.4324/9781315778730.

(Blanca-Alcubilla et al. 2020)

Blanca-Alcubilla, G.; Bala, A.; de Castro, N.; Colomé, R.; Fullana-i-Palmer, P. (2020): Is the reusable tableware the best option? Analysis of the aviation catering sector with a life cycle approach. In: *Science of the Total Environment*, 708, S. 135121. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.135121.

(Blessing und Chakrabarti 2009)

Blessing, L.T.M.; Chakrabarti, A. (2009): DRM, a Design Research Methodology. London: Springer. DOI: 10.1007/978-1-84882-587-1.

(Bogner et al. 2014)

Bogner, A.; Littig, B.; Menz, W. (2014): Interviews mit Experten. Wiesbaden: Springer Fachmedien. DOI: 10.1007/978-3-531-19416-5.

(Bongo und Culaba 2020)

Bongo, M.F.; Culaba, A.B. (2020): A life cycle analysis of commercial aircraft fleets. In: *2020 IEEE 12th International Conference on Humanoid, Nanotechnology, Information Technology, Communication and Control, Environment, and Management (HNICEM)*, DOI: 10.1109/HNICEM51456.2020.9400064.

(Booth et al. 2012)

Booth, A.; Sutton, A.; Papaioannou, D. (2012): *Systematic Approaches to a Successful Literature Review*. Second Edi. Los Angeles, London, New Delhi, Singapore, Washington DC, Melbourne: SAGE Publications. DOI: 10.5596/c13-009.

(Bravo et al. 2022)

Bravo, A.; Vieira, D.; Ferrer, G. (2022): Emissions of future conventional aircrafts adopting evolutionary technologies. In: *Journal of Cleaner Production*, 347, S. 131246. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.131246.

(Brooke 1996)

Brooke, J. (1996): SUS - A Quick and Dirty Usability Scale. In: Jordan, P.W.; Thomas, B.; Weerdmeester, B.; McClelland, I.L. (Hrsg.), *Usability Evaluation In Industry*. London, Bristol: Taylor & Francis, S. 189–194. DOI: 10.1201/9781498710411.

(Buergin et al. 2018)

Buergin, J.; Belkadi, F.; Hupays, C.; Gupta, R.K.; Bitte, F.; Lanza, G.; Bernard, A. (2018): A modular-based approach for Just-In-Time Specification of customer orders in the aircraft manufacturing industry. In: *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, 21, S. 61–74. DOI: 10.1016/j.cirpj.2018.01.003.

(Bursac 2016)

Bursac, N. (2016): *Model Based Systems Engineering zur Unterstützung der Baukastenentwicklung im Kontext der Frühen Phase der Produktgenerationsentwicklung*. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dissertation.

(Butt et al. 2021)

Butt, A.A.; Harvey, J.; Saboori, A.; Ostovar, M.; Bejarano, M.; Garg, N. (2021): Decision Support in Selecting Airfield Pavement Design Alternatives Using Life Cycle Assessment: Case Study of Nashville Airport. In: *Sustainability*, 13 (299). DOI: 10.3390/su13010299.

(Buxel et al. 2015)

Buxel, H.; Esenduran, G.; Griffin, S. (2015): Strategic sustainability: Creating business value with life cycle analysis. In: *Business Horizons*, 58 (1), S. 109–122. DOI: 10.1016/j.bushor.2014.09.004.

(Calado et al. 2019)

Calado, E.A.; Leite, M.; Silva, A. (2019): Integrating life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) in the early phases of aircraft structural design: an elevator case study. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*, 24, S. 2091–2110. DOI: 10.1007/s11367-019-01632-8.

(Calisir et al. 2020)

Calisir, D.; Ekici, S.; Midilli, A.; Karakoc, T.H. (2020): A review on environmental impacts from aviation sector in terms of life cycle assessment. In: *International Journal of Global Warming*, 22 (2), S. 211–234. DOI: 10.1504/IJGW.2020.110299.

(Calvo Narváez und Monroy 2009)

Calvo Narváez, F.; Monroy, C.R. (2009): How is Configuration Management in Aircraft Industry implemented? Präsentiert auf: *5th Latin American and Caribbean Conference for Engineering and Technology*.

(Chang et al. 2008)

Chang, Y.N.; Lim, Y.K.; Stolterman, E. (2008): Personas: From theory to practices. In: *ACM International Conference Proceeding Series*, 358, S. 439–442. DOI: 10.1145/1463160.1463214.

(Cheng und Atlee 2007)

Cheng, B.H.C.; Atlee, J.M. (2007): Research Directions in Requirements Engineering. In: 2007, *Future of Software Engineering (FOSE '07)*, S. 285–303. DOI: 10.1109/FOSE.2007.17.

(Chester 2008)

Chester, M. (2008): Life-cycle environmental inventory of passenger transportation in the United States. University of California, Berkeley. Dissertation.

(Chester und Horvath 2012)

Chester, M.; Horvath, A. (2012): High-speed rail with emerging automobiles and aircraft can reduce environmental impacts in California's future. In: *Environmental Research Letters*, 7 (3). DOI: 10.1088/1748-9326/7/3/034012.

(Chiambaretto und Combe 2023)

Chiambaretto, P.; Combe, E. (2023): Business model hybridization but heterogeneous economic performance: Insights from low-cost and legacy carriers in Europe. In: *Transport Policy*, 136, S. 83–97. DOI: 10.1016/j.tranpol.2023.03.016.

(Christiansen und Gausemeier 2010)

Christiansen, S.-K.; Gausemeier, J. (2010): Klassifikation von Reifegradmodellen. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 105 (4), S. 344-349. DOI: 10.3139/104.110290.

(Cox et al. 2018)

Cox, B.; Jemiolo, W.; Mutel, C. (2018): Life cycle assessment of air transportation and the Swiss commercial air transport fleet. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 58, S. 1–13. DOI: 10.1016/j.trd.2017.10.017.

(Dallara et al. 2013)

Dallara, E.; Kusnitz, J.; Bradley, M. (2013): Parametric Life Cycle Assessment for the Design of Aircraft. In: *SAE International Journal of Aerospace*, 6, S. 736–745. DOI: 10.4271/2013-01-2277.

(Das 2011)

Das, S. (2011): Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*, 16, S. 268–282. DOI: 10.1007/s11367-011-0264-z.

(Dassault Aviation 2000)

Dassault Aviation (2000): ATA 25 - Equipment. URL: <https://www.smartcockpit.com/docs/Equipment.pdf>. Abgerufen am: 12. 08.2023.

(Davis 1987)

Davis, S. (1987): Future Perfect. Basic Books.

(Dawes 2008)

Dawes, J. (2008): Do Data Characteristics Change According to the Number of Scale Points Used? An Experiment Using 5-Point, 7-Point and 10-Point Scales. In: *International Journal of Market Research*, 50 (1), S. 61–104. DOI: 10.1177/147078530805000106.

(Deng et al. 2023)

Deng, J.; Sierla, S.; Sun, J.; Vyatkin, V. (2023): Mass customization with reinforcement learning: Automatic reconfiguration of a production line. In: *Applied Soft Computing*, Elsevier B.V., 145, S. 110547. DOI: 10.1016/j.asoc.2023.110547.

(Deutsche Lufthansa AG 2022)

Deutsche Lufthansa AG (2022): Airbus A350-900 Sitzpläne. URL: <https://www.lufthansa.com/de/de/35a>. Abgerufen am: 26.6.2022.

(Diekmann 2007)

Diekmann, A. (2007): Empirische Sozialforschung: Grundlagen, Methoden, Anwendungen. 8. Auflage. Reinbek bei Hamburg: Rowohlt Taschenbuch Verlag.

(DIN 9020 1983)

Deutsches Institut für Normung e. V. (1983): DIN 9020: Massenverteilung für Luftfahrzeuge schwerer als Luft.

(DIN EN 15804 2020)

Deutsches Institut für Normung e. V. (2020): DIN EN 15804: Nachhaltigkeit von Bauwerken - Umweltproduktdeklarationen - Grundregeln für die Produktkategorie Bauprodukte.

(DIN EN ISO 14025 2006)

Deutsches Institut für Normung e. V. (2006): DIN EN ISO 14025: Umweltkennzeichnungen und -deklaration - Typ III Umweltdeklarationen - Grundsätze und Verfahren.

(DIN EN ISO 14040 2009)

Deutsches Institut für Normung e. V. (2009): DIN EN ISO 14040: Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingungen.

(DIN EN ISO 14044 2006)

Deutsches Institut für Normung e. V. (2006): DIN EN ISO 14044: Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderungen Anleitungen.

(DIN EN ISO 9000 2015)

Deutsches Institut für Normung e. V. (2015): DIN EN ISO 9000: Qualitätsmanagementsysteme - Grundlagen und Begriffe.

(DIN EN ISO 9421-110 2006)

Deutsches Institut für Normung e. V. (2006): DIN EN ISO 9421-110: Ergonomie der Mensch-System-Interaktion - Teil 110: Grundsätze der Dialoggestaltung.

(Dong et al. 2018)

Dong, S.; Xian, G.; Yi, X.S. (2018): Life cycle assessment of ramie fiber used for FRPs. In: *Aerospace*, 5 (3), DOI: 10.3390/aerospace5030081.

(Dorbath 2013)

Dorbath, F. (2013): Large Civil Jet Transport (MTOM > 40t) Statistical Mass Estimation. In: *Luftfahrttechnisches Handbuch (LTH)*.

(Döring 2007)

Döring, T. (2007): Marketing. In: Tiedtke, J.R. (Hrsg.), *Allgemeine BWL - Betriebswirtschaftliches Wissen für kaufmännische Berufe - Schritt für Schritt*. 2., überarbeitete Auflage. Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH, S. 491–547.

(Dožić 2019)

Dožić, S. (2019): Multi-criteria decision making methods: Application in the aviation industry. In: *Journal of Air Transport Management*, 79, S. 101683. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2019.101683.

(Dziedzic und Warnock-Smith 2016)

Dziedzic, M.; Warnock-Smith, D. (2016): The role of secondary airports for today's low-cost carrier business models: The European case. In: *Research in Transportation Business and Management*, Elsevier Ltd, 21, S. 19–32. DOI: 10.1016/j.rtbm.2016.07.002.

(EASA 2019)

European Union Aviation Safety Agency (2019): European Aviation Environmental Report.

(Efthymiou und Christidis 2023)

Efthymiou, M.; Christidis, P. (2023): Low-Cost Carriers route network development. In: *Annals of Tourism Research*, 101, S. 103608. DOI: 10.1016/j.annals.2023.103608.

(Ehrlenspiel und Meerkamm 2017)

Ehrlenspiel, K.; Meerkamm, H. (2017): Integrierte Produktentwicklung - Denkabläufe, Methodeneinsatz, Zusammenarbeit. 6. Auflage. München, Wien: Carl Hanser Verlag.

(ElMaraghy et al. 2013)

ElMaraghy, H.; Schuh, G.; Elmaraghy, W.; Piller, F.; Schönsleben, P.; Tseng, M.; Bernard, A. (2013): Product variety management. In: *CIRP Annals - Manufacturing Technology*, 62 (2), S. 629–652. DOI: 10.1016/j.cirp.2013.05.007.

(Elsayed et al. 2019)

Elsayed, A.; Roetger, T.; Amy, B. (2019): Best Practices and Standards in Aircraft End-of-Life and Recycling. Report.

(Eschen et al. 2020)

Eschen, H.; Kalscheuer, F.; Schüppstuhl, T. (2020): Optimized process chain for flexible and automated aircraft interior production. In: *Procedia Manufacturing*, 51, S. 535–542. DOI: 10.1016/j.promfg.2020.10.075.

(EUROCONTROL 2016)

European Organisation for the Safety of Air Navigation (2016): EUROCONTROL method for estimating aviation fuel burnt and emissions. Report.

(EUROCONTROL 2021)

European Organisation for the Safety of Air Navigation (2021): Small emitters tool (SET) - 2021. EUROCONTROL. URL: <https://www.eurocontrol.int/publication/small-emitters-tool-set-2021>. Abgerufen am: 20.03.2022.

(Europäische Union 2013)

Europäische Union (2013): 2013/179/EU: Empfehlung der Kommission vom 9. April 2013 für die Anwendung gemeinsamer Methoden zur Messung und Offenlegung der Umweltleistung von Produkten und Organisationen Text von Bedeutung für den EWR. Text abrufbar unter: <http://data.europa.eu/eli/reco/2013/179/oj>.

(European Commission 2010)

European Commission (2010): ILCD-Handbook: General guide for LCA. Detailed guidance. Luxembourg: Publications Office of the European Union.

(European Commission 2017)

European Commission (2017): Guidance for the development of Product Environmental Footprint Category Rules (PEFCRs). Version 6.3.

(European Commission 2018)

European Commission (2018): European Platform on Life Cycle Assessment. European Commission. URL: <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/LCDN/developerEF.xhtml?>. Abgerufen am: 9.7.2022).

(European Commission -Joint Research Centre 2010)

European Commission - Joint Research Centre - Institute for Environment and Sustainability (2010): International Reference Life Cycle Data System (ILCD) Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment. *Publications Office of the European Union*, Ispra. Abrufbar unter : <https://eplca.jrc.ec.europa.eu/uploads/ILCD-Handbook-LCIA-Background-analysis-online-12March2010.pdf>.

(European Environment Agency 2019)

European Environment Agency (2019): EMEP/EEA air pollutant emission inventory guidebook 2019. URL: http://efdb.apps.eea.europa.eu/?source=%7B%22query%22%3A%7B%22match_all%22%3A%7B%7D%7D%2C%22display_type%22%3A%22tabular%22%7D. Abgerufen am: 20.3.2022.

(Ewertowska et al. 2017)

Ewertowska, A.; Pozo, C.; Gavaldà, J.; Jiménez, L.; Guillén-Gosálbez, G. (2017): Combined use of life cycle assessment, data envelopment analysis and Monte Carlo simulation for quantifying environmental efficiencies under uncertainty. In: *Journal of Cleaner Production*, 166, S. 771–783. DOI: 10.1016/j.jclepro.2017.07.215.

(Fabre et al. 2022)

Fabre, A.; Planès, T.; Delbecq, S.; Pommier-Budinger, V.; Lafforgue, G. (2022): Life cycle assessment models for overall aircraft design. In: *AIAA Science and Technology Forum and Exposition, AIAA SciTech Forum 2022*, DOI: 10.2514/6.2022-1028.

(Facanha und Horvath 2006)

Facanha, C.; Horvath, A. (2006): Environmental Assessment of Freight Transportation in the U.S. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*, 11 (4), S. 229–239. DOI: 10.1065/lca2006.02.244.

(Feifel et al. 2010)

Feifel, S.; Walk, W.; Wursthorn, S. (2010): Die Ökobilanz im Spannungsfeld zwischen Exaktheit, Durchführbarkeit und Kommunizierbarkeit. In: *Umweltwissenschaften und Schadstoff-Forschung*, 22 (1), S. 46–55. DOI: 10.1007/s12302-009-0107-8.

(Felfering et al. 2014)

Felfering, A.; Hotz, L.; Bagley, C.; Tiihonen, J. (2014): Knowledge-Based Configuration - From Research to Business Cases. Waltham: Morgan Kaufmann.

(Flugzeug-Lexikon.de 2023)

Flugzeug-Lexikon.de (2023): A350 Technische Daten. URL: https://www.flugzeuglexikon.de/ILA_2010/Verkehrsflugzeuge/Airbus_A350/airbus_a350.html. Abgerufen am: 26.03.2023.

(Fogliatto et al. 2012)

Fogliatto, F.S.; Da Silveira, G.J.C.; Borenstein, D. (2012): The mass customization decade: An updated review of the literature. In: *International Journal of Production Economics*, 138 (1), S. 14–25. DOI: 10.1016/j.ijpe.2012.03.002.

(Fornasiero et al. 2015)

Fornasiero, R.; Macchion, L.; Vinelli, A. (2015): Supply chain configuration towards customization: A comparison between small and large series production. In: *IFAC-PapersOnLine*, 28 (3), S. 1428–1433. DOI: 10.1016/j.ifacol.2015.06.287.

(Fountzoula und Aravossis 2022)

Fountzoula, C.; Aravossis, K. (2022): Decision-Making Methods in the Public Sector during 2010-2020: A Systematic Review. In: *Advances in Operations Research*, 2022. DOI: 10.1155/2022/1750672.

(Frauchinger 2017)

Frauchinger, D. (2017): Anwendungen von Design Science Research in der Praxis. In: Portmann, E. (Hrsg.), *Wirtschaftsinformatik in Theorie und Praxis*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 107–116. DOI: 10.1007/978-3-658-17613-6_7.

(Freund und Rücker 2019)

Freund, J.; Rücker, B. (2019): *Praxishandbuch BPMN - Mit Einführung in DMN*. 6. Auflage. München: Carl Hanser Verlag.

(Frischknecht 2020)

Frischknecht, R. (2020): Lehrbuch der Ökobilanzierung. Berlin: Springer Spektrum.

(Fuchs et al. 2022)

Fuchs, M.; Beckert, F.; Biedermann, J.; Nagel, B. (2022): A collaborative knowledge-based method for the interactive development of cabin systems in virtual reality. In: *Computers in Industry*, 136, S. 103590. DOI: 10.1016/j.compind.2021.103590.

(Fuchte 2014)

Fuchte, J.C. (2014): Enhancement of aircraft cabin design guidelines with special consideration of aircraft turnaround and short range operations. *DLR Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. - Forschungsberichte*.

(Funk et al. 2010)

Funk, B.; Gómez, J.M.; Niemeyer, P.; Teuteberg, F. (2010): Geschäftsprozessintegration mit SAP. Fallstudien zur Steuerung von Wertschöpfungsprozessen entlang der Supply Chain. Heidelberg: Springer.

(Gadatsch 2015)

Gadatsch, A. (2015): Geschäftsprozesse analysieren und optimieren. Praxistools zur Analyse, Optimierung und Controlling von Arbeitsabläufen. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag.

(Geldermann 2014)

Geldermann, J. (2014): Methoden der multikriteriellen Leitfadens zur Anwendung von Entscheidungsunterstützung. Georg-August-Universität-Göttingen. Bericht.

(Ghadge et al. 2018)

Ghadge, A.; Karantoni, G.; Chaudhuri, A.; Srinivasan, A. (2018): Impact of additive manufacturing on aircraft supply chain performance: A system dynamics approach. In: *Journal of Manufacturing Technology Management*, 29 (5), S. 846–865. DOI: 10.1108/JMTM-07-2017-0143.

(Gkoloni und Kostopoulos 2021)

Gkoloni, N.; Kostopoulos, V. (2021): Life cycle assessment of bio-composite laminates. A comparative study. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, DOI: 10.1088/1755-1315/899/1/012041.

(von Gleich et al. 2012)

von Gleich, C.F.; Schütt, A.; Isenberg, R. (2012): SMART ramp-up: methods to secure production ramp-up in the aircraft industry. In: *CEAS Aeronautical Journal*, 3 (2–4), S. 125–134. DOI: 10.1007/s13272-012-0047-7.

(Goedkoop und Huijbregts 2013)

Goedkoop, M.; Huijbregts, M. (2013): ReCiPe 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level. Abrufbar unter: <https://www.rivm.nl/documenten/a-lcia-method-which-comprises-harmonised-category-indicators-at-midpoint-and-endpoint>.

(Goedkoop und Spriensma 2001)

Goedkoop, M.; Spriensma, R. (2001): The Eco-indicator 99 - A damage oriented method for Life Cycle Impact Assessment. PRé Consultants B.V. Report.

(Goepel 2018)

Goepel, K. (2018): Implementation of an Online software tool for the Analytic Hierarchy Process (AHP-OS). In: *International Journal of the Analytic Hierarchy Process*, 10 (3), S. 469–487. DOI: 10.13033/ijahp.v10i3.590.

(Goll 2014)

Goll, J. (2014): Architektur- und Entwurfsmuster der Softwaretechnik. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Vieweg Verlag.

(Gomez-Campos et al. 2021)

Gomez-Campos, A.; Vialle, C.; Rouilly, A.; Hamelin, L.; Rogeon, A.; Hardy, D.; Sablayrolles, C. (2021): Natural Fibre Polymer Composites - A game changer for the aviation sector? In: *Journal of Cleaner Production*, 286, S. 124986. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.124986.

(Government Digital Service United Kingdom 2021)

Government Digital Service United Kingdom (2021): UK Government GHG Conversion Factors for Company Reporting. Department for Business, Energy & Industrial Strategy; Department for Environment Food & Rural Affairs. URL: <https://www.gov.uk/government/publications/greenhouse-gas-reporting-conversion-factors-2021>. Abgerufen am: 20.03.2022.

(Graham et al. 2014)

Graham, W.R.; Hall, C.A.; Vera Morales, M. (2014): The potential of future aircraft technology for noise and pollutant emissions reduction. In: *Transport Policy*, Elsevier, 34, S. 36–51. DOI: 10.1016/j.tranpol.2014.02.017.

(Graichen et al. 2010)

Graichen, J.; Gores, S.; Herold, A. (2010): Überarbeitung des Emissionsinventars des Flugverkehrs. Berlin. URL: Überarbeitung des%0AEmissionsinventars%0A des Flugverkehrs %0D. Abgerufen am: 20.03.2022.

(Gray et al. 2011)

Gray, D.; Brown, S.; Macanufo James (2011): Gamestorming: Ein Praxisbuch für Querdenker, Moderatoren und Innovatoren. Heidelberg: O'Reilly Verlag GmbH & Co. KG.

(Greer et al. 2020)

Greer, F.; Rakas, J.; Horvath, A. (2020): Airports and environmental sustainability: A comprehensive review. In: *Environmental Research Letters*, 15 (10). DOI: 10.1088/1748-9326/abb42a.

(Gróf und Kamtsiuris 2021)

Gróf, C.; Kamtsiuris, A. (2021): Ontology-based Process Reengineering to Support Digitalization of MRO Operations: Application to An Aviation Industry Case. In: *Procedia CIRP*, 104, S. 1322–1327. DOI: 10.1016/j.procir.2021.11.222.

(Guinée et al. 2002)

Guinée, J.B.; Gorrée, M.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Kleijn, R.; Koning, A. de; Oers, L. Van; Sleeswijk; Wegener, A.; Suh, S.; et al. (2002): Handbook on Life Cycle Assessment - Operational Guide to the ISO Standards. Series: Eco-efficiency in industry and science. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.

(Guinée et al. 2011)

Guinée, J.B.; Heijungs, R.; Huppes, G.; Zamagni, A.; Masoni, P.; Buonamici, R.; Ekvall, T.; Rydberg, T. (2011): Life cycle assessment: Past, present, and future. In: *Environmental Science and Technology*, 45 (1), S. 90–96. DOI: 10.1021/es101316v.

(Guo et al. 2020)

Guo, D.; Ling, S.; Li, H.; Ao, D.; Zhang, T.; Rong, Y.; Huang, G.Q. (2020): A framework for personalized production based on digital twin, blockchain and additive manufacturing in the context of Industry 4.0. In: *IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*, S. 1181–1186. DOI: 10.1109/CASE48305.2020.9216732.

(Gutai et al. 2023)

Gutai, A.; Havzi, S.; Nikolic, D.; Dakic, D. (2023): Potential of Mass Customization using Product Configurators. In: *2023 22nd International Symposium INFOTEH-JAHORINA, INFOTEH 2023*.

(Hackl 2022)

Hackl, J. (2022): Wirkmodell der Eigenschaften modularer Produktstrukturen, Heidelberg: Springer Vieweg. Zugleich Dissertation Technischen Universität Hamburg. DOI: 10.1007/978-3-662-65263-3.

(Hall et al. 2013)

Hall, A.; Mayer, T.; Wuggetzer, I.; Childs, P.R.N. (2013): Future aircraft cabins and design thinking: optimisation vs. win-win scenarios. In: *Propulsion and Power Research*, 2 (2), S. 85–95. DOI: 10.1016/j.jprr.2013.04.001.

(Handrich und Heidenreich 2013)

Handrich, M.; Heidenreich, S. (2013): The willingness of a customer to co-create innovative, technology-based services: Conceptualisation and measurement. In: *International Journal of Innovation Management*, 17 (4). DOI: 10.1142/S1363919613500114.

(Hanna et al. 2020)

Hanna, M.; Schwenke, J.; Heyden, E.; Laukotka, F.; Krause, D. (2020): Neue Trends in der Flugzeugkabinenentwicklung. In: *Produktentwicklung und Konstruktionstechnik*. 19. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 207–228. DOI: 10.1007/978-3-662-62393-0_9.

(Hanna et al. 2021)

Hanna, M.; Schwenke, J.; Schwede, L.-N.; Laukotka, F.; Krause, D. (2021): Model-based application of the methodical process for modular lightweight design of aircraft cabins. In: *Procedia CIRP*, 100, S. 637–642. DOI: 10.1016/j.procir.2021.05.136.

(Haug et al. 2012)

Haug, A.; Hvam, L.; Mortensen, N.H. (2012): Definition and evaluation of product configurator development strategies. In: *Computers in Industry*, 63 (5), S. 471–481. DOI: 10.1016/j.compind.2012.02.001.

(Haug et al. 2019)

Haug, A.; Shafiee, S.; Hvam, L. (2019): The causes of product configuration project failure. In: *Computers in Industry*, 108, S. 121–131. DOI: 10.1016/j.compind.2019.03.002.

(Hausschild et al. 2018)

Hausschild, M.; Rosenbaum, R.; Olsen, S.I. (2018): Life Cycle Assessment - Theory and Practice. *Springer International Publishing AG*, DOI: 10.2134/csa2019.64.0706.

(van Heerden et al. 2019)

van Heerden, A.S.J.; Guenov, M.D.; Molina-Cristóbal, A. (2019): Evolvability and design reuse in civil jet transport aircraft. In: *Progress in Aerospace Sciences*, 108, S. 121–155. DOI: 10.1016/j.paerosci.2019.01.006.

(Heijungs et al. 1992)

Heijungs, R.; Guinée, J.B.; Huppes, G.; Lankreijer, R.M.; Udo de Haes, H.A.; Wegener Sleeswijk, A.; Ansems, A.M.M.; Eggels, P.G.; Duin, R. van;; Goede, H.P. de (1992): Environmental Life Cycle Assessment of Products. DOI: 10.1109/ICSMC.2008.4811787.

(Helfferich 2011)

Helfferich, C. (2011): Die Qualität qualitativer Daten - Manuel für die Durchführung qualitativer Interviews. *Die Qualität qualitativer Daten*, 4. Auflage. Wiesbaden: Springer Fachmedien Verlag. DOI: 10.1007/978-3-322-93445-1.

(Helfferrich 2022)

Helfferrich, C. (2022): Leitfaden- und Experteninterviews. In: Baur, N.; Blasius, J. (Hrsg.), Handbuch Methoden der empirischen Sozialforschung. Wiesbaden: Springer Fachmedien, S. 875–893. DOI: 10.1007/978-3-658-37985-8.

(Helfrich 2016)

Helfrich, H. (2016): Wissenschaftstheorie für Betriebswirtschaftler. Wiesbaden: Springer Fachmedien. DOI: 10.1007/978-3-658-07036-6.

(Herrmann 2009)

Ganzheitliches Life Cycle Management: Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen. Springer-Verlag, 2009.

(Hevner et al. 2004)

Hevner, A.R.; March, S.T.; Park, J.; Ram, S. (2004): Design Science in Information System Research. In: *MIS Quarterly*, 28 (1), S. 75–105. DOI: 10.1007/BF01205282.

(Heyne et al. 2021)

Heyne, J.; Rauch, B.; Le Clercq, P.; Colket, M. (2021): Sustainable aviation fuel prescreening tools and procedures. In: *Fuel*, 290, S. 120004. DOI: 10.1016/j.fuel.2020.120004.

(Hinsch 2019)

Hinsch, M. (2019): Industrielles Luftfahrtmanagement. - Technik und Organisation luftfahrttechnischer Betriebe, 4., aktualisierte Auflage. Berlin, Heidelberg:Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-66452-0.

(Howe et al. 2013)

Howe, S.; Kolios, A.J.; Brennan, F.P. (2013): Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 19, S. 34–41. DOI: 10.1016/j.trd.2012.12.004.

(Huijbregts et al. 2017a)

Huijbregts, M.; Steinmann, Z.; Elshout, P. (2017): ReCiPe 2016 v1.1 A harmonized life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level Report I: Characterization. Bilthoven. Abrufbar unter: https://pre-sustainability.com/legacy/download/Report_ReCiPe_2017.pdf.

(Huijbregts et al. 2017b)

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. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*, The International Journal of Life Cycle Assessment, 22, S. 138–147. DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y.

(IATA 2021)

International Air Transport Association (2021): Aviation & Climate Change - Fact Sheet. Abrufbar unter: https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/fact_sheet_on_climate_change.pdf

(IATA 2022)

International Air Transport Association (2022): IATA CO2 Connect Calculator. International Air Transport Association (IATA). URL: <https://www.iata.org/en/services/statistics/intelligence/co2-connect/iata-co2-connect-passenger-calculator/>. Abgerufen am: 20.03.2022.

(IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V. 2023)

IBU – Institut Bauen und Umwelt e.V. (2023): Webseite des Vereins. URL: <https://ibu-epd.com/ibu/>.

(ICAO 2018)

International Civil Aviation Organization (2018): ICAO Carbon Emissions Calculator Methodology. URL: <https://www.icao.int/environmental-protection/Carbonoffset/Pages/default.aspx>. Abgerufen am: 20.03.2022.

(ICAO 2021)

International Civil Aviation Organization (2021): ICAO Aircraft Engine Emissions Databank. EASA. URL: <https://www.easa.europa.eu/domains/environment/icao-aircraft-engine-emissions-databank>. Abgerufen am: 2022.03.2022.

(ICAO 2022)

ICAO (2022): Juli 2022: Air Transport Monthly Monitor. URL: https://www.icao.int/sustainability/Documents/MonthlyMonitor-2020/MonthlyMonitor_January2020.pdf. Abgerufen am: 8.10.2022.

(Ilg 2015)

Ilg, R. (2015): Ein methodischer Ansatz zur ökologischen Betrachtung von Luftfahrtsystemen. Universität Stuttgart. Dissertation.

(Ishizaka und Labib 2011)

Ishizaka, A.; Labib, A. (2011): Review of the main developments in the analytic hierarchy process. In: *Expert Systems with Applications*, 38, S. 14336–14345. DOI: 10.1016/j.eswa.2011.04.143.

(Jäger-Roschko und Petersen 2022)

Jäger-Roschko, M.; Petersen, M. (2022): Advancing the circular economy through information sharing: A systematic literature review. In: *Journal of Cleaner Production*, 369 (July). DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.133210.

(Jakoby 2021)

Jakoby, W. (2021): Projektmanagement für Ingenieure. Wiesbaden: Springer Fachmedien. DOI: 10.1007/978-3-658-32791-0.

(Jazayeri 2007)

Jazayeri, M. (2007): Some Trends in Web Application Development. Präsentiert auf: Mai 2007, *Future of Software Engineering (FOSE '07)*, IEEE, S. 199–213. DOI: 10.1109/FOSE.2007.26.

(Johanning 2017)

Johanning, A. (2017): Methodik zur Ökobilanzierung im Flugzeugvorentwurf. Technische Universität München. Dissertation.

(Johanning und Scholz 2013)

Johanning, A.; Scholz, D. (2013): A first step towards the integration of life cycle assessment into conceptual aircraft design. Präsentiert auf: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*.

(Jolliet et al. 2003)

Jolliet, O.; Margni, M.; Charles, R.; Humbert, S.; Payet, J.; Rebitzer, G.; Rosenbaum, R. (2003): IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 8 (6), S. 324–330. DOI: 10.1007/BF02978505.

(Jolliet et al. 2015)

Jolliet, O.; Saade-Sbeih, M.; Shaked, S.; Jolliet, A.; Crettaz, P. (2015): Environmental Life Cycle Assessment. Boca Raton: CRC Press. DOI: 10.1201/b19138.

(Jost und Süsser 2020)

Jost, P.J.; Süsser, T. (2020): Company-customer interaction in mass customization. In: *International Journal of Production Economics*, 220. DOI: 10.1016/j.ijpe.2019.07.027.

(Karuppanan Gopalraj et al. 2021)

Karuppanan Gopalraj, S.; Deviatkin, I.; Horttanainen, M.; Kärki, T. (2021): Life Cycle Assessment of a Thermal Recycling Process as an Alternative to Existing CFRP and GFRP Composite Wastes Management Options. In: *Polymers*, 13 (4430). DOI: 10.3390/polym13244430.

(Katsiropoulos und Pantelakis 2020)

Katsiropoulos, C. V.; Pantelakis, S.G. (2020): A novel holistic index for the optimization of composite components and manufacturing processes with regard to quality, life cycle costs and environmental performance. In: *Aerospace*, 7 (11), S. 1–19. DOI: 10.3390/aerospace7110157.

(Keiser et al. 2022)

Keiser, D.; Bauer, M.; Becker, A.; Gonzales Eizaguierre, M.; Mortensen Ernits, R.; Freitag, M.; Otto, T.; Reiss, M.; Terno, A. (2022): Method and System for Life Cycle Assessment of a Vehicle such as an Aircraft. Deutsches Patent- und Markenamt. Anmeldenummer: 21187938.2. Europäisches Patentamt.

(Keiser et al. 2023a)

Keiser, D.; Arenz, M.; Freitag, M.; Reiß, M. (2023): Method to Model the Environmental Impacts of Aircraft Cabin Configurations during the Operational Phase. In: *Sustainability*, 15 (5477).

(Keiser et al. 2023b)

Keiser, D.; Pupkes, B.; Freitag, M. (2023): Passenger Expectations towards a Sustainable Aviation Industry. In: *Transportation Research Procedia*, 75, S. 189–197.

(Keiser et al. 2023c)

Keiser, D.; Pupkes, B.; Otto, T.; Reiß, M.; Poggensee, M.; Rehsöft, S.; Terno, A.; Mortensen Ernits, R.; Freitag, M. (2023): In: Kohl, H., Seliger, G., Dietrich, F., Mur, S. (eds) *Sustainable Manufacturing as a Driver for Growth. GCSM 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, S. 326–334.

(Keiser et al. 2023d)

Keiser, D.; Pupkes, B.; Wagner, J.; Freitag, M.; Mortensen Ernits, R.; Reiß, M.; Becker, A. (2023): Ökobilanzierungen bei Flugzeugherstellern - Ein analytisches Entscheidungsmodell zur Potenzialbewertung. In: *Industrie 4.0 Management*, 39 (3), S. 62–66.

(Keiser et al. 2023e)

Keiser, D.; Schnoor, L.H.; Pupkes, B.; Freitag, M. (2023): Life cycle assessment in aviation: A systematic literature review of applications, methodological approaches and challenges. In: *Journal of Air Transport Management*, 110, S. 102418. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2023.102418.

(Keiser et al. 2024)

Keiser, D.; Demir, M.; Freitag, M. (2024): Implementation of Life Cycle Assessment into the Customization Process of Aircraft Cabins. In: *Transportation Research Procedia*, 81, S. 25–34.

(Khalil 2017)

Khalil, Y.F. (2017): Eco-efficient lightweight carbon-fiber reinforced polymer for environmentally greener commercial aviation industry. In: *Sustainable Production and Consumption*, 12, S. 16–26. DOI: 10.1016/j.spc.2017.05.004.

(Kloepffer 2008)

Kloepffer, W. (2008): Life cycle sustainability assessment of products. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*, 13 (2), S. 89–95. DOI: 10.1065/lca2008.02.376.

(Klußmann und Malik 2012)

Klußmann, Ni.; Malik, A. (2012): Lexikon der Luftfahrt. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg. DOI: 10.1007/978-3-642-22500-0.

(Koch et al. 2011)

Koch, A.; Lührs, B.; Dahlmann, K.; Linke, F.; Grewe, V.; Litz, M.; Plohr, M.; Nagel, B.; Gollnick, V.; Schumann, U. (2011): Climate impact assessment of varying cruise flight altitudes applying the CATS simulation approach. Präsentiert auf: *3rd CAES Air&Space Conference - 21st AIDAA Congress*.

(Kokare et al. 2023)

Kokare, S.; Oliveira, J.P.; Godina, R. (2023): Life cycle assessment of additive manufacturing processes: A review. In: *Journal of Manufacturing Systems*, 68, S. 536–559. DOI: 10.1016/j.jmsy.2023.05.007.

(Koren et al. 2015)

Koren, Y.; Shpitalni, M.; Gu, P.; Hu, S.J. (2015): Product design for mass-individualization. In: *Procedia CIRP*, 36, S. 64–71. DOI: 10.1016/j.procir.2015.03.050.

(Korpi und Ala-Risku 2008)

Korpi, E.; Ala-Risku, T. (2008): Life cycle costing: A review of published case studies. In: *Managerial Auditing Journal*, 23 (3), S. 240–261. DOI: 10.1108/02686900810857703.

(Krallmann et al. 2013)

Krallmann, H.; Bobrik, A.; Levina, O. (2013): Systemanalyse im Unternehmen - Prozessorientierte Methoden der Wirtschaftsinformatik, 6. Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag. DOI: 10.1524/9783486729825.217.

(Kranert 2017)

Kranert, M. (2017): Einführung in die Kreislaufwirtschaft. Wiesbaden: Springer Fachmedien Wiesbaden. DOI: 10.1007/978-3-8348-2257-4.

(Krieg et al. 2012)

Krieg, H.; Ilg, R.; Brethauer, L.; Loske, F. (2012): Environmental impact assessment of aircraft operation: A key for greening the aviation sector. In: *Aerotecnica Missili & Spazio, The Journal of Aerospace Science, Technology and Systems*, 91 (3/4), S. 73–78.

(Kristjansdottir et al. 2018)

Kristjansdottir, K.; Shafiee, S.; Hvam, L.; Forza, C.; Mortensen, N.H. (2018): The main challenges for manufacturing companies in implementing and utilizing configurators. In: *Computers in Industry*, 100, S. 196–211. DOI: 10.1016/j.compind.2018.05.001.

(Kroyan et al. 2022)

Kroyan, Y.; Wojcieszek, M.; Kaario, O.; Larmi, M. (2022): Modeling the impact of sustainable aviation fuel properties on end-use performance and emissions in aircraft jet engines. In: *Energy*, 255, S. 124470. DOI: 10.1016/j.energy.2022.124470.

(Krug 2013)

Krug, S. (2013): Don't Make Me Think, Revisited: A Common Sense Approach to Web Usability. Thousand Oaks, CA United States: New Riders Publishing.

(Kühnapfel 2021)

Kühnapfel, J.B. (2021): Scoring und Nutzwertanalysen - Ein Leitfaden für die Praxis. Wiesbaden: Springer Fachmedien. DOI: 10.1007/978-3-658-34810-6.

(Kusay-Merkle 2018)

Kusay-Merkle, U. (2018): Agiles Projektmanagement im Berufsalltag - Für mittlere und kleine Projekte. Berlin, Heidelberg: Springer. DOI: 10.1007/978-3-662-56800-2.

(Laukotka et al. 2020)

Laukotka, F.; Hanna, M.; Schwede, L.N.; Krause, D. (2020): Lebensphasenübergreifende Nutzung Digitaler Zwillinge. In: *ZWF Zeitschrift fuer Wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 115, S. 101–104. DOI: 10.3139/104.112332.

(Laukotka und Krause 2023)

Laukotka, F.N.; Krause, D. (2023): Supporting Digital Twins for the Retrofit in Aviation by a Model-Driven Data Handling. In: *Systems*, 11 (3). DOI: 10.3390/systems11030142.

(Leclercq et al. 2020)

Leclercq, T.; Deventer, C.; Heymans, P. (2020): Do product configurators comply with HCI guidelines? A preliminary study. Präsentiert auf: *The 22nd International Configuration Workshop*.

(Lee et al. 2021)

Lee, D.S.; Fahey, D.W.; Skowron, A.; Allen, M.R.; Burkhardt, U.; Chen, Q.; Doherty, S.J.; Freeman, S.; Forster, P.M.; Fuglestvedt, J.; et al. (2021): The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing for 2000 to 2018. In: *Atmospheric Environment*, 244, S. 117834. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2020.117834.

(Léonard und Nylander 2020)

Léonard, P.L.Y.; Nylander, J.W. (2020): Sustainability Assessment of Composites in Aero-Engine Components. Präsentiert auf: 2020, *Proceedings of the Design Society: DESIGN Conference*, S. 1989–1998. DOI: 10.1017/dsd.2020.29.

(Li et al. 2023)

Li, J.; Tian, Y.; Xie, K. (2023): Coupling big data and life cycle assessment: A review, recommendations, and prospects. In: *Ecological Indicators*, 153, S. 110455. DOI: 10.1016/j.ecolind.2023.110455.

(Liebetruth 2020)

Liebetruth, T. (2020): Prozessmanagement in Einkauf und Logistik - Instrumente und Methoden für das Supply Chain Management. 2. Auflage. Wiesbaden: Springer Gabler. DOI: 10.1007/978-3-658-28293-6.

(Lin 2018)

Lin, W. (2018): Catering for flight: Rethinking aeromobility as logistics. In: *Environment and Planning D: Society and Space*, 36 (4), S. 683–700. DOI: 10.1177/0263775817697977.

(Liu et al. 2023)

Liu, F.; Shafique, M.; Xiaowei, L. (2023): Literature review on life cycle assessment of transportation alternative fuels. In: *Environmental Technology & Innovation*, 32, S. 103343, DOI: 10.1016/j.eti.2023.103343.

(Liu et al. 2016)

Liu, H.; Xu, Y. "Ann"; 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. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, S. 267–283. DOI: 10.1016/j.trd.2016.08.027.

(Lopes 2010)

Lopes, J.V. de O.F. (2010): Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft. Technische Universität Lissabon. Dissertation.

(Lüdemann und Feig 2014)

Lüdemann, L.; Feig, K. (2014): Vergleich von Softwarelösungen für die Ökobilanzierung - Eine softwareergonomische Analyse. In: *Logistics Journal*, DOI: 10.2195/lj_NotRev_luedemann_de_201409_01.

(Ma et al. 2013)

Ma, N.; Liu, H.; Tian, Y.; Bai, J.; Wu, Z. (2013): Research on virtual reality based civil aircraft cabin customization system. In: *Advanced Materials Research*, 694, S. 3122–3125. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.694-697.3122.

(Magdalena und Bouzaima 2021)

Magdalena, A.; Bouzaima, M. (2021): An empirical investigation of European airline business models: Classification and hybridisation. In: *Journal of Air Transport Management*, 93, S. 102059. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2021.102059.

(Mahashabde et al. 2011)

Mahashabde, A.; Wolfe, P.; Ashok, A.; Dorbian, C.; He, Q.; Fan, A.; Lukachko, S.; Mozdzanowska, A.; Wollersheim, C.; Barrett, S.R.H.; et al. (2011): Assessing the environmental impacts of aircraft noise and emissions. In: *Progress in Aerospace Sciences*, 47, S. 15–52. DOI: 10.1016/j.paerosci.2010.04.003.

(Mami et al. 2017)

Mami, F.; Revéret, J.P.; Fallaha, S.; Margni, M. (2017): Evaluating Eco-Efficiency of 3D Printing in the Aeronautic Industry. In: *Journal of Industrial Ecology*, 21 (S1), S. 37–48. DOI: 10.1111/jiec.12693.

(Mangelsdorf 2018)

Mangelsdorf, A. (2018): Normen und Standards für die digitale Transformation. In: Axel Mangelsdorf und Petra Weiler (Hrsg.). Normen und Standards für die digitale Transformation. Berlin/Boston: De Gruyter Verlag, S. 8–14.

(Markusheska et al. 2022)

Markusheska, N.; Srinivasan, V.; Walther, J.N.; Gindorf, A.; Biedermann, J.; Meller, F.; Nagel, B. (2022): Implementing a system architecture model for automated aircraft cabin assembly processes. In: *CEAS Aeronautical Journal*, 13 (3), S. 689–703. DOI: 10.1007/s13272-022-00582-6.

(Marxen 2014)

Marxen, L. (2014): A Framework for Design Support Development based on the integrated Product Engineering Model iPeM. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dissertation.

(Mason 2010)

Mason, M. (2010): Sample size and saturation in PhD studies using qualitative interviews. In: *Forum Qualitative Sozialforschung*, 11 (3).

(Mayer 2013)

Mayer, H.O. (2013): Interview und schriftliche Befragung - Grundlagen und Methoden empirischer Sozialforschung. 6.Auflage. München: Oldenbourg Wissenschaftsverlag. DOI: 10.1524/9783486717624.

(Meixner und Haas 2015)

Meixner, O.; Haas, R. (2015): Wissensmanagement und Entscheidungstheorie - Theorien, Methoden, Anwendungen und Fallbeispiele. 3. Auflage. Wien: Facultas Universitätsverlag.

(Melo et al. 2020)

Melo, S.P.; Barke, A.; Cerdas, F.; Thies, C.; Mennenga, M.; Spengler, T.S.; Herrmann, C. (2020): Sustainability assessment and engineering of emerging aircraft technologies-challenges, methods and tools. In: *Sustainability*, 12 (14). DOI: 10.3390/su12145663.

(Meng et al. 2017)

Meng, F.; McKechnie, J.; Turner, T.A.; Pickering, S.J. (2017): Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibres. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 100, S. 206–214. DOI: 10.1016/j.compositesa.2017.05.008.

(Mensen 2013)

Mensen, H. (2013): Handbuch der Luftfahrt. 2. Auflage. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. DOI: 10.1007/978-3-642-34402-2.

(Miah et al. 2018)

Miah, J.H.; Griffiths, A.; McNeill, R.; Halvorson, S.; Schenker, U.; Espinoza-Orias, N.; Morse, S.; Yang, A.; Sadhukhan, J. (2018): A framework for increasing the availability of life cycle inventory data based on the role of multinational companies. In: *International Journal of Life Cycle Assessment*, 23 (9), S. 1744–1760. DOI: 10.1007/s11367-017-1391-y.

(Mieras et al. 2019)

Mieras, E.; Gaasbeek, A.; Kan, D. (2019): How to Seize the Opportunities of New Technologies in Life Cycle Analysis Data Collection: A Case Study of the Dutch Dairy Farming Sector. In: *Challenges*, 10 (1), S. 8. DOI: 10.3390/challe10010008.

(Modrak und Soltysova 2018)

Modrak, V.; Soltysova, Z. (2018): Process modularity of mass customized manufacturing systems: Principles, measures and assessment. In: *Procedia CIRP*, 67, S. 36–40. DOI: 10.1016/j.procir.2017.12.172.

(Moerland-Masic et al. 2021)

Moerland-Masic, I.; Reimer, F.; Bock, B.M.; Meller, F.; Nagel, B. (2021): Application of VR Technology in the Aircraft Cabin Design Process. In: *CEAS Aeronautical Journal*, DOI: 10.1007/s13272-021-00559-x.

(Mortensen Ernits et al. 2022a)

Mortensen Ernits, R.; Pupkes, B.; Keiser, D.; Reiß, M.; Freitag, M. (2022): Inflight catering services – A comparison of central and decentral galleys inside the aircraft cabin , a concept-based approach. In: *Transportation Research Procedia*, 65, S. 34–43.

(Mortensen Ernits et al. 2022b)

Mortensen Ernits, R.; Reiß, M.; Bauer, M.; Becker, A.; Freitag, M. (2022): Individualisation of Inflight Catering Meals — An Automation Concept for Integrating Pre-Ordered Meals during the Flight for All Passengers. In: *Aerospace*, 9 (736), DOI: 10.3390/aerospace9110736.

(Mueller et al. 2022)

Mueller, G.O.; Mortensen, N.H.; Hvam, L.; Haug, A.; Johansen, J. (2022): An approach for the development and implementation of commissioning service configurators in engineer-to-order companies. In: *Computers in Industry*, 142, S. 103717. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103717.

(Müller et al. 2013)

Müller, R.; Esser, M.; Vette, M. (2013): Reconfigurable handling systems as an enabler for large components in mass customized production. In: *Journal of Intelligent Manufacturing*, 24 (5), S. 977–990. DOI: 10.1007/s10845-012-0624-y.

(Myclimate gGmbH 2019)

Myclimate gGmbH (2019): Der myclimate Flugrechner. URL: https://www.myclimate.org/fileadmin/user_upload/myclimate_-_home/01_Information/01_About_myclimate/09_Calculation_principles/Documents/myclimate-Flugrechner. Abgerufen am: 18.06.2023.

(National Energy Technology Laboratory (NETL) 2005)

National Energy Technology Laboratory (NETL) (2005): NETL Life Cycle Inventory Data – Unit Process: Petroleum Based Kerosene Jet Fuel Energy Conversion Facility. U.S. Department of Energy, National Energy Technology Laboratory. URL: https://www.netl.doe.gov/projects/files/DF_ECF_Kerosene_JetFuel_Refinery_2011-02.pdf Abgerufen am: 20.3.2022.

(National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health 2014)

National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health, W. and S. (RIVM) (2014): ReCiPe 2008: Weighting factors. URL: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/downloads>. Abgerufen am: 20.3.2022.

(National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health 2017a)

National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health, W. and S. (RIVM) (2017): ReCiPe 2016: Characterisation factors. URL: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/downloads>. Abgerufen am: 20.3.2022.

(National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health 2017b)

National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health, W. and S. (RIVM) (2017): ReCiPe 2016: Mid-to-Endpoint factors. URL: <https://www.rivm.nl/en/life-cycle-assessment-lca/downloads>. Abgerufen am: 20.3.2022.

(Niță und Scholz 2009)

Niță, M.; Scholz, D. (2009): the Process Chain To a Certified Cabin Design and Conversion. Präsentiert auf: *Deutscher Luft- und Raumfahrtkongress*, Text. Abrufbar unter: http://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/CARISMA/CARISMA_PUB_DLRK_09-09-08.pdf.

(Niță und Scholz 2011)

Niță, M.F.; Scholz, D. (2011): Business opportunities in aircraft cabin conversion and refurbishing. In: *Journal of Aerospace Operations*, 1 (1–2), S. 129–153. DOI: 10.3233/aop-2011-0008.

(Oehme 2017)

Oehme, G. (2017): Fulfil Customer Order Process: Customization of Commercial Aircraft. In: Richter, K.; Walther, J. (Hrsg.), *Supply Chain Integration Challenges in Commercial Aerospace*. Cham: Springer Nature, S. 91–104. DOI: 10.1007/978-3-319-46155-7.

(Okolie et al. 2023)

Okolie, J.A.; Awotoye, D.; Tabat, M.E.; Okoye, P.U.; Epelle, E.I.; Ogbaga, C.C.; Güleç, F.; Oboirien, B. (2023): Multi-criteria decision analysis for the evaluation and screening of sustainable aviation fuel production pathways. In: *iScience*, 26, S. 106944. DOI: 10.1016/j.isci.2023.106944.

(Oliveira et al. 2022)

Oliveira, A.V.M.; Caliar, T.; Narcizo, R.R. (2022): An empirical model of fleet modernization: On the relationship between market concentration and innovation adoption by airlines. In: *Research in Transportation Business & Management*, 43, S. 100704. DOI: 10.1016/j.rtbm.2021.100704.

(Olthoff und Hinsch 2013)

Olthoff, J.J.; Hinsch, M. (2013): *Impulsgeber Luftfahrt - Industrial Leadership durch luftfahrtspezifische Aufbau- und Ablaufkonzepte*. Heidelberg: Springer Vieweg. DOI: 10.1007/978-3-642-32669-1_9.

(Page et al. 2021)

Page, M.J.; McKenzie, J.E.; Bossuyt, P.M.; Boutron, I.; Hoffmann, T.C.; Mulrow, C.D.; Shamseer, L.; Tetzlaff, J.M.; Akl, E.A.; Brennan, S.E.; et al. (2021): The PRISMA 2020 statement: An updated guideline for reporting systematic reviews. In: *PLoS Medicine*, 18 (3), S. 1–15. DOI: 10.1371/JOURNAL.PMED.1003583.

(Palma-Mendoza und Neailey 2015)

Palma-Mendoza, J.A.; Neailey, K. (2015): A business process re-design methodology to support supply chain integration: Application in an Airline MRO supply chain. In: *International Journal of Information Management*, 35 (5), S. 620–631. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2015.03.002.

(Palma-Mendoza et al. 2014)

Palma-Mendoza, J.A.; Neailey, K.; Roy, R. (2014): Business process re-design methodology to support supply chain integration. In: *International Journal of Information Management*, 34 (2), S. 167–176. DOI: 10.1016/j.ijinfomgt.2013.12.008.

(Parolin et al. 2021)

Parolin, G.; Borges, A.T.; Santos, L.C.C.; Borille, A. V. (2021): A tool for aircraft eco-design based on streamlined Life Cycle Assessment and Uncertainty Analysis. In: *Procedia CIRP*, 98, S. 565–570. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.152.

(Peffers et al. 2007)

Peffers, K.; Tuunanen, T.; Rothenberger, M.A.; Chatterjee, S. (2007): A Design Science Research Methodology for Information Systems Research. In: *Journal of Management Information Systems*, 24 (3), S. 45–77. DOI: 10.2753/MIS0742-1222240302.

(Pfungstl et al. 2022)

Pfungstl, S.; Steinweg, D.; Zimmermann, M.; Hornung, M. (2022): On the Potential of Extending Aircraft Service Time Using Load Monitoring. In: *Journal of Aircraft*, 59 (2), S. 377–385. DOI: 10.2514/1.C036569.

(Piller 2004)

Piller, F.T. (2004): Mass Customization - Ein wettbewerbsstrategisches Konzept im Informationszeitalter. 4. überarbeitete Auflage. Deutscher Universitäts-Verlag.

(Piller 2007)

Piller, F.T. (2007): Mass Customization. In: Albers, S.; Hermann, A. (Hrsg.), *Handbuch Produktionsmanagement - Strategieentwicklung - Produktplanung - Organisation - Kontrolle*. 3., überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: GWV Fachverlage GmbH, S. 941–968.

(Pine et al. 1993)

Pine, J.B.; Victor, B.; Boynton, A.C. (1993): Making mass customization work. In: *Harvard Business Review*, 5 (71).

(Pizzol et al. 2017)

Pizzol, M.; Laurent, A.; Sala, S.; Weidema, B.; Verones, F.; Koffler, C. (2017): Normalisation and weighting in life cycle assessment: quo vadis? In: *International Journal of Life Cycle Assessment*, 22 (6), S. 853–866. DOI: 10.1007/s11367-016-1199-1.

(Pohl und Rupp 2015)

Pohl, K.; Rupp, C. (2015): *Basiswissen Requirements Engineering*. 4. Auflage. Heidelberg: dpunkt Verlag.

(Pollock et al. 2021)

Pollock, D.; Davies, E.L.; Peters, M.D.J.; Tricco, A.C.; Alexander, L.; McInerney, P.; Godfrey, C.M.; Khalil, H.; Munn, Z. (2021): Undertaking a scoping review: A practical guide for nursing and midwifery students, clinicians, researchers, and academics. In: *Journal of Advanced Nursing*, 77 (4), S. 2102–2113. DOI: 10.1111/jan.14743.

(Popper 1975)

Popper, K.R. (1975): Die Logik der Sozialwissenschaften. In: Adorno, T.W.; Dahrendorf, R.; Pilot, H.; Albert, H.; Habermas, J.; Popper, Karl, R. (Hrsg.), *Der Positivismusstreit in der deutschen Soziologie*. Darmstadt, Neuwied: Hermann Luchterhand Verlag, S. 103–124.

(Porter 1985)

Porter, M.E. (1985): *The Competitive Advantage: Creating and Sustaining Superior Performance*. New York: Free Press.

(Postorino et al. 2019)

Postorino, M.N.; Mantecchini, L.; Malandri, C.; Paganelli, F. (2019): Airport Passenger Arrival Process: Estimation of Earliness Arrival Functions. In: *Transportation Research Procedia*, 37, S. 338–345. DOI: 10.1016/j.trpro.2018.12.201.

(Prümmer 2020)

Prümmer, M. (2020): Kennzahlenbasiertes Bewertungssystem der Leistungsfähigkeit verketteter Fertigungssysteme in der mechanischen Fertigung des Werkzeugbaus. Rheinisch-Westfälische Technische Hochschule Aachen (RWTH Aachen). Dissertation.

(Pryshlakivsky und Searcy 2013)

Pryshlakivsky, J.; Searcy, C. (2013): Fifteen years of ISO 14040: A review. In: *Journal of Cleaner Production*, 57, S. 115–123. DOI: 10.1016/j.jclepro.2013.05.038.

(Qureshi und Sabir 2014)

Qureshi, M.R.J.; Sabir, F. (2014): A comparison of model view controller and model view presenter. arXiv preprint. Text abrufbar unter: <http://arxiv.org/abs/1408.5786>.

(Rajaratnam und Sunmola 2021)

Rajaratnam, D.; Sunmola, F. (2021): Supply Chain Management in Airline Catering Service: Characteristics, Challenges and Trends. In: *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*.

(Ramos Huarachi et al. 2020)

Ramos Huarachi, D.A.; Piekarski, C.M.; Puglieri, F.N.; de Francisco, A.C. (2020): Past and future of Social Life Cycle Assessment: Historical evolution and research trends. In: *Journal of Cleaner Production*, 264, S. 121506. DOI: 10.1016/j.jclepro.2020.121506.

(Reichwald und Piller 2009)

Reichwald, R.; Piller, F. (2009): Interaktive Wertschöpfung in der Produktion: Individualisierung und Mass Customization. *Interaktive Wertschöpfung*, 2., vollständig überarbeitete und erweiterte Auflage. Wiesbaden: GWV Fachverlage. DOI: 10.1007/978-3-8349-9440-0_5.

(Ribeiro et al. 2020)

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. In: *Journal of Cleaner Production*, 247, S. 119477. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119477.

(Rice et al. 2020)

Rice, C.; Ragbir, N.; Rice, S.; Barcia, G. (2020): Willingness to pay for sustainable aviation depends on ticket price, greenhouse gas reductions and gender. In: *Technology in Society*, 60, S. 101224. DOI: 10.1016/j.techsoc.2019.101224.

(Richter und Witt 2017)

Richter, K.; Witt, N. (2017): Introduction: Supply Chain Integration Challenges in the Commercial Aviation Industry. In: Richter, K.; Walther, J. (Hrsg.), *Supply Chain Integration Challenges in Commercial Aerospace*. Cham: Springer International Publishing. DOI: 10.1007/978-3-319-46155-7.

(Robertson 2016)

Robertson, S. (2016): The potential mitigation of CO2 emissions via modal substitution of high-speed rail for short-haul air travel from a life cycle perspective - An Australian case study. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, S. 365–380. DOI: 10.1016/j.trd.2016.04.015.

(Robertson 2018)

Robertson, S. (2018): A carbon footprint analysis of renewable energy technology adoption in the modal substitution of high-speed rail for short-haul air travel in Australia. In: *International Journal of Sustainable Transportation*, 12 (4), S. 299–312. DOI: 10.1080/15568318.2017.1363331.

(Rodríguez und Ciroth 2014)

Rodríguez, C.; Ciroth, A. (2014): LCIA methods - Impact Assessment Methods in Life Cycle Assessment and Their Impact Categories. Berlin: *Green Delta*. Report. Abrufbar unter: <https://www.openlca.org/wp-content/uploads/2015/11/LCA-METHODS-v.1.5.2.pdf>.

(Röhl 2018)

Röhl, K.-H. (2018): Luftfahrtindustrie: Problematisches Duopol. Institut der deutschen Wirtschaft. IW Kurzbericht.

(Rojas-Michaga et al. 2023)

Rojas-Michaga, M.F.; Michailos, S.; Cardozo, E.; Akram, M.; Hughes, K.J.; Ingham, D.; Pourkashanian, M. (2023): Sustainable aviation fuel (SAF) production through power-to-liquid (PtL): A combined techno-economic and life cycle assessment. In: *Energy Conversion and Management*, 292, S. 117427. DOI: 10.1016/j.enconman.2023.117427.

(Rolinck et al. 2021)

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. In: *Procedia CIRP*, 98, S. 394–399. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.123.

(Rousseau et al. 2020)

Rousseau, M.; Medini, K.; Romero, D.; Wuest, T. (2020): Configurators as a means to Leverage Customer-Centric Sustainable Systems - Evidence from the 3D-Printing Domain. In: *Procedia CIRP*, 96, S. 103–108. DOI: 10.1016/j.procir.2021.01.060.

(Rupcic et al. 2023)

Rupcic, L.; Pierrat, E.; Saavedra-Rubio, K.; Thonemann, N.; Ogugua, C.; Laurent, A. (2023): Environmental impacts in the civil aviation sector: Current state and guidance. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 119, S. 103717. DOI: 10.1016/j.trd.2023.103717.

(Ryley et al. 2020)

Ryley, T.; Baumeister, S.; Coulter, L. (2020): Climate change influences on aviation: A literature review. In: *Transport Policy*, 92, S. 55–64. DOI: 10.1016/j.tranpol.2020.04.010.

(Saaty 1987)

Saaty, R.W. (1987): The analytic hierarchy process -What it is and how it is used. In: *Mathematical Modelling*, 9 (3–5), S. 161–176. DOI: 10.1016/0270-0255(87)90473-8.

(Saaty 1980)

Saaty, T.L. (1980): *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority setting, Resource Allocation*. New York: McGraw-Hill International Book Company.

(Saaty 1995)

Saaty, T.L. (1995): *Decision Making for Leaders - The Analytic Hierarchy Process for Decisions in a Complex World*. 3. Auflage. Pittsburgh, PA: RWS Publications.

(Saavedra-Rubio et al. 2022)

Saavedra-Rubio, K.; Thonemann, N.; Crenna, E.; Lemoine, B.; Caliandro, P.; Laurent, A. (2022): Stepwise guidance for data collection in the life cycle inventory (LCI) phase: Building technology-related LCI blocks. In: *Journal of Cleaner Production*, 366, S. 132903. DOI: 10.1016/j.jclepro.2022.132903.

(Sabaghi et al. 2015)

Sabaghi, M.; Cai, Y.; Mascle, C.; Baptiste, P. (2015): Sustainability assessment of dismantling strategies for end-of-life aircraft recycling. In: *Resources, Conservation and Recycling*, 102, S. 163–169. DOI: 10.1016/j.resconrec.2015.08.005.

(Sabioni et al. 2021)

Sabioni, R.; Wartelle, L.; Daaboul, J.; Le Duigou, J. (2021): Attribute-based integrated product process configurator for mass customization. In: *Procedia CIRP*, 103, S. 140–145. DOI: 10.1016/j.procir.2021.10.022.

(Said und Al-Qadi 2019)

Said, I.M.; Al-Qadi, I.L. (2019): Iterative Framework for Performance and Environmental Impacts of Airfields. In: *Transportation Research Record*, 2673 (9), S. 179–187. DOI: 10.1177/0361198119844460.

(Samani 2023)

Samani, P. (2023): Synergies and gaps between circularity assessment and Life Cycle Assessment (LCA). In: *Science of the Total Environment*, 903, S. 166611. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2023.166611.

(Scelsi et al. 2011)

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. In: *Express Polymer Letters*, 5 (3), S. 209–217. DOI: 10.3144/expresspolymlett.2011.20.

(Schanz 1987)

Schanz, G. (1987): Wissenschaftstheoretische Grundfragen der Führungsforschung. In: Kieser, A.; Reber, G.; Wunderer, R. (Hrsg.), *Handwörterbuch der Führung*. Stuttgart: Schäffer-Poeschel Verlag, S. 2039–2047.

(Scheelhaase et al. 2022)

Scheelhaase, J.; Müller, L.; Ennen, D.; Grimme, W.; Scheelhaase, J.; Müller, L.; Ennen, D.; Grimme, W. (2022): Environmental Aspects of Aircraft Recycling. In: 2022, *Transportation Research Procedia*, 65, S. 3–12. DOI: 10.1016/j.trpro.2022.11.002.

(Schenk et al. 2012)

Schenk, M.; von Garrel, J.; Theilmann, C. (2012): Interaktive Wertschöpfung produktiv gestalten. In: *Zeitschrift für wirtschaftlichen Fabrikbetrieb*, 107 (10), S. 757–760. DOI: 10.3139/104.110837.

(Schlicksupp 2004)

Schlicksupp, H. (2004): *Innovation, Kreativität und Ideenfindung*. 6. Auflage. Würzburg: Vogel Buchverlag.

(Schnell et al. 2011)

Schnell, R.; Hill, P.B.; Esser, E. (2011): *Methoden der empirischen Sozialforschung*. 9. Auflage. München: De Gruyter Oldenbourg.

(Scholz et al. 2022)

Scholz, A.E.; Trifonov, D.; Hornung, M. (2022): Environmental life cycle assessment and operating cost analysis of a conceptual battery hybrid-electric transport aircraft. In: *CEAS Aeronautical Journal*, 13, S. 215–235. DOI: 10.1007/s13272-021-00556-0.

(Scholz 2020)

Scholz, D. (2020): Calculation of the Emission Characteristics of Aircraft Kerosene and Hydrogen Propulsion. Harvard Dataverse, V4. DOI: <https://doi.org/10.7910/DVN/DLJUUK>.

(Schrijvers et al. 2019)

Schrijvers, D.; Tsang, M.; Castells, R.; Sonnemann, G. (2019): Life Cycle Assessment. In: Sonnemann, G.; Tsang, M.; Schuhmacher, M. (Hrsg.), *Integrated Life-Cycle and Risk Assessment for Industrial Processes and Products*. 2. Auflage. Boca Raton: CRC Press. S. 33-78.

(Schwartz und Kroo 2009)

Schwartz, E.; Kroo, I.M. (2009): Aircraft design: Trading cost and climate impact. Präsentiert auf: 2009, *47th AIAA Aerospace Sciences Meeting Including The New Horizons Forum and Aerospace Exposition*.

(Schwinn 2011)

Schwinn, H. (2011): *Requirements Engineering - Modellierung von Anwendungssystemen*. München: Oldenbourg Verlag. DOI: 10.1524/9783486711615.

(Severis et al. 2019)

Severis, R.M.; Simioni, F.J.; Moreira, J.M.M.A.P.; Alvarenga, R.A.F. (2019): Sustainable consumption in mobility from a life cycle assessment perspective. In: *Journal of Cleaner Production*, 234, S. 579–587. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.06.203.

(Shafiee et al. 2017)

Shafiee, S.; Hvam, L.; Haug, A.; Dam, M.; Kristjansdottir, K. (2017): The documentation of product configuration systems: A framework and an IT solution. In: *Advanced Engineering Informatics*, 32, S. 163–175. DOI: 10.1016/j.aei.2017.02.004.

(Shafiee et al. 2020)

Shafiee, S.; Wautelet, Y.; Hvam, L.; Sandrin, E.; Forza, C. (2020): Scrum versus Rational Unified Process in facing the main challenges of product configuration systems development. In: *Journal of Systems and Software*, 170, S. 110732. DOI: 10.1016/j.jss.2020.110732.

(Shafiee et al. 2023)

Shafiee, S.; Sandrin, E.; Forza, C.; Kristjansdottir, K.; Haug, A.; Hvam, L. (2023): Framing business cases for the success of product configuration system projects. In: *Computers in Industry*, 146, S. 103839. DOI: 10.1016/j.compind.2022.103839.

(Shen et al. 2016)

Shen, W.; Ceylan, H.; Gopalakrishnan, K.; Kim, S.; Taylor, P.C.; Rehmann, C.R. (2016): Life cycle assessment of heated apron pavement system operations. In: *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 48, S. 316–331. DOI: 10.1016/j.trd.2016.08.006.

(Shine et al. 2005)

Shine, K.P.; Fuglestvedt, J.S.; Hailemariam, K.; Stuber, N. (2005): Alternatives to the Global Warming Potential for Comparing Climate Impacts of Emissions of Greenhouse Gases. In: *Climatic Change*, 68 (3), S. 281–302. DOI: 10.1007/s10584-005-1146-9.

(Songbin et al. 2016)

Songbin, D.; Raichen, G.; Xiaoli, W. (2016): Grey Incidence Analysis Applied to Civil Aircraft Customization Process. In: *Transactions of Nanjing University of Aeronautics & Astronautics*, 32 (2), S. 137-146.

(Şöhret et al. 2019)

Şöhret, Y.; Ekici, S.; Altuntas, O.; Karakoc, T.H. (2019): LCA of the maintenance of a piston-prop engine. In: *Aircraft Engineering and Aerospace Technology*, 91 (7), S. 987–993. DOI: 10.1108/AEAT-05-2017-0116.

(Spreatico und Russo 2020)

Spreatico, C.; Russo, D. (2020): Exploiting the Scientific Literature for Performing Life Cycle Assessment about Transportation. In: *Sustainability*, 12 (18). DOI: 10.3390/su12187548.

(Stachowiak 1973)

Stachowiak, H. (1973): Allgemeine Modelltheorie. Wien, New York: Springer Verlag.

(Steinmetz 2004)

Steinmetz, S. (2004): Was Ist Wissenschaftliche Arbeitsweise?. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Bericht.

(Sziroczak et al. 2020)

Sziroczak, D.; Jankovics, I.; Gal, I.; Rohacs, D. (2020): Conceptual design of small aircraft with hybrid-electric propulsion systems. In: *Energy*, 204, S. 117937. DOI: 10.1016/j.energy.2020.117937.

(Talbot 2004)

Talbot, S. (2004): The Product, Functional Unit and Reference Flows in LCA. Environmental News. No.70.

(Tang et al. 2017)

Tang, D.; Wang, Q.; Ullah, I. (2017): Optimisation of product configuration in consideration of customer satisfaction and low carbon. In: *International Journal of Production Research*, Taylor & Francis, 55 (12), S. 3349–3373. DOI: 10.1080/00207543.2016.1231430.

(Theilmann und Hukauf 2014)

Theilmann, C.; Hukauf, M. (2014): Customer integration in mass customisation: A key to corporate success. In: *International Journal of Innovation Management*, 18 (3). DOI: 10.1142/S1363919614400027.

(Thompson et al. 1990)

Thompson, Mi.; Ellis, R.; Wildavsky, A. (1990): Cultural Theory. New York: Routledge.

(Timmis et al. 2014)

Timmis, A.; Hodzic, A.; Koh, L.; Bonner, M.; Schhäfer, A.W.; Dray, L. (2014): Lifecycle Assessment of CFRP Aircraft Fuselage. In: *Proceedings of the 16th European Conference on Composite Materials ECCM16, Seville, Spain*, S. 22–26.

(Torres-Carrillo et al. 2020)

Torres-Carrillo, S.; Siller, H.R.; Vila, C.; López, C.; Rodríguez, C.A. (2020): Environmental analysis of selective laser melting in the manufacturing of aeronautical turbine blades. In: *Journal of Cleaner Production*, 246, S. 119068. DOI: 10.1016/j.jclepro.2019.119068.

(Tremblay et al. 2010)

Tremblay, M.C.; Hevner, A.R.; Berndt, D.J. (2010): Focus Groups for Artifact Refinement and Evaluation in Design Research. In: *Communications of the Association for Information Systems*, 26, S. 599–618. DOI: 10.17705/1cais.02627.

(Trentin et al. 2012)

Trentin, A.; Perin, E.; Forza, C. (2012): Product configurator impact on product quality. In: *International Journal of Production Economics*, 135 (2), S. 850–859. DOI: 10.1016/j.ijpe.2011.10.023.

(Tretheway und Markhvida 2014)

Tretheway, M.W.; Markhvida, K. (2014): The aviation value chain: Economic returns and policy issues. In: *Journal of Air Transport Management*, 41, S. 3–16. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2014.06.011.

(Tsai et al. 2014)

Tsai, W.H.; Chang, Y.C.; Lin, S.J.; Chen, H.C.; Chu, P.Y. (2014): A green approach to the weight reduction of aircraft cabins. In: *Journal of Air Transport Management*, 40, S. 65–77. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2014.06.004.

(U.S. EPA) 2018)

U.S. Environmental Protection Agency - EPA (2018): Emission Factors for Greenhouse Gas Inventories. URL: https://www.epa.gov/sites/default/files/2018-03/documents/emission-factors_mar_2018_0.pdf. Abgerufen am: 20.3.2022.

(Ucler und Gok 2015)

Ucler, C.; Gok, O. (2015): Innovating General Aviation MRO's through IT: The Sky Aircraft Management System - SAMS. In: *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 195, S. 1503–1513. DOI: 10.1016/j.sbspro.2015.06.452.

(Ulrich und Hill 1976)

Ulrich, P.; Hill, W. (1976): Wissenschaftstheoretische Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre (Teil II). In: *Wirtschaftswissenschaftliches Studium: Zeitschrift für Ausbildung und Hochschulkontakt*, 5 (8), S. 345–350.

(VDI Richtlinie 2221 1993)

Verein Deutscher Ingenieure e.V. (1993): VDI Richtlinie 2221: Methodik zum Entwickeln und Konstruieren technischer Systeme und Produkte.

(Venable et al. 2012)

Venable, J.; Pries-Heje, J.; Baskerville, R. (2012): A Comprehensive Framework for Evaluation in Design Science Research. In: Peffers, K.; Rothenberger, M.; Kuechler, B. (Hrsg.) *Design Science Research in Information Systems - Advances in Theory and Practice*, Heidelberg, Dordrecht, London, NewYork: Springer, S. 423–439. DOI: 10.1007/978-3-642-29863-9_5.

(Viberg und Mattnrro 1996)

Viberg, K.B.; Mattnrro, M.G. (1996): LCA - How it Came About - Personal Reflections on the Origin and the Development of the LCA in the USA. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 1 (1), S. 4–7. DOI: 10.1016/S0040-4039(01)81937-7.

(Vidal et al. 2018)

Vidal, R.; Moliner, E.; Martin, P.P.; Fita, S.; Wonneberger, M.; Verdejo, E.; Vanfleteren, F.; Lapeña, N.; González, A. (2018): Life Cycle Assessment of Novel Aircraft Interior Panels Made from Renewable or Recyclable Polymers with Natural Fiber Reinforcements and Non-Halogenated Flame Retardants. In: *Journal of Industrial Ecology*, 22 (1), S. 132–144. DOI: 10.1111/jiec.12544.

(Vieira und Bravo 2016)

Vieira, D.R.; Bravo, A. (2016): Life cycle carbon emissions assessment using an eco-demonstrator aircraft: The case of an ecological wing design. In: *Journal of Cleaner Production*, 124, S. 246–257. DOI: 10.1016/j.jclepro.2016.02.089.

(Viera 2016)

Viera, M. (2016): Impact assessment in the PEF initiative. Artikel URL: <https://pre-sustainability.com/articles/pef-series-impact-assessment-in-the-pef-approach/>. Abgerufen am: 12.08.2023.

(Vinodh et al. 2017)

Vinodh, S.; Sivaraj, G.; Nithish, S.; Veeramanikandan, R. (2017): Life cycle assessment of an aircraft component: a case study. In: *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 27 (4), S. 485. DOI: 10.1504/IJISE.2017.10008235.

(Volvo Group 2023)

Volvo Group (2023): Environmental footprint calculator for trucks. URL: <https://www.volvotrucks.com/en-en/trucks/renewable-fuels/environmental-footprint.html>. Abgerufen am: 14.09.2023.

(Wandelt et al. 2023)

Wandelt, S.; Sun, X.; Zhang, A. (2023): Is the aircraft leasing industry on the way to a perfect storm? Finding answers through a literature review and a discussion of challenges. In: *Journal of Air Transport Management*, 111, S. 102426. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2023.102426.

(Wang et al. 2018)

Wang, J.; Yuan, J.; Xiao, F.; Li, Z.; Wang, J.; Xu, Z. (2018): Performance investigation and sustainability evaluation of multiple-polymer asphalt mixtures in airfield pavement. In: *Journal of Cleaner Production*, 189, S. 67–77. DOI: 10.1016/j.jclepro.2018.03.208.

(Watson und Taminger 2018)

Watson, J.K.; Taminger, K.M.B. (2018): A decision-support model for selecting additive manufacturing versus subtractive manufacturing based on energy consumption. In: *Journal of Cleaner Production*, 176, S. 1316–1322. DOI: 10.1016/j.jclepro.2015.12.009.

(Weidema et al. 2013)

Weidema, B.P.; Bauer, C.; Hischer, R.; Mutel, C.; Nemecek, T.; Reinhard, J.; Vadenbo, C.O.; Wernet, G. (2013): Data quality guideline for the ecoinvent database version 3. Ecoinvent Report 1(v3). St. Gallen: The ecoinvent Centre.

(Weidema und Wesnæs 1996)

Weidema, B.P.; Wesnæs, M.S. (1996): Data quality management for life cycle inventories-an example of using data quality indicators. In: *Journal of Cleaner Production*, 4 (3–4), S. 167–174. DOI: 10.1016/S0959-6526(96)00043-1.

(Wessel et al. 2019)

Wessel, D.; Attig, C.; Franke, T. (2019): ATI-S – An Ultra-Short Scale for Assessing Affinity for Technology Interaction in User Studies. In: *Proceedings of Mensch und Computer - Tagungsband*, S. 147–154. DOI: 10.1145/3340764.3340766.

(Westkämper 2013)

Westkämper, E. (2013): Produktlebenszyklusmanagement. In: Westkämper, E.; Spath, D.; Constantinescu, C.; Lentjes, J. (Hrsg.), *Digitale Produktion*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg, S. 151–162. DOI: 10.1007/978-3-642-20259-9_8.

(Westphal 2016)

Westphal, D. (2016): Adaptive Verkürzung des Analytischen Hierarchie Prozesses zur rationalen Lösung multikriterieller Entscheidungsprobleme. Technische Universität Berlin. Dissertation.

(Winzer 2013)

Winzer, P. (2013): *Generic Systems Engineering - Ein methodischer Ansatz zur Komplexitätsbewältigung*. Berlin, Heidelberg: Springer Vieweg. DOI: 10.1007/978-3-642-30365-4.

(Witik et al. 2012)

Witik, R.A.; Gaille, F.; Teuscher, R.; Ringwald, H.; Michaud, V.; Månson, J.A.E. (2012): Economic and environmental assessment of alternative production methods for composite aircraft components. In: *Journal of Cleaner Production*, 29–30, S. 91–102. DOI: 10.1016/j.jclepro.2012.02.028.

(Woidasky und Jeanvré 2022)

Woidasky, J.; Jeanvré, S. (2022): Flugzeuge in der Kreislaufwirtschaft. In: Porth, M.; Schüttrumpf Holger (Hrsg.), *Wasser, Energie und Umwelt*. Wiesbaden: Springer Vieweg, S. 91–101. DOI: 10.1007/978-3-658-35607-1_45.

(Yin et al. 2023)

Yin, Y.; Yang, B.; Wang, S.; Li, S.; Fu, G. (2023): Cloud service composition of collaborative manufacturing in main manufacturer-suppliers mode for aviation equipment. In: *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 84, S. 102603. DOI: 10.1016/j.rcim.2023.102603.

(Zhang et al. 2023)

Zhang, J.; Roumeliotis, I.; Zhang, X.; Zolotas, A. (2023): Techno-economic-environmental evaluation of aircraft propulsion electrification: Surrogate-based multi-mission optimal design approach. In: *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 175, S. 113168. DOI: 10.1016/j.rser.2023.113168.

(Zhang et al. 2020)

Zhang, L.; Butler, T.L.; Yang*, B. (2020): Recent Trends, Opportunities and Challenges of Sustainable Aviation Fuel. In: Vertés, A.A.; Qureshi, N.; Blaschek, H.P.; Yukawa, H. (Hrsg.), *Green Energy to Sustainability: Strategies for Global Industries*. Hoboken: John Wiley & Sons Ltd, S. 85–110. DOI: 10.1002/9781119152057.ch5.

(Zhang 2014)

Zhang, L.L. (2014): Product configuration: A review of the state-of-the-art and future research. In: *International Journal of Production Research*, 52 (21), S. 6381–6398. DOI: 10.1080/00207543.2014.942012.

(Zimmer 2016)

Zimmer, K. (2016): Entscheidungsunterstützung zur Auswahl und Steuerung von Lieferanten und Lieferketten unter Berücksichtigung von Nachhaltigkeitsaspekten. Karlsruher Institut für Technologie (KIT). Dissertation.

(Zimmermann und Gutsche 1991)

Zimmermann, H.-J.; Gutsche, L. (1991): *Multi-Criteria Analyse - Einführung in die Theorie der Entscheidungen bei Mehrfachzielsetzungen*. Berlin, Heidelberg: Springer.

Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1:	Kausale Ableitung der Motivation dieser Arbeit (angelehnt an Keiser et al. 2023b).....	2
Abbildung 2:	Forschungsfeld und relevante angrenzende Forschungsfelder dieser Arbeit (Darstellungsform nach Blessing und Chakrabarti 2009).....	4
Abbildung 3:	Wissenschaftstheoretische Einordnung der Ingenieurwissenschaften (angelehnt an Ulrich und Hill 1976).....	5
Abbildung 4:	Schritte des DSR-Prozesses als Vorgehensmodell dieser Arbeit und Zuordnung der Kapitel (angelehnt an Peffers et al. 2007)	7
Abbildung 5:	Struktur dieser Arbeit	10
Abbildung 6:	Lebenszyklen in der Luftfahrtindustrie (angelehnt an Keiser et al. 2023e; Melo et al. 2020)	12
Abbildung 7:	Struktur der Wertschöpfungskette in der Luftfahrtindustrie (angelehnt an Ghadge et al. 2018; Hinsch 2019; Tretheway und Markhvida 2014)	14
Abbildung 8:	Gliederung von Verkehrsflugzeugen nach Hauptkomponenten (eigene Darstellung angelehnt an Johanning 2017)	16
Abbildung 9:	Hierarchische Gliederung eines Flugzeugtyps mittels Ebenen (angelehnt an Ilg 2015).....	18
Abbildung 10:	Allgemeiner Konfigurationsprozess auf Basis von Modulen (angelehnt an Reichwald und Piller 2009).....	20
Abbildung 11:	Verortung des Konfigurationsprozess der Flugzeugkabine im FCO-Prozess (angelehnt an Oehme 2017).....	25
Abbildung 12:	Beispielhafte Flugzeugkabine eines A350 (eigene Darstellung auf Basis einer konfigurierten Kabine mit Airbus SE 2023)	25
Abbildung 13:	Übersicht der Dimensionen zur Bewertung der Nachhaltigkeit zur Einordnung und Abgrenzung der Ökobilanzmethode (angelehnt an Andes 2019; Guinée et al. 2011a; Zimmer 2016)	30
Abbildung 14:	Vorgehen für Ökobilanzierungen nach DIN ISO (DIN EN ISO 14040 2009).....	31
Abbildung 15:	Allgemeiner und idealisierter Lebenszyklus von Produkten (angelehnt an Schrijvers et al. 2019)	32
Abbildung 16:	Schritte der Wirkungsabschätzung (angelehnt an Viera 2016).....	34
Abbildung 17:	Übersicht über die ReCiPe-Methode 2016 V.1.1 mit 18 Midpoint Indikatoren (übersetzt und angelehnt an Huijbregts et al. 2017a).....	36
Abbildung 18:	Ergebnisse der systematischen Literaturanalyse: Veröffentlichungen pro Jahr sowie Kategorisierung auf Basis der Lebenszyklen (Keiser et al. 2023e).....	42
Abbildung 19:	Ergebnisse der Analyse zu den verwendeten Wirkungsabschätzungsmethoden (Keiser et al. 2023e).....	45
Abbildung 20:	Bewertung der Dokumentationsqualität. Mittelwerte für alle 45 analysierten Beiträge (Keiser et al. 2023e)	47
Abbildung 21:	Phasen eines Flugzyklus gegliedert nach LTO- und CCD-Phase (angelehnt an EUROCONTROL 2016).....	50
Abbildung 22:	Konzeptioneller Rahmen dieser Arbeit.....	57

Abbildung 23:	Vorgehen zur Analyse des Anwendungsfalls sowie zur Anforderungsanalyse.....	58
Abbildung 24:	Vorgehen zur Bewertung der Potenziale hinsichtlich der Anwendung von Ökobilanzen mittels mehrstufigem AHP (angelehnt an Keiser et al. 2023d) ..	60
Abbildung 25:	Ergebnis der Potenzialbewertung mittels AHP (angelehnt an Keiser et al. 2023d).....	61
Abbildung 26:	Ergebnis der Befragung zur Bewertung der Anwendungsfälle von Ökobilanzen mit Fokus auf Flugzeugkabinen.....	62
Abbildung 27:	Ergebnisse der Befragung von Fluggesellschaften zur Bewertung der Relevanz des Ansatzes (Airbus Operations GmbH 2022).....	63
Abbildung 28:	Struktur und Gegenstände zur Ermittlung der Anforderungen	64
Abbildung 29:	Barrieren und Herausforderungen des Informationsaustausches (angelehnt an Jäger-Roschko und Petersen 2022).....	67
Abbildung 30:	Charakterisierung der Befragten hinsichtlich der Vorerfahrungen mit Ökobilanzen.....	70
Abbildung 31:	Ergebnisse der Befragung zu Herausforderungen für die Implementierung ...	72
Abbildung 32:	Systemgrenzen für die Entwicklung von Prozessmodell und Methodik (nach Keiser et al. 2023e; Melo et al. 2020).....	78
Abbildung 33:	Übersicht der verwendeten BPMN 2.0 Symbole im Rahmen dieser Arbeit (angelehnt an Freund und Rucker 2019; Gadatsch 2015).....	80
Abbildung 34:	Methodisches Vorgehen zur Entwicklung des Prozessmodells (angelehnt an Palma-Mendoza et al. 2014)	81
Abbildung 35:	Interaktionsmatrix zur Ermittlung von Datenverfügbarkeiten entlang des Produktlebenszyklus	83
Abbildung 36:	Wirkmodell zur Veranschaulichung von möglichen Zielkonflikten.....	84
Abbildung 37:	Abgeleitete abstrakte Prozessmodellvarianten	86
Abbildung 38:	Abstraktes Datenflussmodell auf Basis der bisherigen Erkenntnisse.....	88
Abbildung 39:	Konzeption des Prozessmodells.....	89
Abbildung 40:	Übersicht über das gesamte Prozessmodell.....	90
Abbildung 41:	Teilprozess Initialisierung Daten- und Zuliefererintegration	91
Abbildung 42:	Reifegradmodell zur Bewertung der Zulieferer hinsichtlich der Anwendung von Ökobilanzen.....	92
Abbildung 43:	Teilprozess Datenerhebung als Teil der Sachbilanz	94
Abbildung 44:	Teilprozess Sachbilanz und Wirkungsabschätzung	95
Abbildung 45:	Richtlinie zur Wirkungsabschätzung	95
Abbildung 46:	Ausschnitt des entwickelten Schnittstellendokuments.....	96
Abbildung 47:	Teilprozess Daten-Aggregation und Auswertung	97
Abbildung 48:	Methodisches Vorgehen zur Entwicklung der Ökobilanzmethode (angelehnt an VDI Richtlinie 2221 1993)	100
Abbildung 49:	Konzeptioneller Rahmen der Methodik zur Integration der Ökobilanzmethode.....	101
Abbildung 50:	Flussdiagramm der entwickelten Methodik (angelehnt an Keiser et al. 2023a).....	102

Abbildung 51:	Konzeption des Phasenmodells zur Integration in den Konfigurationsprozess	115
Abbildung 52:	Zielkonflikt-Dreieck der Flugzeugkabine. Idealierte Verortung von FSC und LCC	116
Abbildung 53:	Architekturbeschreibung der prototypischen softwaretechnischen Umsetzung.....	122
Abbildung 54:	Ablauf der Anwendung und Struktur der Nutzeroberfläche	123
Abbildung 55:	Ausschnitt I softwaretechnische Umsetzung: Auswahl Flugzeugtyp	124
Abbildung 56:	Ausschnitt II softwaretechnische Umsetzung: Grundlegende Parameter und Missionsprofil.....	125
Abbildung 57:	Ausschnitt III softwaretechnische Umsetzung: Konfiguration Bordküchenausstattung.....	125
Abbildung 58:	Ausschnitt IV softwaretechnische Umsetzung: Vergleich von zwei Flugzeugkabinen (beispielhafte Datensätze)	126
Abbildung 59:	Vorgehen für die Anwendung der entwickelten Methodik	128
Abbildung 60:	Anteil der Lebensphasen am Single Score.....	131
Abbildung 61:	Anteil der Midpoint Indikatoren am Single Score nach Gewichtung und Normalisierung.....	131
Abbildung 62:	Anteil der Lebenszyklusphasen an den Midpoint Indikatoren.....	132
Abbildung 63:	Einordnung des erreichten SUS-Scales der Nutzerstudie (Einordnung und grafische Darstellung angelehnt an Bangor et al. 2009)	142
Abbildung 64:	Morphologie für den Vergleich verschiedenerer Konfigurationsprozesse.....	150

Tabellenverzeichnis

Tabelle 1:	Übersicht der verwendeten Methoden innerhalb dieser Arbeit	8
Tabelle 2:	Möglichkeiten zur Individualisierung von Flugzeugen (angelehnt an Ackert 2013).....	22
Tabelle 3:	Übersicht von Methoden zur Wirkungsabschätzung (angelehnt und erweitert an Ausberg et al. 2015)	37
Tabelle 4:	Identifizierte Anwendungsfälle und Ziele von Ökobilanzierungen. Geordnet anhand des Wertschöpfungsprozesses von Porter (angelehnt an Keiser et al. 2023d).....	39
Tabelle 5:	Zuordnung der Veröffentlichungen nach Flugzeugsystemstruktur (angelehnt an Keiser et al. 2023e).....	43
Tabelle 6:	Vergleich von spezifischen Methoden zur Umweltbewertung in der Luftfahrtindustrie (angelehnt an Keiser et al. 2023a).....	49
Tabelle 7:	Übersicht identifizierter Datenquellen zur Umweltbewertung von Verkehrsflugzeugen (angelehnt an Keiser et al. 2023a).....	53
Tabelle 8:	Durchgeführte Workshops zur Ermittlung der Anforderungen an das Prozessmodell	65
Tabelle 9:	Aufgestellte Anforderungen (PM-Ai) an das Prozessmodell zur Integration von Zulieferern auf Basis der eingesetzten Methoden	67
Tabelle 10:	Übersicht der identifizierten Standards. Ergebnis der Normenrecherche	69
Tabelle 11:	Aufgestellte Anforderungen (OM-Ai) an die zu entwickelnde Methodik auf Basis der eingesetzten Methoden	69
Tabelle 12:	Aufgestellte Anforderungen (PH-Ai) an das Phasenmodell zur Implementierung in den Konfigurationsprozess auf Basis der eingesetzten Methoden	73
Tabelle 13:	Aufgestellte Anforderungen (SB-Ai) an Systemarchitektur und Benutzeroberfläche auf Basis der eingesetzten Methoden.....	74
Tabelle 14:	Kriterien zur Definition von Systemgrenzen und Beschreibung für den vorliegenden Anwendungsfall. Kriterien basierend auf ISO 14040.....	77
Tabelle 15:	Unterscheidung nach primären Stakeholderdaten und Sekundärdaten	82
Tabelle 16:	Bewertung der entwickelten Prozessmodellvarianten	87
Tabelle 17:	Gesamtdatenqualitätsniveau der Pedigree-Matrix und Implikationen für die Datenerhebung (angelehnt an Europäische Union 2013).....	93
Tabelle 18:	Ziel und Untersuchungsrahmen sowie Eingrenzung der Ökobilanzmethode	103
Tabelle 19:	Angenommene Dauer innerhalb des LTO-Zyklus (Mensen 2013)	105
Tabelle 20:	Emissionsfaktoren für die Verbrennung von Kerosin während der LTO- und CCD-Phase (Graichen et al. 2010; International Civil Aviation Organization (ICAO) 2021).....	109
Tabelle 21:	Emissionsfaktoren für die Herstellung von Kerosin (European Commission 2018; National Energy Technology Laboratory (NETL) 2005).....	109
Tabelle 22:	Schritt I des Phasenmodells – Fortlaufende Vorbereitung und Initiierung.....	116
Tabelle 23:	Schritt II des Phasenmodells – Durchführung	117
Tabelle 24:	Schritt III des Phasenmodells – Abschluss	118
Tabelle 25:	Infrastruktur der entwickelten Anwendung	121

Tabelle 26:	Gewählte Parameter für die Anwendung der Methodik	129
Tabelle 27:	Zusammenfassung des gewählten Kabinenlayouts.....	129
Tabelle 28:	Vergleich der beiden Kabinenkonfigurationen anhand der Single Scores	132
Tabelle 29:	Analyse der Evaluationsgegenstände und Definition der Anforderungen (angelehnt an Venable et al. 2012)	134

Anhang

Inhaltsübersicht

A.1	Liste betreuter Abschlussarbeiten	189
A.2	Liste eigener relevanter Veröffentlichungen und Patente	190
A.2.1	Veröffentlichungen	190
A.2.2	Öffentlich einsehbare Patentanmeldungen.....	191
A.3	Ergebnisse der durchgeführten Passagierbefragung.....	192
A.4	Übersicht und Erklärung der Midpoint Indikatoren in ReCiPe-Methode	195
A.5	Dokumentation zur systematischen Literaturanalyse	196
A.5.1	Methodische Vorgehensweise	196
A.5.2	Ergebnisse	197
A.6	Ergebnisse des analytischen Hierarchieprozesses.....	205
A.7	Dokumentation der Befragung zur Anforderungsermittlung.....	207
A.8	Dokumentation zur Analyse der Anforderungen von Artefakt drei (Softwaretechnische Umsetzung).....	209
A.8.1	Dokumentation Fokusgruppe	209
A.8.2	Detaillierte Anforderungsliste für Softwareentwicklung	210
A.9	Pedigree-Matrix zur Bewertung der Datenqualität	212
A.10	Notwendige Datensätze für die Anwendung der Methodik.....	213
A.10.1	Treibstoffverbrauch und Emissionsfaktoren für zwei typische Triebwerke in der LTO-Phase	213
A.10.2	Gleichung und Datensätze für Interpolationen	213
A.10.3	Erläuterungen und Daten zur höhenabhängigen Wirkung	214
A.10.4	Notwendige Charakterisierungsfaktoren	216
A.10.5	Mid-to-Endpoint Faktoren	217
A.10.6	Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren	218
A.11	Benutzeroberflächen	220
A.11.1	Mock-UP für eine digitale Schnittstelle der Zulieferer	220
A.11.2	Benutzeroberfläche der prototypischen Implementierung	222
A.12	Daten zur Anwendung der Methodik	227
A.13	Dokumentation zur Evaluation.....	233
A.13.1	Transkripte der Experteninterviews	233
A.13.2	Datensätze für Vergleich mit Modellierungssoftware	253
A.13.3	Daten zur Nutzerstudie	254

A.1 Liste betreuter Abschlussarbeiten

Im Rahmen der hier vorliegenden Arbeit wurden folgenden Abschlussarbeiten betreut. Teilergebnisse dieser Arbeiten haben Einzug in diese Schrift gefunden.

(Schnoor 2022)

Lars Henrik Schnoor (2022): Analyse und Vergleich von Ökobilanzierungsmethoden in der Luftfahrtindustrie – Eine systematische Literaturanalyse. Universität Bremen. Fachbereich 4 - Produktionstechnik. Masterarbeit.

(Rammert 2022)

Konstantin Rammert (2022): Konzeptionelle Entwicklung eines Prozessmodells zur Ökobilanzierung von Verkehrsflugzeugen. Universität Bremen. Fachbereich 4 - Produktionstechnik. Masterarbeit.

(Arenz 2022)

Michael Arenz (2022): Entwicklung einer vereinfachten Methode zur Ökobilanzierung von Flugzeugkabinen. Universität Bremen. Fachbereich 4 - Produktionstechnik. Masterarbeit.

(Wagner 2022)

Jonas Wagner (2022): Analyse und Bewertung der Potentiale von Ökobilanzierungen bei Flugzeugherstellern. Universität Bremen. Fachbereich 4 - Produktionstechnik. Bachelorarbeit.

(Dahmann 2022)

Anouk Dahmann (2022): Reifegradbasierter Vergleich von Industriebranchen hinsichtlich der Anwendung von Ökobilanzierungen. Universität Bremen. Fachbereich 4 - Produktionstechnik. Bachelorarbeit.

(Demir 2023)

Mehmet Demir (2023): Erforschung und Entwicklung eines softwaregestützten Konfigurationsprozesses mit integrierter Ökobilanzierung im Kontext der Flugzeugkabine. Universität Bremen. Fachbereich 4 - Produktionstechnik. Masterarbeit.

(Barb 2023)

Jonas-Wulf Barb: Entwicklung und Anwendung eines Vorgehensmodells für die Evaluation von neuartigen Ökobilanzierungsmethoden in der Luftfahrtindustrie. Universität Bremen. Fachbereich 4 - Produktionstechnik. Masterarbeit.

(Fahrenbach 2023)

Malte Fahrenbach: Entwicklung eines Prozessmodells für den Individualisierungs- und Konfigurationsprozess der Flugzeugkabine. Universität Bremen. Fachbereich 4 - Produktionstechnik. Bachelorarbeit.

(Schmidt 2023)

Nadja-Isabell Schmidt (2023): Entwicklung eines strategischen Vorgehensmodells zur Einführung von Ökobilanzen bei Flugzeugherstellern. Universität Bremen. Fachbereich 4 - Produktionstechnik. Masterarbeit.

A.2 Liste eigener relevanter Veröffentlichungen und Patente

A.2.1 Veröffentlichungen

(Mortensen Ernits et al. 2022a)

Mortensen Ernits, R.; Pupkes, B.; Keiser, D.; Reiß, M.; Freitag, M. (2022): Inflight catering services – A comparison of central and decentral galleys inside the aircraft cabin , a concept-based approach. In: *Transportation Research Procedia*, 65, S. 34–43.

(Keiser et al. 2023a)

Keiser, D.; Arenz, M.; Freitag, M.; Reiß, M. (2023): Method to Model the Environmental Impacts of Aircraft Cabin Configurations during the Operational Phase. In: *Sustainability*, 15 (5477).

(Keiser et al. 2023b)

Keiser, D.; Pupkes, B.; Freitag, M. (2023): Passenger Expectations towards a Sustainable Aviation Industry. In: *Transportation Research Procedia*, 75, S. 189–197.

(Keiser et al. 2023c)

Keiser, D.; Pupkes, B.; Otto, T.; Reiß, M.; Poggensee, M.; Rehsöft, S.; Terno, A.; Mortensen Ernits, R.; Freitag, M. (2023): In: Kohl, H., Seliger, G., Dietrich, F., Mur, S. (eds) *Sustainable Manufacturing as a Driver for Growth. GCSM 2023. Lecture Notes in Mechanical Engineering*. Springer, Cham, S. 326-334.

(Keiser et al. 2023d)

Keiser, D.; Pupkes, B.; Wagner, J.; Freitag, M.; Mortensen Ernits, R.; Reiß, M.; Becker, A. (2023): Ökobilanzierungen bei Flugzeugherstellern - Ein analytisches Entscheidungsmodell zur Potenzialbewertung. In: *Industrie 4.0 Management*, 39 (3), S. 62–66.

(Keiser et al. 2023e)

Keiser, D.; Schnoor, L.H.; Pupkes, B.; Freitag, M. (2023): Life cycle assessment in aviation: A systematic literature review of applications, methodological approaches and challenges. In: *Journal of Air Transport Management*, 110, S. 102418. DOI: 10.1016/j.jairtraman.2023.102418.

(Keiser et al. 2024)

Keiser, D.; Demir, M.; Freitag, M. (2024): Implementation of Life Cycle Assessment into the Customization Process of Aircraft Cabins. In: *Transportation Research Procedia*, 81, S. 25-34.

A.2.2 Öffentlich einsehbare Patentanmeldungen

(Keiser et al. 2022)

Keiser, D.; Bauer, M.; Becker, A.; Gonzales Eizaguierre, M.; Mortensen Ernits, R.; Freitag, M.; Otto, T.; Reiss, M.; Terno, A. (2022): Method and System for Life Cycle Assessment of a Vehicle such as an Aircraft. Deutsches Patent- und Markenamt. Anmeldenummer: 21187938.2. Europäisches Patentamt.

(Delaplanche et al., 2022)

Delaplanche, O.; Keiser, D.; Kiehne, O.; Mortensen Ernits, R.; Reiss, M.; Tiemann, M.: System zum Bereitstellen von temperiertem Wasser in einem Luftfahrzeug (2022). Anmeldenummer: 102020124879. Deutsches Patent- und Markenamt.

(Bauer et al., 2022)

Bauer, M.; Delaplanche, O.; Freitag, M.; Keiser, D.; Kiehne, O.; Mortensen Ernits, R.; Reiss, M.; Tiemann, M. (2022): Ofengestell zum Halten von Speisebehältern. Anmeldenummer: 21176495. Deutsches Patent- und Markenamt.

(Keiser et al. 2023)

Keiser, D.; Reiss, M.; Terno, A.; Otto, T.; Poggensee, M.; Rehsöft, S.; Becker, A.; Gonzales Eizaguierre, M.; Mortensen Ernits, R.; Freitag, M.; Pupkes, M. (2023): Aircraft Cabin Dismantling and Recycling. Anmeldenummer: 22177908.5. Europäisches Patentamt.

Weitere Patentanmeldungen sind zum Zeitpunkt der Erstellung dieser Arbeit noch nicht öffentlich zugänglich und können daher nicht genannt werden oder befinden sich in der Nachanmeldung. Zudem kann die Reihenfolge der Erfinder abweichen. Abweichungen wurden zur besseren Ziertierbarkeit teilweise vorgenommen.

A.3 Ergebnisse der durchgeführten Passagierbefragung

Die Ergebnisse der durchgeführten Umfrage wurden bereits in Form eines Konferenzbeitrags veröffentlicht (Keiser et al. 2023b). Die folgende Dokumentation stammt aus dem genannten Beitrag des Autors.

Tabelle A-1: Überblick der berücksichtigten Fragen innerhalb der Auswertung

ID	Frage/Aussage	Antworttyp
1.1	Ich wähle immer das Verkehrsmittel, das am billigsten ist.	Likert-Skala
1.2	Ich wähle immer das Verkehrsmittel, das am schnellsten ist.	Likert-Skala
1.3	Bei der Auswahl eines geeigneten Verkehrsmittels berücksichtige ich Aspekte der allgemeinen Nachhaltigkeit.	Likert-Skala
1.4	Mir ist es wichtig, die Umweltauswirkungen meiner Mobilitätsentscheidungen zu kennen.	Likert-Skala
1.5	Ich informiere mich aktiv über die Nachhaltigkeitsaspekte, bevor ich ein Verkehrsmittel wähle.	Likert-Skala
1.6	Ich denke, dass der Nachhaltigkeitsaspekt bei der Auswahl eines geeigneten Verkehrsmittels in Zukunft eine größere Rolle für mich spielen wird.	Likert-Skala
2.1	Entwicklungsentscheidungen für z.B. neue Technologien richten sich an Nachhaltigkeitsaspekten aus.	Likert-Skala
2.2	Die Fluggesellschaft kommuniziert transparent Unternehmensrichtlinien zur Nachhaltigkeit.	Likert-Skala
2.3	Die Fluggesellschaft hat eine hohe Recyclingrate bei Flugzeugteilen und -technologien.	Likert-Skala
2.4	Das Kabinenlayout der Flugzeuge beruht auf Aspekten der Nachhaltigkeit.	Likert-Skala
2.5	Bei der Modernisierung von Flugzeugen steht für die Fluggesellschaft das Thema Nachhaltigkeit im Mittelpunkt.	Likert-Skala
2.6	Die Fluggesellschaft nimmt Komforteinbußen für den Fluggast in Kauf, um im Gegenzug eine höhere Nachhaltigkeit gewährleisten zu können.	Likert-Skala
2.7	Wie wichtig wird Ihrer Meinung nach das Thema Nachhaltigkeit für die Luftfahrtindustrie in Zukunft sein?	Likert-Skala
		(1) Ja, ich wäre bereit mehr zu zahlen
		(2) Unentschlossen
3.1	Stellen Sie sich vor, Sie hätten die Wahl zwischen einem nachhaltigen(i) und einem konventionellen Flug. Wären Sie bereit, mehr für einen nachhaltigen Flug zu bezahlen als für einen konventionellen Flug?	(3) Nein, ich wäre nicht bereit mehr zu zahlen
		(4) Keine Angabe
3.2	Wie viel Prozent mehr wären Sie bereit für einen nachhaltigen Flug zu zahlen? (Wenn (1) oder (2) ausgewählt)	(1) Bis zu 5 % mehr
		(2) Bis zu 10 % mehr
		(3) Bis zu 20 % mehr
		(4) Mehr als 20 % mehr
		(5) Keine Angabe

Die Studie wurde als quantitative Online-Umfrage konzipiert und durchgeführt. Im Zeitraum vom 17. Januar bis zum 31. Januar 2022 wurden bis zu 1081 Teilnehmer befragt. Da das Studiendesign die Abhängigkeit in einer Frage (ID 3.2) beinhaltet, variiert die Gesamtzahl der Antworten. Auch haben nicht alle Teilnehmer jede Frage beantwortet. Die Verteilung der Teilnehmer hinsichtlich

des Geschlechts ist mit 48 % männlichen und 52 % weiblichen Teilnehmern fast gleich. Folgende Darstellung zeigt zudem die Verteilung bezogen auf das Alter der Grundgesamtheit.

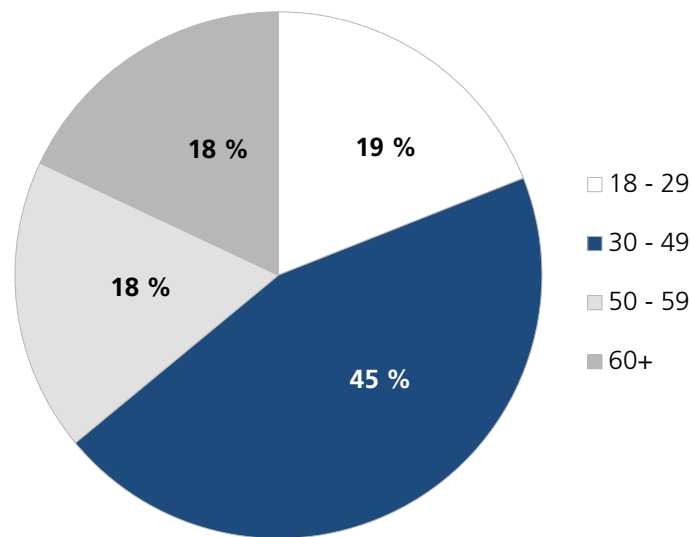


Abbildung A-1: Verteilung des Alters der Teilnehmer. Basierend auf der Gesamtzahl n.

In den folgenden Ergebnisdarstellungen wurden Rundungen vorgenommen, sodass die Antworten in % von 99 – 101 % reichen.

ID	Antworten in [%]					Ø	n
1.1	14	22	35	21	9	2.9	1077
1.2	7	11	30	31	21	3.5	1081
1.3	12	17	38	23	9	3.0	1071
1.4	10	13	34	29	13	3.2	1073
1.5	24	25	29	16	6	2.6	1076

■ (1) Stimme überhaupt nicht zu ■ (2) ■ (3) □ (4) ■ (5) Stimme voll zu

Abbildung A-2: Überblick über die Umfrageergebnisse ID 1.1 bis ID 1.5

ID	Antworten in [%]					Ø	n
1.6	10	12	29	31	18	3.4	1074
2.7	33	18	33	42		4.1	1067

■ (1) Stimme überhaupt nicht zu ■ (2) ■ (3) □ (4) ■ (5) Stimme voll zu

Abbildung A-3: Überblick über die Umfrageergebnisse ID 1.6 und ID 2.

ID	Antworten in [%]					Ø	n
2.1	5	5	27	35	28	3.8	1044
2.2	5	7	27	36	25	3.7	1038
2.3	4	7	30	33	24	3.7	1039
2.4	6	10	33	34	16	3.5	1033
2.5	4	8	24	37	28	3.8	1046
2.6	10	12	35	28	14	3.2	1033

□ (1) Stimme überhaupt nicht zu ■ (2) ■ (3) □ (4) ■ (5) Stimme voll zu

Abbildung A-4: Überblick über die Umfrageergebnisse ID 2.1 bis ID 2.6

A.4 Übersicht und Erklärung der Midpoint Indikatoren in ReCiPe-Methode

Tabelle A-2: Übersicht und Erläuterungen zu den Midpoint Indikatoren der ReCiPe-Methode (Huijbregts et al. 2017a)

Midpoint Indikator	Einheit	Indikator zur Messung
Klimawandel	[kg CO ₂ eq]	Erhöhung Infraroter-Strahlungsantrieb
Ozonabbau	[kg CFC11eq]	Abnahme des stratosphärischen Ozons
Ionisierende Strahlung	[kBq Co-60 to air eq]	Erhöhte absorbierte Dosis
Feinstaubbildung	[kg PM _{2.5} -eq]	Erhöhung Aufnahme Bevölkerung 2,5 Mikrometer (PM)
Photochemische Ozonbildung (Ökosystem)	[kg NO _x -eq]	Anstieg des Ozons in der Troposphäre
Photochemische Ozonbildung (menschliche Gesundheit)	[kg NO _x -eq]	Troposphärisches Ozon - Zunahme der Bevölkerungsaufnahme
Übersäuerung Land	[1,4-DCB eq.]	Protonenanstieg in natürlichen Böden
Süßwasser -Eutrophierung	[1,4-DCB eq.]	Anstieg von Phosphor in Süßwasser
Mehrwasser-Eutrophierung	[1,4-DCB eq.]	Gelöster anorganischer Stickstoff Zunahme in Meerwasser
Menschliche Toxizität (krebserregend)	[1,4-DCB eq.]	Risikoerhöhung der Krebserkrankungen
Menschliche Toxizität (nicht krebserregend)	[1,4-DCB eq.]	Risikoanstieg bei Nicht-Krebs Krebserkrankungen
Toxizität Land	[m ³ H ₂ O consumed]	Gefährdungsgewichteter Anstieg der natürlichen Böden
Toxizität Süßwasser	[kg SO ₂ -eq]	Gefährdungsgewichteter Anstieg Süßwasser
Toxizität Meer	[m ² -annual crop eq]	Gefährdungsgewichteter Anstieg Meerwasser
Landnutzung und Transformation	[kg P-eq. to freshwater]	Zeitintegrierte Landtransformation
Wasserverbrauch	[kg N-eq to marine water]	Erhöhung des Wasserverbrauchs
Mineralienverbrauch	[kg Cu-eq]	Zunahme des abgebauten Erzes
Verbrauch fossiler Rohstoffe	[kg oil-eq]	Heizwert

A.5 Dokumentation zur systematischen Literaturanalyse

Die systematische Literaturanalyse wurde bereits in Form eines Peer-Review Journal Beitrags veröffentlicht (Keiser et al. 2023e). Die folgende Dokumentation stammt aus dem genannten Beitrag des Autors.

A.5.1 Methodische Vorgehensweise

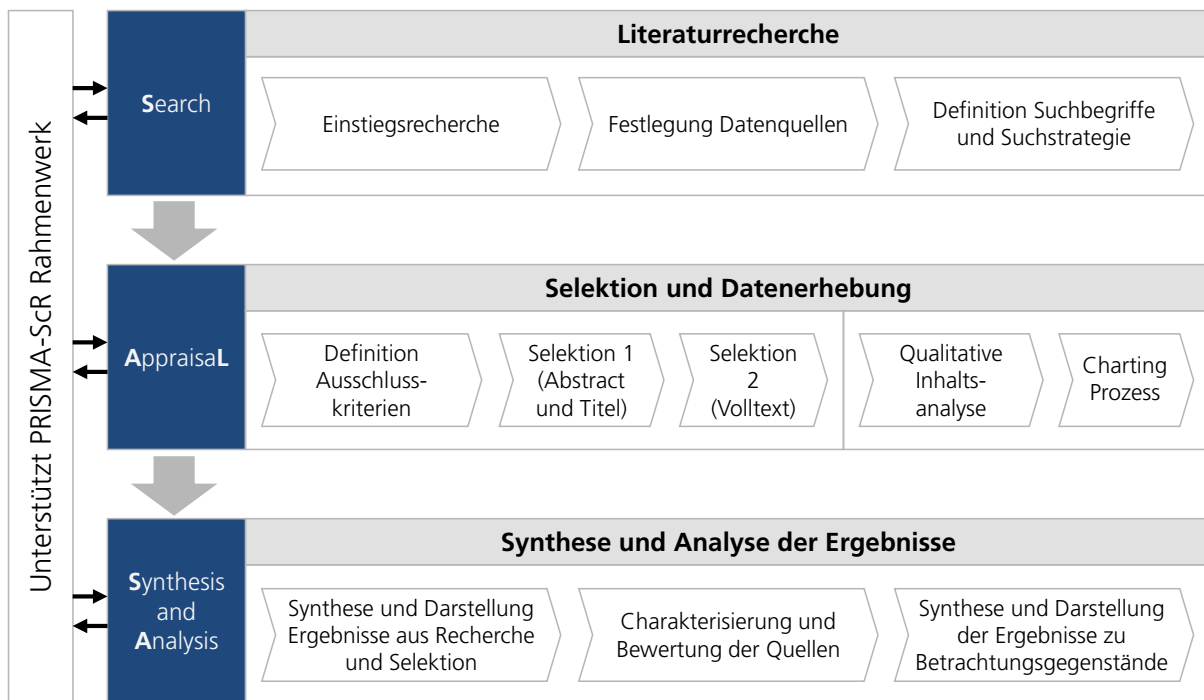


Abbildung A- 5: Methodisches Vorgehen bei der systematischen Literaturanalyse. Angelehnt an das SALSA-Modell und den PRISMA-ScR-Rahmen (Booth et al. 2012; Page et al. 2021)

Tabelle A-3: Verwendete Suchstrings je Datenbank

Datenbank	Suchstring
Scopus	TITLE-ABS-KEY [LCA OR ("Life Cycle" AND Assessment)] AND [(Aviation OR Airplane OR Aircraft)
Web of Science	(LCA OR ("Life Cycle" AND Assessment)) AND ((Aviation OR Airplane OR Aircraft) (All Fields)
IEEE	(LCA OR ("Life Cycle" AND Assessment)) AND ((Aviation OR Airplane OR Aircraft) OR (All Fields)

A.5.2 Ergebnisse

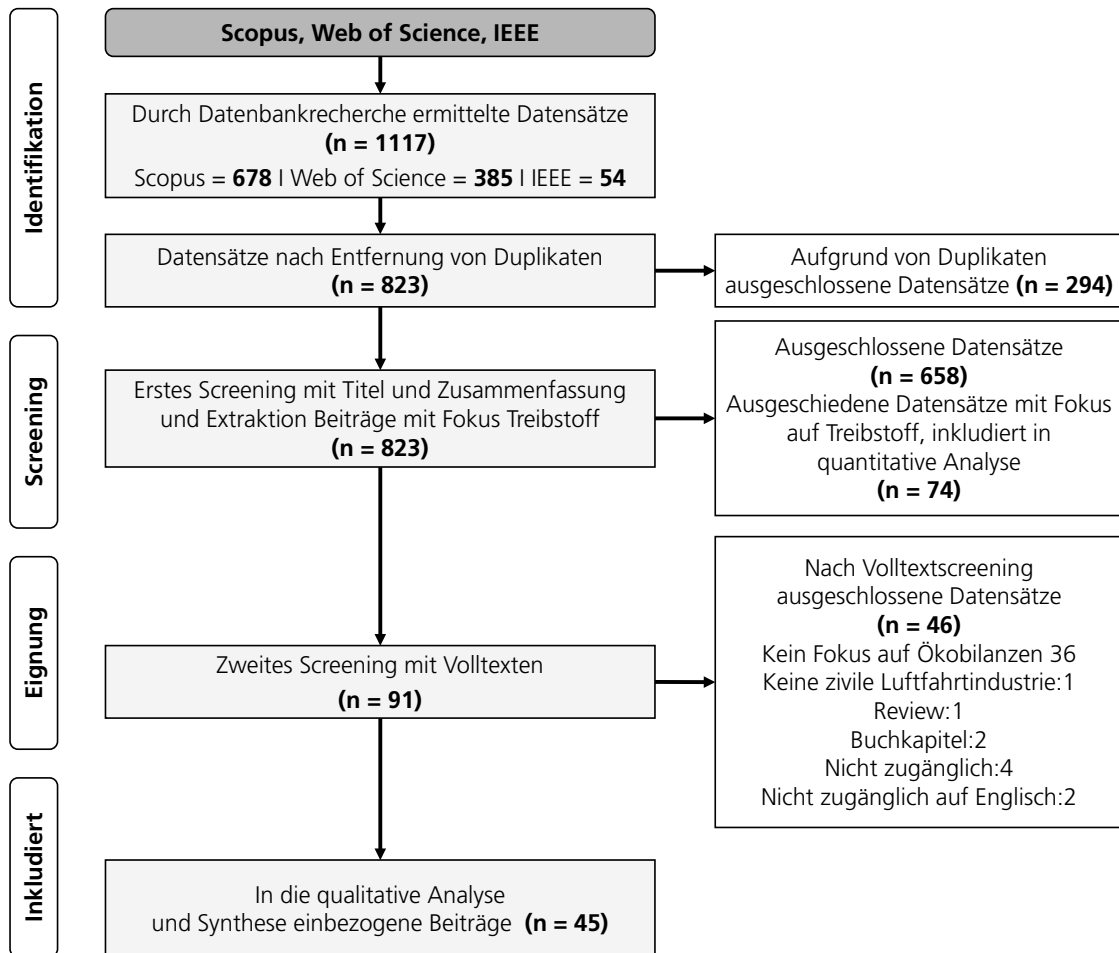


Abbildung A- 6: PRISMA-ScR Flussdiagramm zur durchgeführten Literaturanalyse

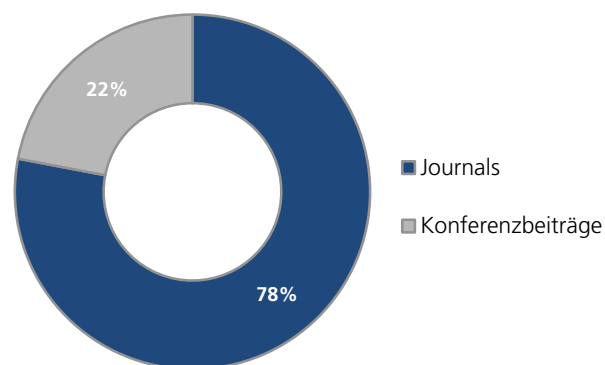


Abbildung A-7: Verteilung der Beiträge hinsichtlich Journal- und Konferenzbeiträgen

Tabelle A- 4: Inkludierte Beiträge für die systematische Literaturanalyse

Nr.	Autor	Titel	Jahr
1	(Bongo und Culaba 2020)	A life cycle analysis of commercial aircraft fleets	2020
2	(Butt et al. 2021)	Decision Support in Selecting Airfield Pavement Design Alternatives Using Life Cycle Assessment: Case Study of Nashville Airport	2021
3	(Gomez-Campos et al. 2021)	Natural Fibre Polymer Composites - A game changer for the aviation sector?	2021
4	(Karuppanan Gopalraj et al. 2021)	Life Cycle Assessment of a Thermal Recycling Process as an Alternative to Existing CFRP and GFRP Composite Waste Management Options	2011
5	(Ribeiro et al. 2020)	Environmental assessment of hybrid-electric propulsion in conceptual aircraft design	2020
6	(Spreafico und Russo 2020)	Exploiting the Scientific Literature for Performing Life Cycle Assessment about Transportation	2020
7	(Blanca-Alcubilla et al. 2020)	Is the reusable tableware the best option? Analysis of the aviation catering sector with a life cycle approach	2020
8	(Katsiroopoulos und Pantelakis 2020)	A Novel Holistic Index for the Optimization of Composite Components and Manufacturing Processes with Regard to Quality, Life Cycle Costs and Environmental Performance	2020
9	(Torres-Carrillo et al. 2020)	Environmental analysis of selective laser melting in the manufacturing of aeronautical turbine blades	2020
10	(Calado et al. 2019)	Integrating life cycle assessment (LCA) and life cycle costing (LCC) in the early phases of aircraft structural design: an elevator case study	2019
11	(Şöhret et al. 2019)	LCA of the maintenance of a piston-prop engine	2019
12	(Severis et al. 2019)	Sustainable consumption in mobility from a life cycle assessment perspective	2019
13	(Said und Al-Qadi 2019)	Iterative Framework for Performance and Environmental Impacts of Airfields	2019
14	(Cox et al. 2018)	Life cycle assessment of air transportation and the Swiss commercial air transport fleet	2018
15	(Vidal et al. 2018)	Life Cycle Assessment of Novel Aircraft Interior Panels Made from Renewable or Recyclable Polymers with Natural Fiber Reinforcements and Non-Halogenated Flame Retardants	2018
16	(Al-Lami et al. 2018)	Eco-efficiency assessment of manufacturing carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in aerospace industry	2018
17	(Robertson 2018)	A carbon footprint analysis of renewable energy technology adoption in the modal substitution of high-speed rail for shorthaul air travel in Australia	2018
18	(Wang et al. 2018)	Performance investigation and sustainability evaluation of multiple polymer asphalt mixtures in airfield pavement	2018
19	(Mami et al. 2017)	Evaluating Eco-Efficiency of 3D Printing in the Aeronautic Industry	2017
20	(Meng et al. 2017)	Energy and environmental assessment and reuse of fluidized bed recycled carbon fibres	2017
21	(Khalil 2017)	Eco-efficient lightweight carbon-fiber reinforced polymer for environmentally greener commercial aviation industry	2017
22	(Das 2011)	Life Cycle Assessment of Carbon Fiber-Reinforced Plastic	2011
23	(Vieira und Bravo 2016)	Life cycle carbon emissions assessment using an eco-demonstrator aircraft: the case of an ecological wing design	2016
24	(Shen et al. 2016)	Life cycle assessment of heated apron pavement system operations	2016
25	(Robertson 2016)	The potential mitigation of CO2 emissions via modal substitution of high-speed rail for shorthaul air travel from a life cycle perspective - An Australian case study	2016
26	(Dallara et al. 2013)	Parametric Life Cycle Assessment for the Design of Aircraft	2013
27	(Howe et al. 2013)	Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners	2013
28	(Witik et al. 2012)	Economic and environmental assessment of alternative production methods for composite aircraft components	2012
29	(Scelsi et al. 2011)	Potential emissions savings of lightweight composite aircraft components evaluated through life cycle assessment	2011
30	(Beck et al. 2011)	Influence of implementation of composite materials in civil aircraft industry on reduction of environmental pollution and greenhouse effect	2011

31	(Fabre et al. 2022)	Life cycle assessment models for overall aircraft design	2022
32	(Gkoloni und Kostopoulos 2021)	Life cycle assessment of bio-composite laminates. A comparative study	2021
33	(Scholz et al. 2022)	Environmental life cycle assessment and operating cost analysis of a conceptual battery hybrid-electric transport aircraft	2021
34	(Parolin et al. 2021)	A tool for aircraft eco-design based on streamlined Life Cycle Assessment and Uncertainty Analysis	2021
35	(Bergs et al. 2021)	Life cycle assessment for milling of Ti-and Ni-based alloy aero engine components	2021
36	(Barke et al. 2021)	Life cycle sustainability assessment of potential battery systems for electric aircraft	2021
37	(Léonard und Nylander 2020)	Sustainability Assessment of Composites in Aeroengine Components	2020
38	(André und Hajek 2019)	Robust environmental life cycle assessment of electric vtol concepts for urban air mobility	2019
39	(Dong et al. 2018)	Life cycle assessment of ramie fiber used for FRPs	2018
40	(Vinodh et al. 2017)	Life cycle assessment of an aircraft component: a case study	2017
41	(Liu et al. 2016)	A comparative life-cycle energy and emissions analysis for intercity passenger transportation in the U.S. by aviation, intercity bus, and automobile	2016
42	(Altuntas et al. 2014)	Comparison of auxiliary power unit (APU) and ground power unit (GPU) with life cycle analysis in ground operations: A case study for domestic flight in turkey	2014
43	(Timmis et al. 2014)	Lifecycle assessment of CFRP aircraft fuselage	2014
44	(Chester und Horvath 2012)	High-speed rail with emerging automobiles and aircraft can reduce environmental impacts in Californias future	2012
45	(Facanha und Horvath 2006)	Environmental assessment of freight transportation in the U.S.	2006

Tabelle A-5: Analyse der funktionellen Einheiten für Flugzeuge

Funktionelle Einheit	Einheit	Anzahl	Referenz
Passagier-Kilometer	pkm	10	(André und Hajek 2019; Bongo und Culaba 2020; Chester und Horvath 2012; Cox et al. 2018; Fabre et al. 2022; Liu et al. 2016; Robertson 2016, 2018; Scholz et al. 2022; Spreafico und Russo 2020)
Tonnen-Kilometer	tkm	2	(Facanha und Horvath 2006; Parolin et al. 2021)
Sitz-Kilometer	skm	1	(Cox et al. 2018)
Passagier	pax	1	(Robertson 2016)
Wartungs- / Instandhaltungsprozess		1	(Şöhret et al. 2019)
Transport eines Konsumenten zu 4 versch. Zielen		1	(Severis et al. 2019)
Essensbewirtung	Gast/pax	1	(Blanca-Alcubilla et al. 2020)
Paneele Faserverbundwerkstoff	m ²	3	(Gomez-Campos et al. 2021; Vidal et al. 2018)
Paneele Faserverbundwerkstoff	m ³	3	(Gkoloni und Kostopoulos 2021; Khalil 2017; Witik et al. 2012)
Paneele Faserverbundwerkstoff	Stück	2	(Das 2011; Scelsi et al. 2011)
Paneele Faserverbundwerkstoff	kg	1	(Léonard und Nylander 2020)
Rumpfkomponeente	kg	1	(Katsiropoulos und Pantelakis 2020)

Rumpfkomponte	Stück	1	(Timmis et al. 2014)
Ramiefasern	kg	1	(Dong et al. 2018)
Batteriesystem	Stück	2	(Barke et al. 2021; Ribeiro et al. 2020)
Turbinenblatt	Stück	2	(Torres-Carrillo et al. 2020; Vinodh et al. 2017)
Gesamtes Flugzeug	Stück	2	(Dallara et al. 2013; Howe et al. 2013)
blisk - blade integrated disk	Stück	1	(Bergs et al. 2021)
Höhenruder	Stück	1	(Calado et al. 2019)
Flügelrippe	Stück	1	(Al-Lami et al. 2018)
Türstopper	Stück	1	(Mami et al. 2017)
Flügelkonstruktion	Stück	1	(Vieira und Bravo 2016)

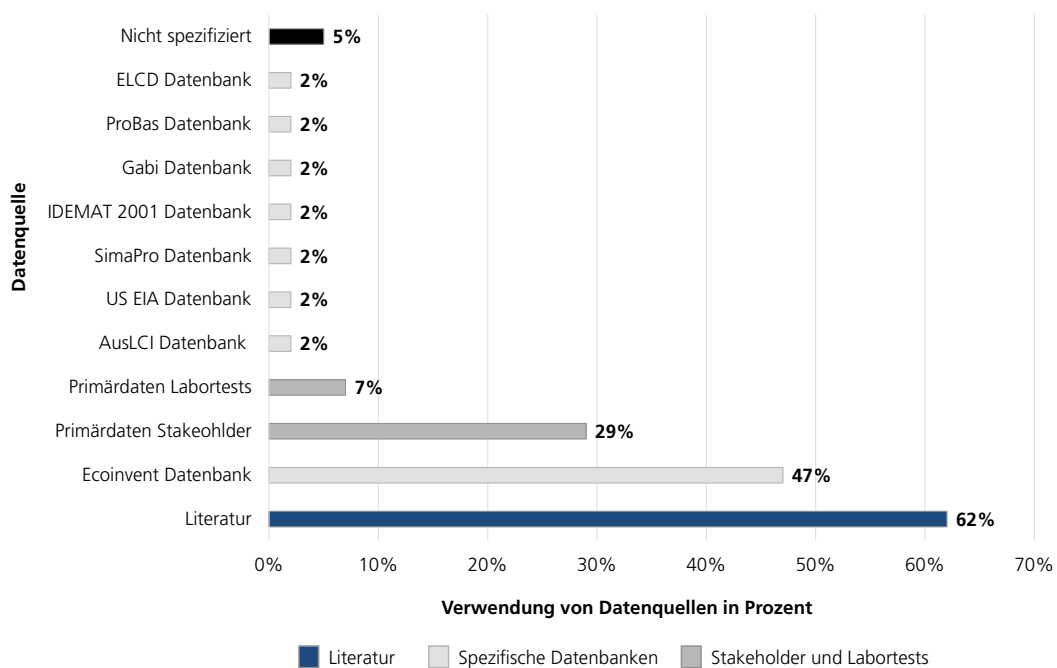


Abbildung A-8: Überblick über die für die Studien verwendeten Datenquellen.

Ergebnisse basierend auf den Angaben in den analysierten Papieren. Mehrfachnennungen aufgrund unterschiedlicher Datenquellen.

Tabelle A- 6: Entwickeltes Kategoriensystem zur Bewertung der Dokumentationsqualität

Nr.	Kategorie	Adressierte Frage
1	Ökobilanz Norm	Wurde eine Norm, Methode oder ein Rahmenwerk zum methodischen Aufbau der Ökobilanz zugrunde gelegt?
2	Konsequenzorientiert oder beschreibend	Wurde zur Durchführung der Ökobilanz ein „Attributional“ oder „Consequential“ Ansatz gewählt?
3	Adressat der Studie	An welche Lesergruppen sind die Ergebnisse der Ökobilanz gerichtet?
4	Funktionelle Einheit	Welche Funktionelle Einheit wurde verwendet?
5	Lebenszyklusphasen	Welche Phasen des Produktlebenszyklusmodells werden innerhalb der Ökobilanz betrachtet und wurden diese dokumentiert?
6	Abschneidekriterien	Wurden Abschneidekriterien für ausgelassene Input-, Outputdaten oder ganze Lebenszyklusphasen definiert?
7	Datenquellen	Welche Datenquellen wurden zur Bestimmung von Input- und Outputströmen herangezogen?
8	Anforderungen Qualität Daten	Werden Anforderungen an die Datenqualität, um das Ziel der Ausarbeitung zu erfüllen, gestellt (z.B. zeitliche oder räumliche Einschränkung des Datenursprungs)?
9	Bilanzierungssoftware	Wurden Bilanzierungssoftwares und/oder Berechnungstools zur Bearbeitung der Sachbilanz verwendet?
10	Allokationsverfahren	Wurden Allokationsmethoden verwendet? Welche Allokationsmethoden wurden angewandt?
11	Wirkungsindikatoren	Anhand welcher Midpoint und Endpoint Wirkungsindikatoren wurden die Umweltwirkungen in den Ökobilanzen bewertet?
12	Wirkungsabschätzungsmethoden bzw. Charakterisierungsmodelle	Welche Wirkungsabschätzungsmethoden wurden für die Wirkungsabschätzung in den Ökobilanzen angewendet?

Das obenstehende Kategoriensystem wurde zur Bewertung der Beiträge im Zuge der systematischen Literaturanalyse verwendet. Die folgende Dokumentation der Ergebnisse bildet die Grundlage für Abbildung 20 dieser Arbeit. Für die Bewertung wurde eine binäre Bewertung durchgeführt:

- Kategorie in Beitrag genannt = 1
- Kategorie in Beitrag nicht genannt = 0

Mit diesem Bewertungsschema wurden alle Beiträge über alle Kategorien hinweg analysiert und bewertet. Die Dokumentation sowie die Berechnung der Mittelwerte (M) sind in folgender Tabelle dargestellt.

Tabelle A-7: Auswertung der Beiträge auf Basis des Kategoriensystems

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
Ökobilanz Norm	0	1	1	1	0	1	0	1	1	1	1	0	1	1	1	0	0	0	1	0	1
Konsequenzorientiert oder beschreibend	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0
Adressat der Studie	0	0	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Funktionelle Einheit	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Lebenszyklusphasen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Abschneidekriterien	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Datenquellen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Anforderungen Qualität Daten	0	1	0	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
Bilanzierungssoftware	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1
Allokationsverfahren	0	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Wirkungsindikatoren	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Wirkungsabschätzungs- methoden/Charakterisierungsmodell	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
Mittelwert	0,58	0,75	0,83	0,75	0,67	0,83	0,5	0,58	0,67	0,75	0,58	0,67	0,75	0,58	0,67	0,58	0,58	0,42	0,75	0,5	0,67

	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39	40	41	42
Ökobilanz Norm	0	1	0	0	1	1	1	0	0	1	1	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0
Konsequenzorientiert oder beschreibend	0	0	0	1	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Adressat der Studie	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Funktionelle Einheit	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Lebenszyklusphasen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Abschneidekriterien	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Datenquellen	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	1
Anforderungen Quali- tät Daten	0	0	0	1	0	0	1	1	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Bilanzierungssoftware	1	0	1	1	1	0	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	0	1	0	1	1
Allokationsverfahren	1	0	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0
Wirkungsindikatoren	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
Wirkungsabschät- zungsmethoden/Cha- rakterisierungsmodell	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0
Mittelwert	0,58	0,5	0,5	0,67	0,5	0,58	0,83	0,67	0,42	0,67	0,67	0,5	0,5	0,5	0,58	0,58	0,5	0,67	0,42	0,67	0,33

	43	44	45	M
Ökobilanz Norm	0	0	0	0,49
Konsequenzorientiert oder beschreibend	0	1	0	0,22
Adressat der Studie	0	1	0	0,16
Funktionelle Einheit	1	1	1	0,98
Lebenszyklusphasen	1	1	1	1
Abschneidekriterien	0	0	0	0,33
Datenquellen	1	1	1	0,96
Anforderungen Qualität Daten	1	1	0	0,29
Bilanzierungssoftware	1	1	1	0,76
Allokationsverfahren	0	0	1	0,24
Wirkungsindikatoren	1	1	1	1
Wirkungsabschätzungs- methoden/Charakterisierungsmodell	1	1	1	0,91
Mittelwert	0,67	0,75	0,58	

A.6 Ergebnisse des analytischen Hierarchieprozesses

Tabelle A-8: Werteskala des AHP-Verfahrens nach Saaty (Saaty 1980; Westphal 2016)

Werte der Skala	Ein Element ist im Vergleich zu einem anderen Element...
1	Gleich wichtig
3 (1/3)	Etwas wichtiger (etwas unwichtiger)
5 (1/5)	wesentlich wichtiger (wesentlich unwichtiger)
7 (1/7)	viel wichtiger (viel unwichtiger)
9 (1/9)	Extrem wichtig (Sehr viel unwichtiger)
2,4,6,8	Zwischenwerte

Zur Berechnung des Konsistenzwertes (CI) wurden die Zufallsindizes (RI) aus folgender Tabelle verwendet.

Tabelle A-9: Zufallsindizes zur Berechnung der Konsistenzwerte (Saaty 1987)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0,00	0,00	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49

Tabelle A-10: Zusammenfassende Auswertung des paarweisen Vergleichs zur Bewertung Kriterien

	Kosten für Einführung	Benötigte Zeit für Einführung	Komplexität der Einführung	Emissionsminderung	Ressourcenschonung	Zeit bis Wirksamkeit	CI
Teilnehmer 1	11,8 %	30,8 %	36,8 %	5,5 %	4,1 %	11 %	0,096
Teilnehmer 2	21,2 %	10,6 %	4,5 %	27 %	32,6 %	4,2 %	0,064
Teilnehmer 3	36,5 %	3,5 %	7,8 %	27,7 %	19,1 %	5,4 %	0,098

Tabelle A-11: Zusammenfassende Darstellung der Bewertung der Potenziale hinsichtlich der Funktionsbereiche

	Produktion	Transport und Logistik	Marketing und Vertrieb	Forschung und Entwicklung	Beschaffung	Personalmanagement	Management und Verwaltung	CI
Teilnehmer 1	9,0 %	5,0 %	19,5 %	18,3 %	11,6 %	11,4 %	14,4 %	0,088
Teilnehmer 2	18,5 %	18,8 %	14,3 %	10 %	12,4 %	15,8 %	10,1 %	0,088
Teilnehmer 3	13,2 %	8,6 %	20,5 %	28,1 %	13,9 %	5 %	10,7 %	0,093

Tabelle A-12: Zusammenfassende Darstellung der Bewertung der Potentiale hinsichtlich der Anwendungsfälle innerhalb des Funktionsbereichs Marketing und Vertrieb

	Allgemeine Informationen Umweltauswirkungen	Abbau von Akzeptanzproblemen	Werbung mit gesicherter Datenbasis	Aufbau umweltorientiertes Image	Gewinnung neuer Kunden	Entscheidungshilfe zwischen Produkten	G
Teilnehmer 1	21,5 %	13,4 %	10,7 %	7,1 %	18,8 %	28,5 %	0,097
Teilnehmer 2	18,9 %	20,7 %	10,1 %	7,6 %	17,2 %	25,6 %	0,099
Teilnehmer 3	26,9 %	7,3 %	13,1 %	13,9 %	10,0 %	28,8 %	0,096

A.7 Dokumentation der Befragung zur Anforderungsermittlung

Was sind Ihre zentralen Erwartungen an die Funktionalitäten und Fähigkeiten einer Ökobilanz Anwendung, die für externe Zwecke Anwendung findet (Im Kontext der Flugzeugkabine)?
n: 18 – Freie Antwortmöglichkeit

Tabelle A-13: Antworten auf offene Frage 1 zur Anforderungsermittlung

Teilnehmer	Antwort
1	Benutzerfreundliche Bedienung und leicht verständliche Visualisierung der Ergebnisse
2	Erfassung von Schlüsselmerkmalen aus Kabine- und Fracht zur schnellen und einfachen Analyse der LCA-Parameter
3	Sie sollte den ökologischen Fußabdruck einer bestimmten Kabinen- und Frachtkonfiguration qualitativ und quantitativ darstellen. Eine solche Software sollte dem Benutzer auch (durch KI-Funktionen?) mögliche Änderungen empfehlen, wie der ökologische Fußabdruck verbessert werden kann (ändern Sie dieses Teil durch dieses und der ökologische Fußabdruck wird um X% besser) Sie sollte eine qualitativ hochwertige Visualisierung der Bewertungsergebnisse bieten Die Software sollte auf allen aktuellen und zukünftige Flugzeugprogramme einsetzbar sein Die Software sollte für die Kabinendefinition, aber auch für spätere Nachrüstungen und Upgrades geeignet sein. Die Software sollte einfach zu bedienen sein
4	Schritt 1: Sensibilisierung von Fluggesellschaften, Zulieferern und Dritten / Schritt 2: Teil der Kabinendefinition/Konfiguration für Fluggesellschaften und Teil der Projektbewertung für Zulieferer
5	Wissen/Informationen/Details über möglichst viele Teile der Lieferkette, Einbeziehung möglichst vieler Materialien, Einbeziehung von EoL
6	Bewertung der Auswirkungen auf die Umwelt, sollten wir neue oder wiederverwendete Teile verwenden.
7	Erhöhung der Transparenz des ökologischen Fußabdrucks auf einfache Weise, um die Auswahl und Entwicklung von umweltfreundlicheren Kabinenprodukten und -dienstleistungen zu fördern.
8	Umfangreiche Datenbank mit LCA-relevanten Gerätedaten, z.B. Stromverbrauch, Gewicht, etc.
9	Leitfaden und Wert-Definition für weitere A/C-Entwicklungen
10	Muss flexibel sein, um vorhandene Ausrüstungen/Teile von Lieferanten auszuwählen
11	Vergleich verschiedener Kompromisse (z. B. Werkstoffe, Fertigungstechnologien) in der Konzeptionsphase im Hinblick auf Kosten, Gewicht, Wiederverwertbarkeit und Nachhaltigkeit, um die Entscheidungsfindung zu erleichtern.
12	Für andere Themen als Kabine und Fracht verwenden
13	Die Ökobilanz insbesondere von Kabinenkomponenten, auch von externen Herstellern, verfolgen zu können
14	Klarer Satz verwendeter Daten, verknüpft mit interner Ökobilanzen, Erklärung der Grenzen
15	Den CO ₂ -Fußabdruck auf der Grundlage verschiedener Layout-Konfigurationen aufzeigen
16	1. Bereitstellung eines vollständigen Umweltüberblicks über das ausgewählte Produkt (Energieverbrauch, Recyclingmöglichkeiten, Kreislaufindikator usw.) 2. Hilfe beim Sparen oder Erwerb von Geld durch CO ₂ -Zertifikate
17	Eindeutige Identifizierung des Hotspots, Einbeziehung der Lieferanten in die Verbesserung und den Datenaustausch
18	Verstehen der Auswirkungen eines Materials usw.

Welche Vorteile versprechen Sie sich von einer Ökobilanz Anwendung für die Flugzeugkabine?
n: 18 – Freie Antwortmöglichkeit

Tabelle A-14: Antworten auf offene Frage 2 zur Anforderungsermittlung

Teilnehmer	Antwort
1	Schnelle Analyse der Umweltauswirkungen verschiedener Technologien, Projekte usw.
2	Identifizierung des Bereichs, auf den man sich konzentrieren muss, um einen nachhaltigen C&C auf den Markt zu bringen
3	Dienstleistungsumsatz sowie Steigerung der Attraktivität der Flugzeuge.
4	Austausch mit Kunden von Fluggesellschaften.
5	Offenlegung vieler (bisher) unbekannter Details.
6	Bessere Bewertung der Umweltauswirkungen im Falle der Wiederverwendung von Kabinenteilen (im Vergleich zu neuen Teilen) bei einer Nachrüstung, damit wir den Fluggesellschaften und Fluggästen die Vorteile besser vermitteln können.
7	Bessere Anleitung für ökoeffizientes Design und Identifizierung von Schlüsselementen.
8	Hauptsächlich für die Definition der Gesamtkabine. Heute sind die Umweltauswirkungen einer Konfiguration nicht leicht zu erkennen. Für die Entwicklung von Ausrüstungen sollte die LCA-Software so offen sein, dass sie von den Zulieferern zur Eingabe von Ausrüstungsdaten verwendet werden kann, wobei die Software den Algorithmus bereitstellt.
9	Trade-off / Bewertungen auf Basis der Wertreiber-Definition (gleich für die gesamte A/C Produktentwicklung)
10	Schnelle Ergebnisse, z. B. Vergleich eines Teils, das mit verschiedenen Materialien und Verfahren hergestellt werden kann.
11	Konsequenzen sichtbar machen. Erleichtern der Entscheidungsfindung.
12	In der Lage sein, Umweltaspekte bei der Auswahl von Geräten/Lieferanten zu berücksichtigen.
13	Bei der Kommunikation mit den Fluggesellschaften mehr Angaben zur Ökobilanz der Kabinenkomponenten machen zu können - etwas, worüber wir heute nur sehr wenige Informationen haben.
14	Link zu den Erwartungen unserer Kunden
15	Auswahl des richtigen Layouts
16	1. in der Lage zu sein, umweltfreundlicher zu entwerfen und die Ergebnisse/Auswirkungen zu überprüfen, bevor der Entwurf fertiggestellt wird 2. einen Vergleich/Benchmark zwischen den Entwürfen anzustellen 3. alternative Material-/Lösungsvorschläge zu erhalten (wie ein Katalog mit einer Rangfolge zur Auswahl)
17	Vereinfachen der Datenerfassung und der Einbindung von Lieferanten
18	Validierung der Auswirkungen, Unterstützung bei der Prioritätensetzung und Entscheidungsfindung

A.8 Dokumentation zur Analyse der Anforderungen von Artefakt drei (Softwaretechnische Umsetzung)

A.8.1 Dokumentation Fokusgruppe

Tabelle A-15: Ablauf sowie Ergebnisse der Fokusgruppe

1) An welcher Stelle des Konfigurationsprozesses sollte die Applikation Anwendung finden?
In der Definitionsphase des Fullfil Customer Order Process sollen Brandig-relevante SFEs und BFEs ausgewählt werden können. Bei der Anwendung handelt es sich um eine B2B Anwendung.
2) Wie soll der Konfigurationsprozess in der Anwendung umgesetzt werden?
<ul style="list-style-type: none"> • Login/Logout • Flugzeugtyp auswählen • Flugzeugtyp-Parameter & Missionsprofil • LCA-Methodik bestimmen • Sitze, Toiletten, Bordküchenmodule, Bordküchenausstattung konfigurieren • LCA durchführen • LCA-Ergebnisse visualisieren • Export der Ergebnisse ermöglichen • Vergleich von 2 Konfigurationen
3) Wo soll die Anwendung verwendet werden? Wird der Anwender vom Flugzeughersteller bzw. Lieferanten während der Nutzung begleitet?
<ul style="list-style-type: none"> • Die Anwendung soll beim Flugzeughersteller in Begleitung eines Verantwortlichen eingesetzt werden. • Allerdings befinden wir uns in einem globalen Markt, weshalb eine Flexibilität gegeben sein muss.
4) Welche Rolle spielt das LCA? Ist es nur ein Add-on des digitalisierten Konfigurationsprozesses oder steht es an wichtigster Stelle?
LCA ist das übergeordnete Ziel der Anwendung, die als digitale Unterstützung zu sehen ist.
5) Soll es eine Beschränkung auf BFE geben?
Nein, es sollen sowohl BFE- als auch SFE-Komponenten berücksichtigt werden.
6) Welche Rolle spielen Ausstattungspakete?
Zunächst keine, um die Komplexität zu reduzieren.
7) Welche Gegenstände sind Bestandteil der Konfiguration? Welche Parameter der Gegenstände sollen eingestellt werden können?
Hierfür wird eine detaillierte Definition der Kabine inklusive Liste der Komponenten bereitgestellt.
8) Soll ein Login vorhanden sein?
Ja, es sollte vorhanden sein. Jedoch ausschließlich zu demonstrativen Zwecken im Rahmen des Demonstrators.
9) Soll die Fluggesellschaft ausgewählt werden?
Für die Demonstration zunächst nicht relevant.
10) Spielen Kabinenvorschriften bzw. Standards einer Fluggesellschaft eine Rolle?
Für die Demonstration zunächst nicht relevant.
11) Soll ein Tutorial bzw. eine kurze Einführung vorhanden sein?
Zunächst nicht, hier wird die Evaluation jedoch auch helfen den Bedarf zu identifizieren.
12) Welche umweltrelevanten Eigenschaften sollen für die jeweilige Ausstattung angezeigt werden?
Das Konzept dazu ist bereits definiert und wird bereitgestellt.
13) Sollen Vergleiche von mehreren Konfigurationen möglich sein?
Ja, das ist eine Kernfunktion.
14) Sollen Konfigurationen von gesamten Flotten möglich sein?
Nicht Gegenstand des Ziels (weiterer Forschungsbedarf).
15) Soll der Export der Konfiguration möglich sein? (Beispiele: PDF, JPG, E-Mail, etc.)
PDF als Bericht per E-Mail/Download.

A.8.2 Detaillierte Anforderungsliste für Softwareentwicklung

Tabelle A-16: Identifizierte funktionelle Anforderungen

Nr.	Anforderung
1	Die Anwendung soll mit einer Startseite beginnen, die widerspiegelt, dass es sich um einen Konfigurator von Flugzeugkabinen mit integrierter LCA-Analyse handelt.
2	Die Anwendung soll Login und Logout darstellen. Hier reicht eine demonstrative Visualisierung, Funktionalität muss nicht gegeben sein.
3	Der Nutzer soll eine neue Konfiguration starten können.
4	Der Konfigurationsprozess soll dem Nutzer stets angezeigt werden. Der aktuelle Prozessschritt soll farblich hervorgehoben werden. Zwischen den einzelnen Prozessschritten soll sowohl über Knöpfe als auch über den Konfigurationsprozess gewechselt werden können.
5	Der Nutzer soll aus einer Reihe von Flugzeugtypen auswählen können. Dabei soll er zwischen Flugstrecke (Kurz-, Mittel- und Langstrecke) und Flugzeugfamilie filtern können. Außerdem sollen dem Nutzer grundlegende Daten des Flugzeugs angezeigt werden.
6	Der Nutzer soll Flugzeugtyp-Parameter und ein Missionsprofil für das ausgewählte Flugzeug bestimmen können.
7	Der Nutzer soll eine LCA-Methode und funktionelle Einheit auswählen können. Außerdem soll er angeben können, ob die höhenabhängige Wirkung beim LCA berücksichtigt werden soll.
8	Der Nutzer soll die Sitze, Toiletten, Bordküchenmodule und Bordküchenausstattung der Flugzeugkabine konfigurieren können. Hierbei soll er die Anzahlen, Zulieferer und Modelle einstellen können. Für jede Passagierklasse sollen verschiedene Einstellungen getätigt werden können.
9	Dem Nutzer soll bei Abschluss der Konfiguration eine Zusammenfassung seiner Konfiguration angezeigt werden.
10	Der Nutzer soll eine zweite Konfiguration durchführen können, die mit der ersten verglichen werden kann.
11	Wurden zwei Konfigurationen durchgeführt, soll dem Nutzer eine Zusammenfassung beider Konfigurationen angezeigt werden. Dabei sollen entsprechenden Komponenten der Konfiguration gegenübergestellt werden.
12	Der Nutzer soll ein LCA seiner Konfiguration/en durchführen lassen können.
13	Die LCA-Ergebnisse sollen in leicht verständlichen Diagrammen visualisiert werden.
14	Werden zwei Konfigurationen durchgeführt, soll der Vergleich beider LCA-Ergebnisse möglich sein.
15	Die Anwendung soll demonstrativ visualisieren, dass es eine Seite gibt, unter der man alle seine Konfigurationen aufrufen kann.
17	Der Nutzer soll die Zusammenfassung der Konfiguration, aber auch die LCA-Ergebnisse exportieren können. Hierbei soll ein Bericht als PDF generiert werden und per E-Mail oder Download exportiert werden können.
18	Dem Nutzer sollen Info-Knöpfe als Hilfestellung für die einzustellenden Felder geboten werden.
19	Die Anwendung soll demonstrativ anzeigen, welcher Nutzer/Fluggesellschaft eingeloggt ist.
20	Ist der Nutzer aus Versehen dabei die Konfiguration zu verlassen, soll die Anwendung darauf hinweisen, um einem Fehler vorzubeugen.

Tabelle A-17: Identifizierte nicht-funktionelle Anforderungen

Nr.	Anforderung
1	Die Nutzung der Software soll ortsunabhängig und selbstständig möglich sein.
2	Die Anwendung soll minimalistisch, modern und qualitativ gestaltet sein. Die Relevanz zur Nachhaltigkeit soll ersichtlich sein.
3	Die Eingabefelder sollen Standardwerte enthalten, sodass die Konfiguration für den Kunden möglichst unkompliziert verläuft.
4	Der Nutzer soll während der Konfiguration nicht überfordert werden (Gefühl von Prozesskontrolle entscheidend)
5	Die Informationen der Anwendung sollen sprachlich so formuliert werden, dass es für die Nutzer verständlich und logisch ist.
6	Die Anwendung soll konsistent in Wörtern und Funktionalität sein. Konventionen sollen eingehalten werden.
7	Wichtige Informationen sollten in jedem Konfigurationsschritt angezeigt werden.
8	„Das interaktive System sollte genügend Informationen liefern, die die Benutzer dazu befähigen zu ermitteln, ob das System für die von ihnen angestrebten Ergebnisse geeignet ist.“ (DIN EN ISO 9241).
9	„Das interaktive System sollte dem Benutzer die für jeden Aufgabenschritt erforderlichen Steuerelemente und aufgabenbezogene Informationen zur Verfügung stellen.“ (DIN EN ISO 9241).
10	„Das interaktive System sollte dem Benutzer keine Funktionen anbieten und Informationen darstellen, die die Ausführung aktueller Aufgaben behindern.“ (DIN EN ISO 9241).
11	„Das interaktive System sollte, soweit zweckmäßig, Standardauswahlmöglichkeiten anbieten.“ (DIN EN ISO 9241).
12	„Das interaktive System sollte keine Standardeinstellungen anbieten, wenn diese den Benutzer in die Irre führen können.“ (DIN EN ISO 9241)
13	„Das interaktive System sollte Informationen liefern, die den Benutzer führen und die Notwendigkeit der Konsultation von Onlinehilfen, Benutzerhandbüchern, oder sonstigen externen Informationen minimieren.“ (DIN EN ISO 9241)
14	„Das interaktive System sollte eindeutig anzeigen, an welcher Stelle der Navigationsstruktur sich der Benutzer befindet, welche Benutzerhandlungen zu diesem Zeitpunkt möglich sind und wie sie ausgeführt werden können.“ (DIN EN ISO 9241)
15	„Das interaktive System sollte Benutzer dazu befähigen, die zur Ausführung der Aufgabe erforderlichen Steuerelemente zu finden.“ (DIN EN ISO 9241)
16	„Das interaktive System sollte Informationen so darstellen, dass eindeutig ersichtlich ist, welche Benutzungsschnittstellen-Elemente interaktiv und welche nicht interaktiv sind.“ (DIN EN ISO 9241)
17	„Das interaktive System sollte Informationen mit einem dem Benutzer vertrauten Vokabular darstellen.“ (DIN EN ISO 9241)
18	„Das interaktive System sollte anzeigen, wann und wo eine Benutzereingabe erforderlich ist.“ (DIN EN ISO 9241)
19	„Das interaktive System sollte Schritte zur Erledigung der Aufgabe bereitstellen, die mit dem Aufgabenverständnis der Benutzer konsistent sind.“ (DIN EN ISO 9241)
20	„Das interaktive System sollte sofortige und den Benutzererfordernissen angemessene Rückmeldungen und Benutzerhandlungen liefern.“ (DIN EN ISO 9241)
21	„Das interaktive System sollte den Benutzer dabei unterstützen, die systemseitigen Einsatzmöglichkeiten zu entdecken und so zu nutzen, dass die vom Benutzer angestrebten Ergebnisse erreicht werden.“ (DIN EN ISO 9241)
22	„Das interaktive System sollte es dem Benutzer erlauben, das System ohne negative Konsequenzen zu explorieren („auszuprobieren“).“ (DIN EN ISO 9241)
23	„Das interaktive System sollte es dem Benutzer erlauben, die Ausführung einer unterbrochenen Aufgabe zu einem späteren Zeitpunkt dort fortzusetzen, wo eine Unterbrechung erfolgte.“ (DIN EN ISO 9241)
24	„Das interaktive System sollte es dem Benutzer erlauben, die Schritte der Aufgabe in der vom Benutzer bevorzugten Reihenfolge durchzuführen.“ (DIN EN ISO 9241)
25	„Das interaktive System soll nur aktuell gültige Auswahlmöglichkeiten zulassen.“ (DIN EN ISO 9241)
26	„Das interaktive System sollte vor der Weiterverarbeitung von Eingaben und Einstellungen mögliche Eingabefehler identifizieren.“ (DIN EN ISO 9241)
27	„Das interaktive System sollte den Benutzer dabei unterstützen, Eingabefehler zu entdecken, nachzuvollziehen und zu korrigieren.“ (DIN EN ISO 9241)
28	„Das interaktive System sollte präzise, verständliche und höflich formulierte Fehlermeldungen ausgeben.“ (DIN EN ISO 9241)
29	„Das interaktive System sollte dem Benutzer Bestätigungen über erfolgreich erledigte Aufgaben liefern und darüber informieren, dass keine offenen Punkte mehr vorliegen, um die sich der Benutzer kümmern muss.“ (DIN EN ISO 9241)
30	„Das interaktive System sollte für seine Benutzer einen positiven ersten Eindruck erzeugen.“ (DIN EN ISO 9241)

A.9 Pedigree-Matrix zur Bewertung der Datenqualität

Tabelle A-18: Pedigree-Matrix (Europäische Union 2013)

Bewertung	1 (Sehr gut Qualität)	2 (Gute Qualität)	3 (Mittlere Qualität)	4 (Schlechte Qualität)	5 (Sehr schlechte Qualität)
Merkmal					
Technologische Repräsentativität (TeR)	Kontextspezifisch	Kontextspezifisch	Kontextspezifisch	Kontextspezifisch	Kontextspezifisch
Räumliche Repräsentativität (GR)	Kontextspezifisch	Kontextspezifisch	Kontextspezifisch	Kontextspezifisch	Kontextspezifisch
Zeitbezogene Repräsentativität (TiR)	Kontextspezifisch	Kontextspezifisch	Kontextspezifisch	Kontextspezifisch	Kontextspezifisch
Vollständigkeit (C)	Sehr gute Vollständigkeit (≥ 90 %)	Gute Vollständigkeit (80 - bis 90 %)	Mittlere Vollständigkeit (70 % - 80 %)	Schlechte Vollständigkeit (50 % - 70 %)	Sehr schlechte oder unbekannte Vollständigkeit (< 50 %)
Genauigkeit/ Unsicherheit (P)	Sehr niedrige Unsicherheit (≤ 10 %)	Niedrige Unsicherheit (10 % - 20 %)	Mittlere Unsicherheit (20 % - 30 %)	Hohe Unsicherheit (30 % - 50 %)	Sehr hohe Unsicherheit (> 50 %)

Tabelle A-19: Erklärungen zu den Kategorien (Europäische Union 2013)

Merkmal	Erklärung
Technologische Repräsentativität (TeR)	Zu beurteilen im Hinblick auf die Abdeckung jeder EF-Wirkungskategorie und gemessen an einer hypothetischen idealen Datenqualität.
Räumliche Repräsentativität (GR)	Ausmaß, in dem der Datensatz die tatsächlich untersuchte Grundgesamtheit unter räumlichen Gesichtspunkten widerspiegelt; dies gilt auch für Datensätze für Hintergrundprozesse, falls vorhanden.
Zeitbezogene Repräsentativität (TiR)	Ausmaß, in dem der Datensatz die spezifischen Bedingungen des untersuchten Systems in Bezug auf die Zeit der Datenerfassung/das Alter der Daten widerspiegelt; dies gilt auch für Datensätze für Hintergrundprozesse, falls vorhanden.
Vollständigkeit (C)	Zu beurteilen im Hinblick auf die Abdeckung jeder EF-Wirkungskategorie und gemessen an einer hypothetischen, idealen Datenqualität.
Genauigkeit/ Unsicherheit (P)	Qualitative Beurteilung durch einen Sachverständigen oder relative Standardabweichung in Prozent bei Anwendung einer Monte-Carlo-Simulation.
Technologische Repräsentativität (TeR)	Ausmaß, in dem der Datensatz die tatsächlich untersuchte Grundgesamtheit in Bezug auf die angewandte Technologie widerspiegelt; dies gilt auch für Datensätze für Hintergrundprozesse, falls vorhanden.

$$DQR = \frac{TeR + GR + TiR + C + P}{5}$$

Hinweis: Die Pedigree-Matrix der Europäischen Union enthält zudem das Merkmal der methodischen Eignung und Konsistenz, wurde hier jedoch nicht berücksichtigt.

A.10 Notwendige Datensätze für die Anwendung der Methodik

A.10.1 Treibstoffverbrauch und Emissionsfaktoren für zwei typische Triebwerke in der LTO-Phase

Tabelle A-20: Verbrauchswerte für die Triebwerkstypen Trent XWB-84 und PW1124G1-JM (ICAO 2021)

Verbrauch in [kg/Sekunde]	ff_{idle}	ff_{TO}	ff_{CO}	ff_{App}
Trent XWB-84	2,819	2,306	0,801	0,291
PW1124G1-JM	0,710	0,600	0,210	0,080

Tabelle A-21: Emissionsfaktoren für die Triebwerkstypen Trent XWB-84 und PW1124G1-JM (ICAO2021)

		Rollen (t_{idle})	Start (t_{TO})	Steigflug (t_{CO})	Anflug (t_{App})
Trent XWB-84	HC	0,94	0	0	0
	CO	20,56	0,39	0,39	1,2
	NOx	4,73	45,48	34,53	11,46
PW1124G1-JM	HC	0,55	0,1	0,1	0,02
	CO	29,78	0,26	0,38	6,39
	NOx	4,72	16,47	13,85	8,92

A.10.2 Gleichung und Datensätze für Interpolationen

Gleichung zur Interpolation der Flugdauer bei Kurz-, Mittel und Langstreckenflügen:

$$t_{\text{Range,S,M,L}} = t_{\text{Range(1)}} + \frac{(t_{\text{Range(2)}} - t_{\text{Range(1)}})}{(l_{\text{flug(2)}} - l_{\text{flug(1)}})} \cdot (l_{\text{flug(2)}} - l_{\text{flug(S,M,L)}})$$

Tabelle A-22: Fluglängen, Dauer und typischer Treibstoffverbrauch für A320 und A350 (European Environment Agency 2019)

Fluglänge in [NM]	A320			A350		
	Am häufigsten beobachtete Reiseflughöhe [100 Feet]	Dauer [hh:mm:ss]	Treibstoffverbrauch [kg]	Am häufigsten beobachtete Reiseflughöhe [100 Feet]	Dauer [hh:mm:ss]	Treibstoffverbrauch [kg]
125	180	00:21:37	931,92	180	00:21:56	1 786,52
200	270	00:31:18	1 356,45	240	00:31:55	2 692,42
250	280	00:37:44	1 647,38	280	00:37:51	3 226,65
500	320	01:10:49	2 946,00	360	01:08:34	5 713,71
750	360	01:45:05	4 124,49	400	01:39:48	8 071,12
1 000	380	02:18:37	5 273,37	400	02:10:56	10 641,24
1 500	380	03:25:45	7 768,61	420	03:13:15	15 553,61
2 000	380	04:32:47	10 483,84	420	04:15:41	20 705,44
2 500	380	05:39:50	12 914,24	440	05:17:56	25 537,04
3 000	380	06:46:01	15 846,86	440	06:20:25	30 705,60
3 500				440	07:22:39	35 715,75
4 000				440	08:25:09	40 920,82
4 500				440	09:27:24	45 933,32
5 000				440	10:30:01	51 380,03
5 500				440	11:32:17	56 391,88

A.10.3 Erläuterungen und Daten zur höhenabhängigen Wirkung

Wie in der Ökobilanzmethode dargestellt, kann die höhenabhängige Wirkung nach Schwartz integriert werden. Grundlage für diese Möglichkeit ist die Vergleichbarkeit des Global Temperature Change Potentials (SGTP) und dem Global Warming Potential (GWP) im Kontext der ReCiPe-Methode (Huijbregts et al. 2017b; Shine et al. 2005). Die SGTP zur Berechnung der CF sind für die Perspektive *Hierarchist* aus (Schwartz und Kroo 2009) entnommen und in nachfolgender Tabelle aufgelistet. Zudem werden die höhenabhängigen Gewichtungsfaktoren sowie die Gleichung zur Interpolation dargestellt.

Für weitere Erläuterungen sowie Darstellungen zur höhenabhängigen Wirkung sei auf die Veröffentlichungen (Keiser et al. 2023a; Scholz 2020; Schwartz und Kroo 2009) verwiesen.

Tabelle A-23: SGTP für die Perspektive Hierarchist (Schwartz und Kroo 2009)

Substanz (x)	Einheit	SGTP _(x,100)
CO ₂	[K / kg CO ₂]	3,58E-14
O ₃ (kurzfristig)	[K / kg NO _x]	7,97E-12
CH ₄	[K / kg NO _x]	-3,9E-12
O ₃ (langfristig)	[K / kg NO _x]	-9,14E-13
Kondensstreifen	[K / km]	1,37E-13
Zirruswolken	[K / km]	4,12E-13

$$s_{Substanz(h)} = s_{Substanz(1)} + \frac{(s_{Substanz(2)} - s_{Substanz(1)})}{(h_{flug(2)} - h_{flug(1)})} \cdot (h_{flug(2)} - h_{flug(S,M,L)})$$

Tabelle A- 24: Treibende Faktoren in Abhängigkeit von der Höhe für AIC, O3, CH4 und O3 (Scholz 2020)

AIC		O3 (S)		CH4 and O3 (L)	
Forcing factor s	Höhe (ft)	Forcing factor s	Höhe (ft)	Forcing factor s	Höhe (ft)
0,02845	17470	0,46942	17502	0,86771	17470
0,00000	19548	0,55761	19484	0,92461	19484
0,00000	21530	0,62020	21498	0,95590	21498
0,17354	23511	0,71124	23480	0,96159	23543
0,39545	25525	0,71124	25525	0,94452	25525
0,79943	27507	0,81366	27507	0,92745	27539
1,25178	29457	0,93030	29521	0,92745	29521
1,70982	31598	1,00996	31502	0,94168	31534
2,10526	33548	1,13229	33484	0,97582	33516
1,82077	35530	1,42816	35562	1,14083	35562
1,53343	37543	1,62447	37575	1,21479	37543
0,96728	39557	1,80370	39589	1,20341	39589
0,79374	41539	1,93172	41539	1,20341	41571

A.10.4 Notwendige Charakterisierungsfaktoren

Tabelle A-25: Charakterisierungsfaktoren zur Berechnung der Midpoint Indikatoren – Hierarchist
(National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health 2017a)

Midpoint Indikatoren	Einheit	Zugeordnete Substanz (Hierarchist Charakterisierungsfaktor)
Klimawandel	[kg CO2eq]	CO2 (1), N2O (298), H2O*, NOX* (*), CH4(34) *Berücksichtigung mittels Schwarz
Ozonabbau	[kg CFC11eq]	N2O (0,011)
Ionisierende Strahlung	[kBq Co-60 to air eq]	-
Feinstaubbildung	[kg PM2.5-eq]	SO2 (0,29), NOX (0,11), NH3 (0,24)
Photochemische Ozonbildung (Ökosystem)	[kg NOx-eq]	NOx (1), HC (0,26)
Photochemische Ozonbildung (menschliche Gesundheit)	[kg NOx-eq]	NOX (1), HC (0,16), NMVOC (0,18)
Übersäuerung Land	[1,4-DCB eq.]	SO2 (1), NOX (0,36), NH3 (1,96)
Süßwasser -Eutrophierung	[1,4-DCB eq.]	-
Mehrwasser-Eutrophierung	[1,4-DCB eq.]	NOX (0,0384), NH3 (0,104)
Menschliche Toxizität (krebserregend)	[1,4-DCB eq.]	HC (0,17)
Menschliche Toxizität (nicht krebserregend)	[1,4-DCB eq.]	HC (0,78)
Toxizität Land	[m3 H2O consumed]	HC (0,03)
Toxizität Süßwasser	[kg SO2-eq]	HC (0,0000154)
Toxizität Meer	[m2-annual crop eq]	HC (0,000388)
Landnutzung und Transformation	[kg P-eq. to freshwater]	-
Wasserverbrauch	[kg N-eq to marine water]	-
Mineralienverbrauch	[kg Cu-eq]	-
Verbrauch fossiler Rohstoffe	[kg oil-eq]	Rohöl (1), Gas (0,71)

A.10.5 Mid-to-Endpoint Faktoren

Tabelle A-26: Mid-to-Endpoint Faktoren für die Perspektive Hierarchist
(National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health 2017b)

Midpoint Indikatoren	Einheit	Charakterisierungsfaktor (Hierarchist)
Menschliche Gesundheit		
Klimawandel (menschliche Gesundheit)	DALY/[kg CO ₂ eq]	9,28E-07
Ozonabbau (menschliche Gesundheit)	DALY/[kg CFC11eq]	5,31E-04
Ionisierende Strahlung (menschliche Gesundheit)	DALY/[kBq Co-60 to air eq]	8,50E-09
Feinstaubbildung (menschliche Gesundheit)	DALY/[kg PM _{2.5} -eq]	6,29E-04
Photochemische Ozonbildung (menschliche Gesundheit)	DALY/kg NO _x eq.	9,10E-07
Toxizität (Krebserregend)	DALY/kg 1,4-DCB emitted to urban air eq.	3,32E-06
Toxizität (Nicht Krebserregend)	DALY/kg 1,4-DCB emitted to urban air eq.	2,28E-07
Wasserverbrauch (menschliche Gesundheit)	[1,4-DCB eq.]	2,22E-06
Ökosystem		
Klimawandel (Ökosystem Land)	Species.year/kg CO ₂ eq.	2,80E-09
Photochemische Ozonbildung (Ökosystem Land)	Species.year/kg NO _x eq.	1,29E-07
Übersäuerung (Ökosystem Land)	Species.year/kg SO ₂ eq.	2,12E-07
Toxizität (Ökosystem Land)	species*yr/kg 1,4-DBC emitted to industrial soil eq.	1,14E-11
Wasserverbrauch (Ökosystem Land)	species.yr/m ³ consumed	1,35E-08
Landnutzung und Transformation (Ökosystem Land)	Species/(m ² -annual crop eq)	8,88E-09
Klimawandel (Ökosystem Süßwasser)	Species.year/kg CO ₂ eq.	1,45E-14
Eutrophierung (Ökosystem Süßwasser)	Species.year/kg P to freshwater eq.	6,71E-07
Toxizität (Ökosystem Süßwasser)	species-yr/kg 1,4-DBC emitted to freshwater eq.	6,95E-10
Wasserverbrauch	species.yr/m ³ consumed	6,04E-13
Toxizität Meer (Ökosystem Salzwasser)	species-yr/kg 1,4-DBC emitted to sea water eq.	1,05E-10
Eutrophierung (Ökosystem Salzwasser)	Species.year/kg N to marine water eq.	1,70E-09
Ressourcenverfügbarkeit		
Mineralienverbrauch	species-yr/kg 1,4-DBC emitted to sea water eq.	1,05E-10
Verbrauch fossiler Rohstoffe	Species.year/kg N to marine water eq.	1,70E-09

A.10.6 Normalisierungs- und Gewichtungsfaktoren

Tabelle A-27: Normalisierungsfaktoren
(National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health 2017b)

Midpoint Indikator	Einheit	Perspektive		
		<i>Individualist</i>	<i>Hierarchist</i>	<i>Egalitär</i>
Menschliche Gesundheit				
Klimawandel (menschliche Gesundheit)	DALY/[kg CO ₂ eq]	8,73E-04	7,42E-03	7,25E-02
Ozonabbau (menschliche Gesundheit)	DALY/[kg CFC11eq]	1,55E-05	3,19E-05	9,44E-05
Ionisierende Strahlung (menschliche Gesundheit)	DALY/[kBq Co-60 to air eq]	3,19E-06	4,08E-06	9,78E-06
Feinstaubbildung (menschliche Gesundheit)	DALY/[kg PM _{2.5} -eq]	1,00E-02	1,61E-02	1,61E-02
Photochemische Ozonbildung (menschliche Gesundheit)	DALY/kg NO _x eq.	1,80E-05	1,80E-05	1,80E-05
Toxizität (Krebserregend)	DALY/kg 1,4-DCB emitted to urban air eq.	3,29E-06	3,42E-05	9,80E-04
Toxizität (Nicht Krebserregend)	DALY/kg 1,4-DCB emitted to urban air eq.	3,39E-07	2,08E-04	1,48E-02
Wasserverbrauch (menschliche Gesundheit)	[1,4-DCB eq.]	1,96E-04	1,96E-04	2,91E-04
Ökosystem				
Klimawandel (Ökosystem Land)	Species.year/kg CO ₂ eq.	5,72E-06	2,24E-05	1,45E-04
Photochemische Ozonbildung (Ökosystem Land)	Species.year/kg NO _x eq.	2,24E-06	2,24E-06	2,24E-06
Übersäuerung (Ökosystem Land)	Species.year/kg SO ₂ eq.	8,42E-06	8,42E-06	8,42E-06
Toxizität (Ökosystem Land)	species*yr/kg 1,4-DBC emitted to industrial soil eq.	3,62E-04	8,19E-04	8,82E-04
Wasserverbrauch (Ökosystem Land)	species.yr/m ³ consumed	0,00E+00	3,48E-06	3,48E-06
Landnutzung und Transformation (Ökosystem Land)	Species/(m ² -annual crop eq)	6,23E-04	6,23E-04	6,23E-04
Klimawandel (Ökosystem Süßwasser)	Species.year/kg CO ₂ eq.	1,56E-10	6,11E-10	3,95E-09
Eutrophierung (Ökosystem Süßwasser)	Species.year/kg P to freshwater eq.	4,90E-07	4,90E-07	4,90E-07
Toxizität (Ökosystem Süßwasser)	species-yr/kg 1,4-DBC emitted to freshwater eq.	8,74E-09	1,75E-08	2,02E-07
Wasserverbrauch	species.yr/m ³ consumed	6,16E-10	6,16E-10	6,16E-10
Toxizität Meer (Ökosystem Salzwasser)	species-yr/kg 1,4-DBC emitted to sea water eq.	9,24E-10	4,56E-09	2,59E-04
Eutrophierung (Ökosystem Salzwasser)	Species.year/kg N to marine water eq.	6,12E-09	6,12E-09	6,12E-09

Ressourcenverfügbarkeit				
Mineralienverbrauch	species-yr/kg 1,4-DBC emitted to sea water eq.	3,08E+04	2,77E+04	2,77E+04
Verbrauch fossiler Rohstoffe	Species.year/kg N to marine water eq.	2,91E+02	2,91E+02	2,91E+02

Tabelle A-28: Gewichtungsfaktoren
(National Institute for Public Health and the Environment Ministry of Health 2014)

	Menschliche Gesundheit	Ökosystem	Ressourcenverfügbarkeit
Mittelwert	400	400	200
Individualist	250	550	200
Hierachist	400	300	300
Egalitär	500	300	200

A.11 Benutzeroberflächen

A.11.1 Mock-UP für eine digitale Schnittstelle der Zulieferer



Datenmanagement



Cradle to Gate Schnittenstellendokument

IMPORT EXCEL

Zulieferer- und Baugruppeninformationen

Produkt und Zulieferer ▼

Zulieferer

Baugruppe

Bezeichnung

Lebensdauer und Gewicht ▼

Lebensdauer [h]

Gewicht [kg]

Qualität der Daten ▼

DQR Nach ILCD-Handbuch

Umweltwirkungen

Angabe der Systemgrenzen (X = im LCA enthalten; NI = nicht enthalten) ▼

Rohstoffabbau

A1: Abbau von Rohstoffen

Produktion & Transport

B1: Produktion

B2: Transport

Betriebsphase

C1: Instandhaltung

C2: Herstellung Treibstoff

C3: Verbrennung Treibstoff

Recycling & Entsorgung

D1: Wiederverwendung

D2: Recycling

D3: Verbrennung

D4: Entsorgung

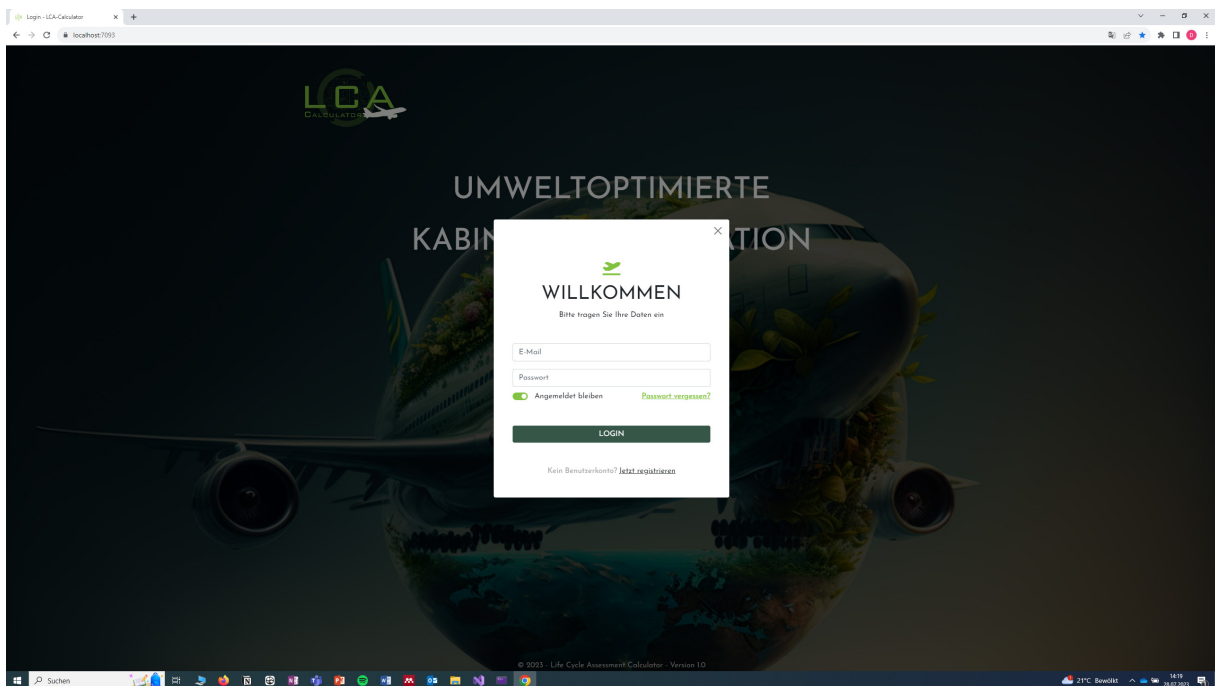
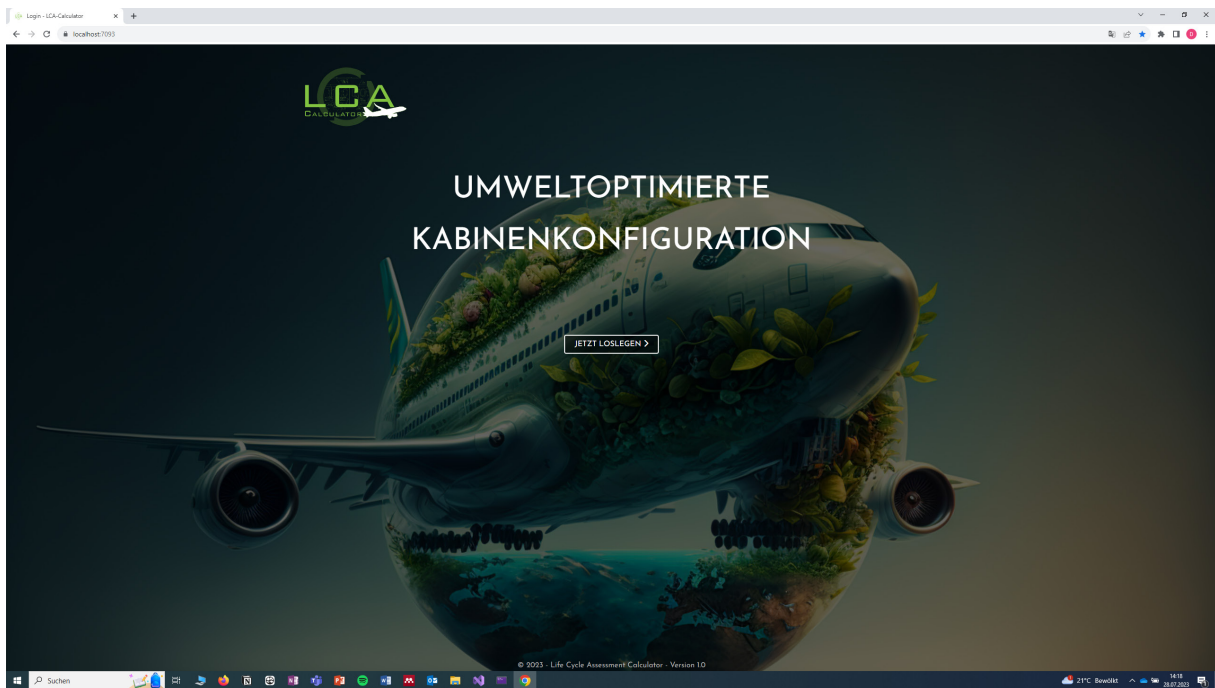
Midpoint-Ergebnisse A1-C2 ▼

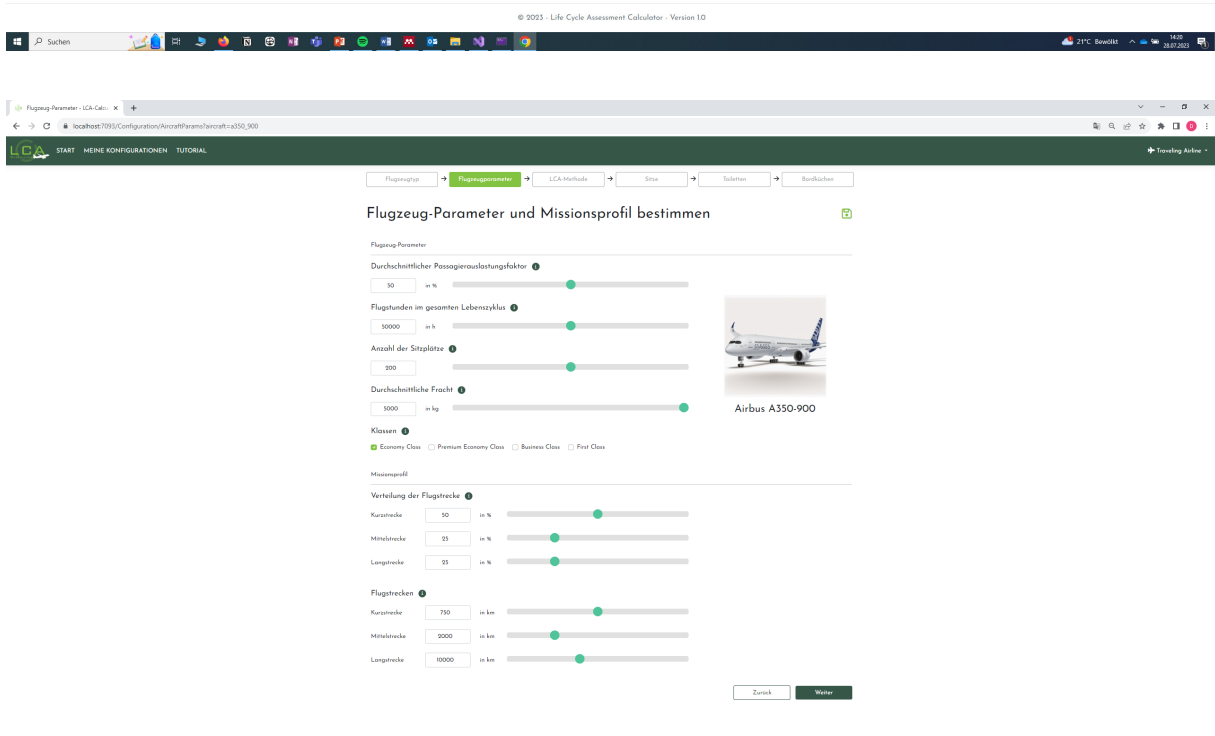
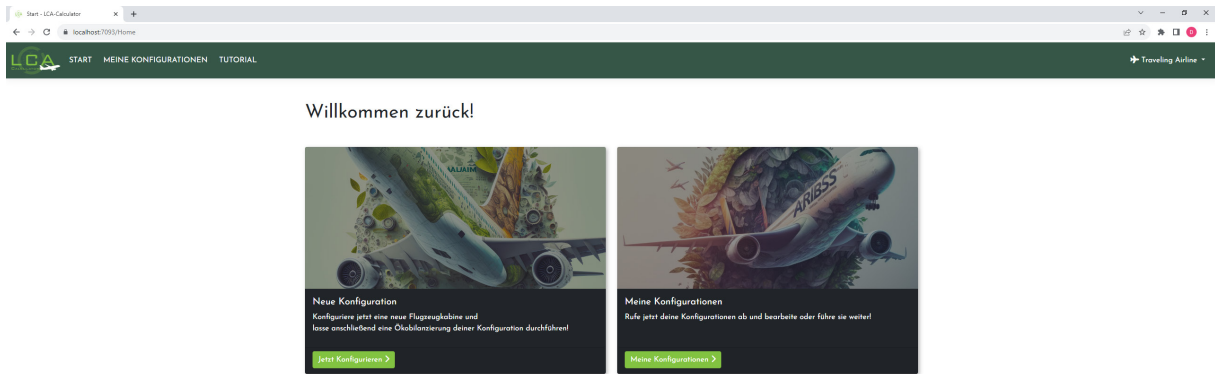
Klimawandel [kg CO₂eq]

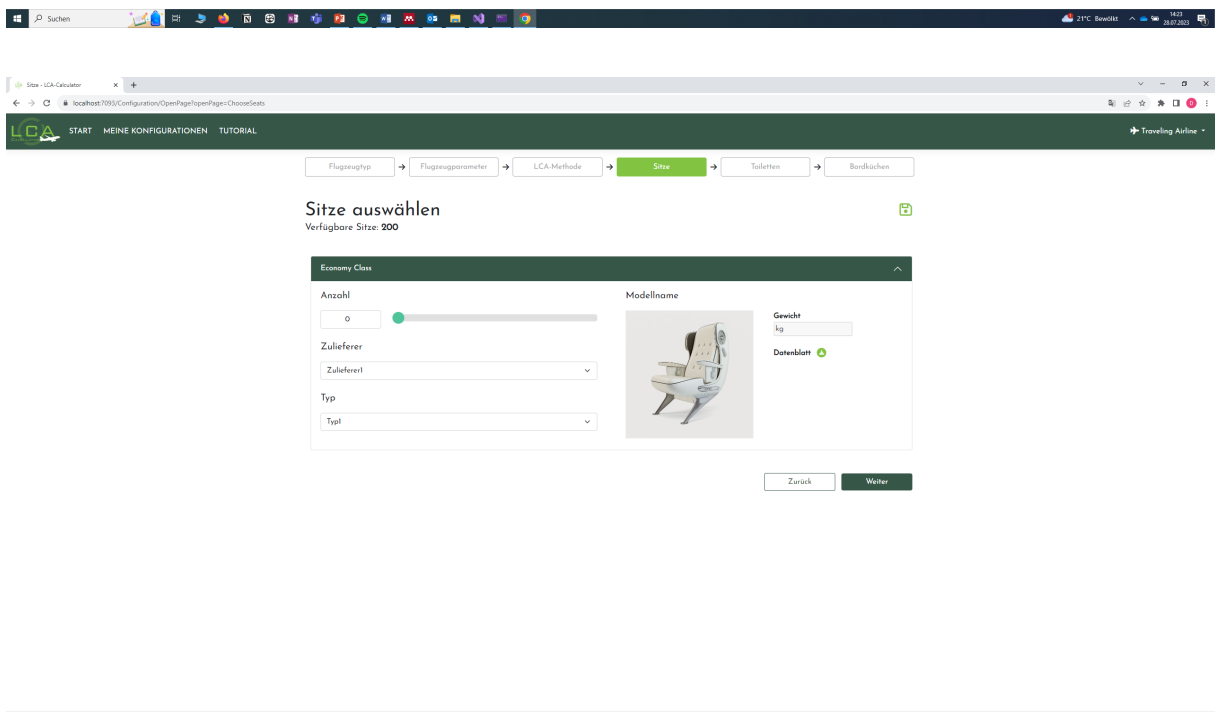
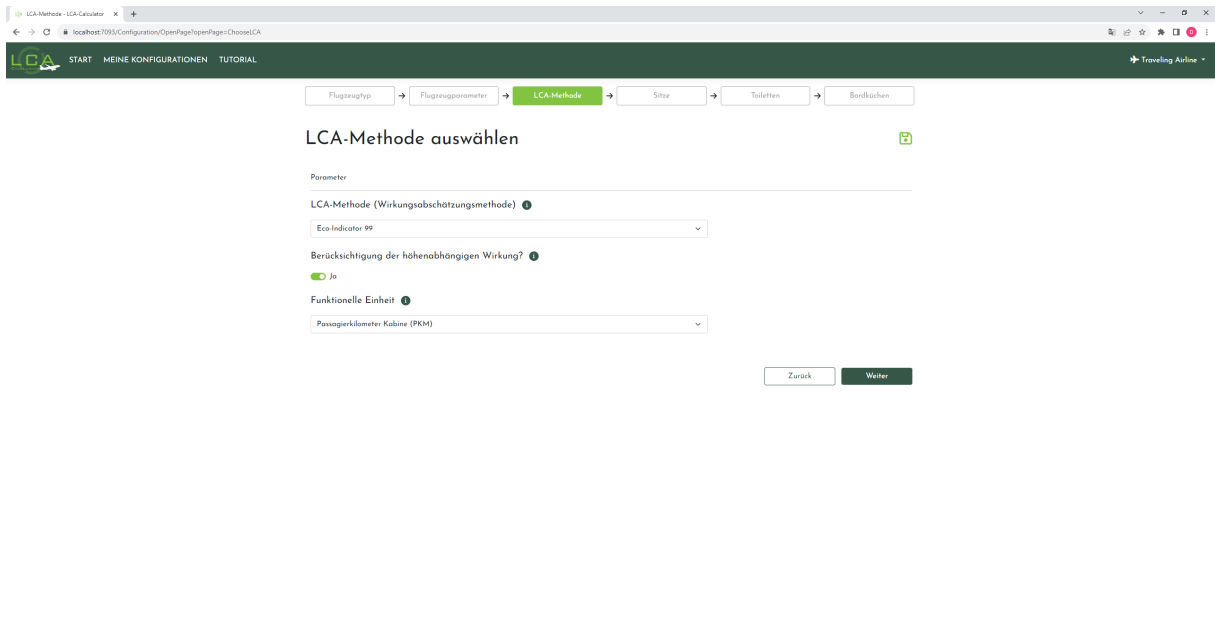
A1: B1: B2: C1: C2:

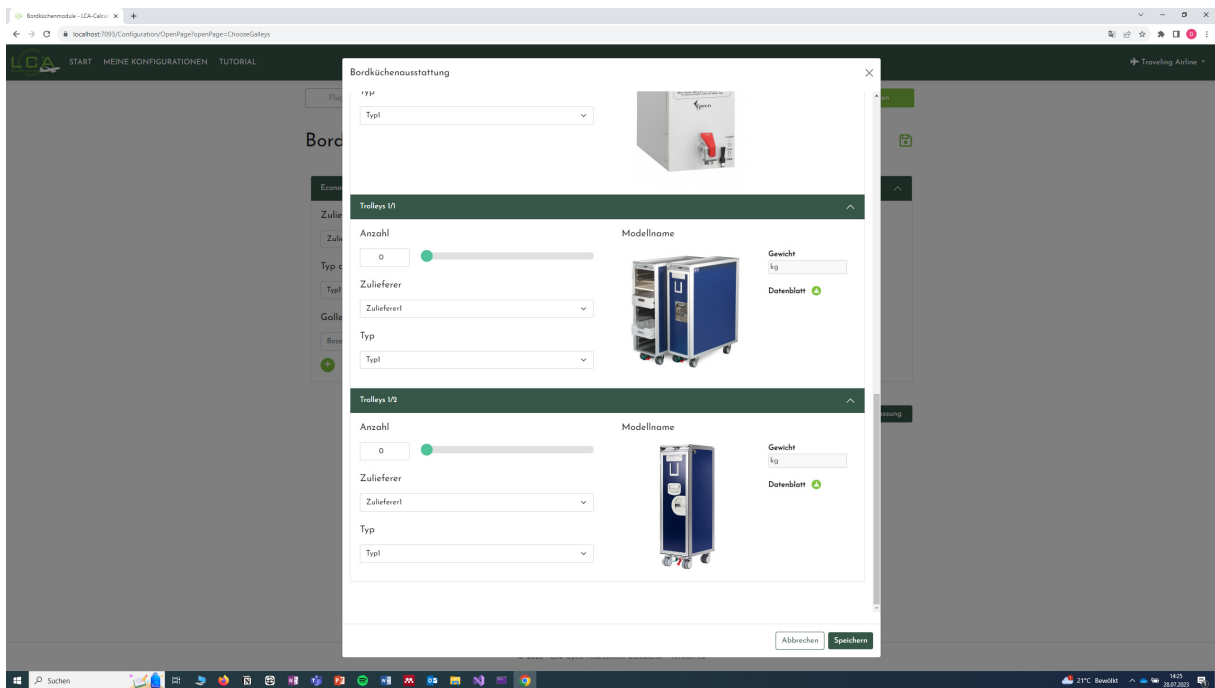
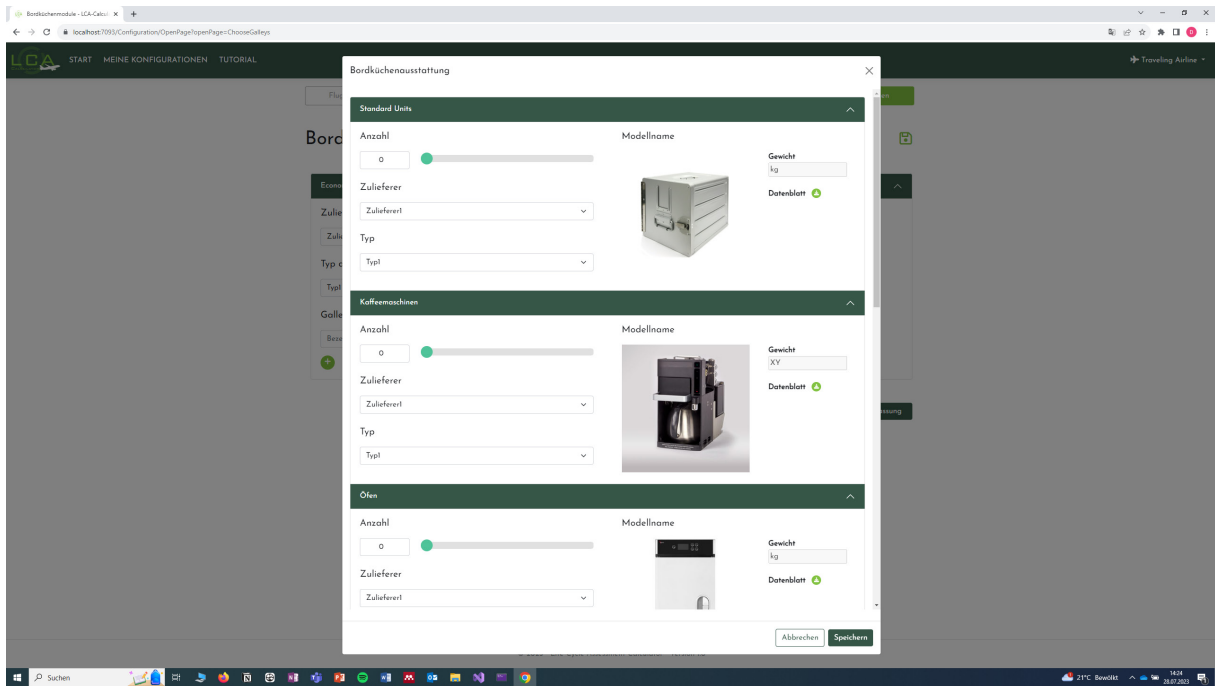
Ökotoxizität [kg CFC11eq]

A.11.2 Benutzeroberfläche der prototypischen Implementierung









A.12 Daten zur Anwendung der Methodik

Tabelle A- 29: Getroffene Annahmen zur Modellierung der Schnittstellendokumente. Lebensdauer und Materialmix

Komponente	Lebensdauer [Stunden]	Aluminium [%]	GLARE [%]	Komposit [%]	Kunststoff [%]	Stahl [%]
Sitze	12000	10	45	20	10	15
Toiletten	30000	10	20	10	50	10
Bordküchenmodule	30000	5	40	10	40	5
Standardeinheiten	7200	10	80	10	0	0
Kaffeemaschinen	7200	20	50	25	0	5
Wasserkocher	7200	50	5	0	20	25
Trolleys (Groß)	12000	5	40	5	50	0

Zulieferer- und Baugruppeninformationen									
PRODUKT UND ZULIEFERER					LEBENSDAUER UND GEWICHT				
Zulieferer					Lebensdauer [Stunden]	120000			
Baugruppe					Gewicht [kg]	1			
Bezeichnung	Sitze Economy				Funktionelle Einheit: 1kg je Unit				
QUALITÄT DER DATEN									
DQR					Nach ILCD-Handbuch				
Umweltwirkungen									
ANGABE DER SYSTEMGRENZEN (X = IM LCA ENTHALTEN; NI = NICHT ENTHALTEN)									
ROHSTOFFABBAU	PRODUKTION & TRANSPORT		Betriebsphase			Recycling und Entsorgung			
Abbau von Rohstoffen	Produktion	Transport	Instandhaltung	Herstellung Treibstoff	Verbrennung Treibstoff	Wiederverwendung	Recycling	Verbrennung	Entsorgung
A1	B1	B2	C1	C2	C3	D1	D2	D3	D4
x	x	x	x			x	x	x	x
Midpointergebnisse A1 - C2									
Midpointindikator	Einheit	A1	B1	B2	C1	C2			
Klimawandel	[kg CO2eq]	3.20E+00	4.73E-02	7.50E-02	3.99E+00				
Ozonabbau	[kg CFC11eq]	7.33E-07	2.48E-08	2.80E-08	1.27E-06				
Ionisierende Strahlung	[kBq Co-60 to air eq]	1.45E-01	1.10E-02	7.26E-04	1.85E-01				
Feinstaubbildung	[kg PM2.5-eq]	5.83E-03	3.18E-05	2.95E-04	7.39E-03				
Photochemische Ozonbildung (Mensch)	[kg NOx-eq]	7.38E-03	5.44E-05	9.89E-04	9.30E-03				
Photochemische Ozonbildung (Land)	[kg NOx-eq]	7.60E-03	5.61E-05	1.01E-03	9.52E-03				
Toxizität (krebserregend)	[1,4-DCB eq.]	3.45E-01	4.14E-03	3.99E-03	4.35E-01				
Toxizität (nicht krebserregend)	[1,4-DCB eq.]	3.19E+00	1.01E-01	4.06E-02	4.15E+00				
Toxizität (Land)	[1,4-DCB eq.]	7.04E+00	2.47E-01	9.17E-01	9.72E+00				
Toxizität (Süßwasser)	[1,4-DCB eq.]	2.65E-01	5.93E-03	1.36E-03					
Toxizität (Meerwasser)	[1,4-DCB eq.]	3.34E-01	7.59E-03	2.33E-03					
Wasserverbrauch	[m³ H2O consumed]	1.92E-02	2.47E-04						
Übersäuerung	[kg SO2-eq]	1.24E-02	9.03E-03						
Landnutzung & -verformung	[m² annual crop eq]	7.16E-02							
Landnutzungsverformung	[kg P-eq. to freshwater]	1.03E-02							

Abbildung A-9: Ausschnitt eines Schnittstellendokuments (Economy Klasse)

Tabelle A- 30: Ergebnisse der Sachbilanz für die Herstellung des Treibstoffs sowie die Verbrennung für den gesamten Lebenszyklus der Kabine

Output	Herstellung [Menge in kg]	Verbrennung [Menge in kg]
M _{CO2}	4,82E+07	3,65E+06
M _{N2O}	1,51E+03	0,00E+00
M _{SO2}	3,06E+03	4,88E+03
M _{H2O}	1,89E+07	0,00E+00
M _{NOX}	2,90E+05	0,00E+00
M _{HC}	4,30E+03	0,00E+00
M _{CO}	3,74E+04	0,00E+00
M _{NH3}	2,63E+03	3,46E+01
M _{NMVOC}	1,51E+04	0,00E+00
M _{TSP}	2,86E+03	0,00E+00
M _{CH4}	2,38E+02	4,48E+03
M _{GI}	0,00E+00	1,70E+07
M _{gas}	0,00E+00	8,85E+05

Tabelle A-31: Midpoint Indikatoren für alle Phasen des Lebenszyklus -
Funktionale Einheit: Gesamter Lebenszyklus Kabine

Midpoint Indikator	Einheit	Rohstoffabbau	Produktion Kabine und Transport	Produktion Treibstoff	Betriebsphase	Recycling und Entsorgung
Klimawandel	[kg CO ₂ eq]	1,54E+05	1,13E+04	3,91E+06	1,44E+08	7,47E+03
Ozonabbau	[kg CFC11eq]	3,70E-02	1,94E-03	0,00E+00	8,24E+01	2,33E-03
Ionisierende Strahlung	[kBq Co-60 to air eq]	8,07E+03	2,65E+02	0,00E+00	5,08E+03	6,57E+02
Feinstaubbildung	[kg PM _{2,5} -eq]	2,84E+02	1,64E+01	1,48E+03	3,36E+04	1,82E+01
Photochemische Ozonbildung (Mensch)	[kg NO _x -eq]	3,49E+02	6,59E+01	0,00E+00	2,94E+05	1,58E+01
Photochemische Ozonbildung (Land)	[kg NO _x -eq]	3,58E+02	6,79E+01	0,00E+00	2,92E+05	1,80E+01
Toxizität (krebserregend)	[1,4-DCB eq,]	1,24E+04	2,80E+02	0,00E+00	1,76E+04	5,15E+02
Toxizität (nicht krebserregend)	[1,4-DCB eq,]	1,37E+05	5,20E+03	0,00E+00	1,28E+05	1,01E+04
Toxizität (Land)	[1,4-DCB eq,]	3,27E+05	5,14E+04	0,00E+00	2,70E+05	2,18E+04
Toxizität (Süßwasser)	[1,4-DCB eq,]	1,00E+04	1,84E+02	0,00E+00	1,00E+04	4,53E+02
Toxizität (Meerwasser)	[1,4-DCB eq,]	1,27E+04	2,67E+02	0,00E+00	1,19E+04	5,99E+02
Wasserverbrauch	[m ³ H ₂ O consumed]	8,60E+02	1,26E+01	0,00E+00	6,50E+02	2,10E+01
Übersäuerung	[kg SO ₂ -eq]	5,96E+02	4,76E+01	5,16E+03	1,13E+05	2,28E+01
Landnutzung & Transformation	[m ² -annual crop eq]	3,66E+03	1,68E+02	0,00E+00	2,66E+03	9,87E+01
Süßwasser-Eutrophierung	[kg P-eq, to freshwater]	5,06E+01	1,71E+00	0,00E+00	3,66E+01	7,39E+00
Meerwasser-Eutrophierung	[kg N-eq to marine water]	6,93E+00	3,24E-01	3,51E+00	1,12E+04	7,23E-01
Mineralienverbrauch	[kg Cu-eq]	1,40E+03	9,18E+01	0,00E+00	2,15E+03	8,08E+01
Verbrauch fossiler Ressourcen	[kg oil-eq]	3,67E+04	3,53E+03	1,76E+07	2,54E+04	5,07E+03

Tabelle A-32: Normalisierte und gewichtete Midpoint Indikatoren, Endpoint Indikatoren und Single Score
Funktionelle Einheit: Gesamter Lebenszyklus

Midpoint Indikator	Rohstoffabbau	Produktion Kabine und Transport	Produktion Treibstoff	Betriebsphase	Recycling und Entsorgung
Klimawandel	7,71E+03	5,64E+02	5,87E+05	2,16E+07	3,74E+02
Ozonabbau	2,46E+02	1,29E+01	0,00E+00	5,49E+05	1,55E+01
Ionisierende Strahlung	6,73E+03	2,21E+02	0,00E+00	4,24E+03	5,48E+02
Feinstaubbildung	4,43E+03	2,57E+02	2,32E+04	5,25E+05	2,84E+02
Photochemische Ozonbildung (Mensch)	7,04E+03	1,33E+03	0,00E+00	5,94E+06	3,20E+02
Photochemische Ozonbildung (Land)	8,25E+03	1,56E+03	0,00E+00	6,74E+06	4,16E+02
Toxizität (krebserregend)	4,82E+05	1,09E+04	0,00E+00	6,85E+05	2,00E+04
Toxizität (nicht krebserregend)	6,01E+04	2,28E+03	0,00E+00	5,60E+04	4,41E+03
Toxizität (Land)	2,16E+03	3,39E+02	0,00E+00	1,78E+03	1,44E+02
Toxizität (Süßwasser)	1,60E+05	2,92E+03	0,00E+00	1,59E+05	7,20E+03
Toxizität (Meerwasser)	1,17E+05	2,46E+03	0,00E+00	1,09E+05	5,52E+03
Wasserverbrauch	5,97E-02	8,78E-04	0,00E+00	4,51E-02	1,46E-03
Übersäuerung	6,00E+03	4,80E+02	5,20E+04	1,14E+06	2,29E+02
Landnutzung & Transformation	2,08E+01	9,57E-01	0,00E+00	1,51E+01	5,63E-01
Süßwasser-Eutrophierung	2,77E+04	9,35E+02	0,00E+00	2,00E+04	4,05E+03
Meerwasser-Eutrophierung	7,70E+02	3,60E+01	3,90E+02	1,25E+06	8,03E+01
Mineralienverbrauch	1,30E-09	8,49E-11	0,00E+00	1,99E-09	7,48E-11
Verbrauch fossiler Ressourcen	8,82E+03	8,49E+02	4,23E+06	6,10E+03	1,22E+03
Endpoint Indikatoren					
Menschliche Gesundheit [DALY]	3,96E-01	2,30E-02	4,07E+00	1,55E+02	2,21E-01
Ökosystem [species]	6,94E-04	5,40E-05	1,13E-02	4,27E-01	3,42E-04
Ressourcenverfügbarkeit [\$]	8,65E+03	1,48E+03	2,91E-07	6,10E+03	1,87E+04
Single Scores					
Single Score	8,99E+05	2,51E+04	4,89E+06	3,88E+07	4,48E+04

Tabelle A-33: Midpoint Indikatoren für alle Phasen des Lebenszyklus (Kabine +25 Sitze) –
Funktionale Einheit: Gesamter Lebenszyklus Kabine

Midpoint Indikator	Einheit	Rohstoffabbau	Produktion Kabine und Transport	Produktion Treibstoff	Betriebsphase	Recycling und Entsorgung
Klimawandel	[kg CO ₂ eq]	1,58E+05	1,14E+04	3,99E+06	1,47E+08	7,47E+03
Ozonabbau	[kg CFC11eq]	3,79E-02	2,00E-03	0,00E+00	8,28E+01	2,33E-03
Ionisierende Strahlung	[kBq Co-60 to air eq]	8,25E+03	2,80E+02	0,00E+00	5,32E+03	6,57E+02
Feinstaubbildung	[kg PM _{2,5} -eq]	2,91E+02	1,68E+01	8,91E+02	3,44E+04	1,82E+01
Photochemische Ozonbildung (Mensch)	[kg NO _x -eq]	3,58E+02	6,72E+01	0,00E+00	3,00E+05	1,58E+01
Photochemische Ozonbildung (Land)	[kg NO _x -eq]	3,67E+02	6,92E+01	0,00E+00	2,99E+05	1,80E+01
Toxizität (krebserregend)	[1,4-DCB eq,]	1,29E+04	2,91E+02	0,00E+00	1,82E+04	5,15E+02
Toxizität (nicht krebserregend)	[1,4-DCB eq,]	1,41E+05	5,38E+03	0,00E+00	1,33E+05	1,01E+04
Toxizität (Land)	[1,4-DCB eq,]	3,36E+05	5,29E+04	0,00E+00	2,82E+05	2,18E+04
Toxizität (Süßwasser)	[1,4-DCB eq,]	1,04E+04	1,93E+02	0,00E+00	1,04E+04	4,53E+02
Toxizität (Meerwasser)	[1,4-DCB eq,]	1,31E+04	2,80E+02	0,00E+00	1,24E+04	5,99E+02
Wasserverbrauch	[m ³ H ₂ O consumed]	8,84E+02	1,31E+01	0,00E+00	6,79E+02	2,10E+01
Übersäuerung	[kg SO ₂ -eq]	6,11E+02	4,88E+01	3,12E+03	1,16E+05	2,28E+01
Landnutzung & Transformation	[m ² -annual crop eq]	3,74E+03	1,74E+02	0,00E+00	2,78E+03	9,87E+01
Süßwasser-Eutrophierung	[kg P-eq, to freshwater]	5,19E+01	1,80E+00	0,00E+00	3,83E+01	7,39E+00
Meerwasser-Eutrophierung	[kg N-eq to marine water]	7,16E+00	3,32E-01	3,58E+00	1,15E+04	7,23E-01
Mineralienverbrauch	[kg Cu-eq]	1,45E+03	9,41E+01	0,00E+00	2,22E+03	8,09E+01
Verbrauch fossiler Ressourcen	[kg oil-eq]	3,77E+04	3,58E+03	1,80E+07	2,66E+04	5,07E+03

Tabelle A-34: Normalisierte und gewichtete Midpoint Indikatoren, Endpoints und Single Score (Kabine +25) Sitze – Funktionelle Einheit: Gesamter Lebenszyklus Kabine

Midpoint Indikator	Rohstoffabbau	Produktion Kabine und Transport	Produktion Treibstoff	Betriebsphase	Recycling und Entsorgung
Klimawandel	7,91E+03	5,72E+02	5,99E+05	2,16E+07	3,74E+02
Ozonabbau	2,53E+02	1,33E+01	0,00E+00	5,49E+05	1,55E+01
Ionisierende Strahlung	6,88E+03	2,33E+02	0,00E+00	4,43E+03	5,48E+02
Feinstaubbildung	4,55E+03	2,63E+02	1,39E+04	5,25E+05	2,84E+02
Photochemische Ozonbildung (Mensch)	7,23E+03	1,36E+03	0,00E+00	5,94E+06	3,20E+02
Photochemische Ozonbildung (Land)	8,47E+03	1,60E+03	0,00E+00	6,74E+06	4,16E+02
Toxizität (krebserregend)	4,99E+05	1,13E+04	0,00E+00	7,06E+05	2,00E+04
Toxizität (nicht krebserregend)	6,19E+04	2,36E+03	0,00E+00	5,83E+04	4,41E+03
Toxizität (Land)	2,21E+03	3,49E+02	0,00E+00	1,86E+03	1,44E+02
Toxizität (Süßwasser)	1,65E+05	3,06E+03	0,00E+00	1,66E+05	7,20E+03
Toxizität (Meerwasser)	1,21E+05	2,57E+03	0,00E+00	1,14E+05	5,52E+03
Wasserverbrauch	6,14E-02	9,10E-04	0,00E+00	4,71E-02	1,46E-03
Übersäuerung	6,16E+03	4,92E+02	3,14E+04	1,14E+06	2,29E+02
Landnutzung & Transformation	2,14E+01	9,91E-01	0,00E+00	1,58E+01	5,63E-01
Süßwasser-Eutrophierung	2,84E+04	9,86E+02	0,00E+00	2,10E+04	4,05E+03
Meerwasser-Eutrophierung	7,95E+02	3,69E+01	3,98E+02	1,25E+06	8,03E+01
Mineralienverbrauch	1,34E-09	8,71E-11	0,00E+00	2,05E-09	7,48E-11
Verbrauch fossiler Ressourcen	9,05E+03	8,59E+02	4,32E+06	6,38E+03	1,22E+03
Endpoint Indikatoren					
Menschliche Gesundheit	3,96E-01	2,30E-02	4,15E+00	1,59E+02	2,21E-01
Ökosystem	6,94E-04	5,40E-05	1,15E-02	4,37E-01	3,42E-04
Ressourcenverfügbarkeit	8,65E+03	1,48E+03	2,97E-07	6,10E+03	1,87E+04
Single Scores					
Single Score	9,29E+05	2,60E+04	4,97E+06	3,88E+07	4,48E+04

A.13 Dokumentation zur Evaluation

A.13.1 Transkripte der Experteninterviews

F1 Inwieweit sehen Sie das beschriebene Prozessmodell als geeignetes Vorgehen für die Integration von Zulieferern?

E1_{F1} Ja, ich denke schon. Zum einen muss man auch berücksichtigen, dass der direkte Zulieferer auch wir als Flugzeughersteller selbst sein können, gerade wenn wir in den „Build-to-Print“ Bereich gehen. Dann kann der Flugzeughersteller auch am Ende der Zulieferer für ein Kabinenbauteil sein. Aber ich denke, das ist hier auch unabhängig davon, wo hier das Schaubild gezeichnet ist. Insofern ja, das genau zu beschreiben welcher Zulieferer oder Teilnehmer an diesem Prozess zu machen hat, ist aus meiner Sicht genau der richtige Weg.

E2_{F1} Ja, in meinen Augen ist das Prozessmodell auf jeden Fall geeignet. Wichtig ist eben tatsächlich, dass man zur Einbindung von Zuliefererdaten ein definiertes, standardisiertes Vorgehen hat. Wie man eben konsolidiert und auch vergleichbar die Daten sammelt und auch welche Teilhaber oder Stakeholder da entsprechend für welchen Schritt verantwortlich und involviert sind. So gesehen glaube ich, macht es absolut Sinn, dass man diese verschiedenen Schritte und die Datenerhebungen in Prozessschritten systematisch erfasst und zuordnet. Und ich glaube, dass dieses Vorgehen und die Darstellung auf jeden Fall dafür geeignet sind.

E3_{F1} Also so wie es im Moment dargestellt ist, ist es auf jeden Fall geeignet zur Integration der Zuliefererdaten. Das, was sich natürlich auch noch dahinter verbirgt, das sind die Ebenen der Kontrakte und Verträge. Aber das spielt ja jetzt hier im Prozessmodell nicht die Rolle. Wichtig ist, dass man eben auch die Regeln hat dann dahinter: Wie werden die Daten vereinnahmt, dass alles auch relativ gleich gemacht wird und sichergestellt wird, dass Zulieferer 1 nicht anders als Zulieferer 2 behandelt wird. Von daher ahne ich, dass einfach in sämtlichen Schritten dann noch eventuell tieferliegende Momente sind, was genau wird als Daten abverlangt von den jeweiligen Herstellern, um dort eine Gleichheit zu gewährleisten. Es kommt was rein von denen und es geht am Ende des Tages auch wieder was zurück. Das finde ich das Wichtige, da das auch etwas mehr in dieses partnerschaftliche Vorgehen ausmachen wird, wenn es genau um den Austausch von Daten geht.

F2 Inwiefern kann das Prozessmodell zu einer besseren Datenbasis beitragen?

E1_{F2} Für mich ist das Prozessmodell erstmal da, um ein grundsätzliches Verständnis zu schaffen. Auch beim Zulieferer, warum er was liefern soll oder wofür wir das brauchen und wie das im Gesamtprozess integriert ist. Aber die konkrete Umsetzung, da reicht ja das Prozessmodell nicht. Damit sind konkrete Fragestellungen verknüpft: Wie ist die Vertragsgrundlage? Was müssen wir ändern in dem Verhältnis zu den Zulieferern, um die Basis zu schaffen, dass die Zulieferer aktiv werden? Das bedeutet am Ende Aufwand den zusätzlichen

Prozess zu bedienen, Daten zusammenzustellen, vielleicht eigene Berechnungen zu machen, das in ein Format zu kippen und das dem Flugzeughersteller wieder zurückzugeben. Dann kann das hier ein Vertragsbestandteil sein, sodass man sagt, der verpflichtet entsprechend dieses Prozesses mit uns zusammenzuhalten, und insofern darauf basierend haben die Zulieferer die und die Aktion zu machen. So würde ich das verstehen.

E2_{F2} Also, das hilft definitiv für das Thema Datenbasis und Datenverfügbarkeit, weil eben ganz klar beschrieben ist, welcher Stakeholder für welche Daten verantwortlich ist. Und das ist die Grundvoraussetzung, dass wir als Flugzeughersteller auch über unsere Spezifikationen oder Verträge diese Verfügbarkeit an Daten auch genau definieren können. Und ja, so gesehen hilft das definitiv dann zur Datenverfügbarkeit, weil, wie gesagt, die Datenverfügbarkeit müssen wir am Ende über entsprechende Anforderungen, über entsprechende Verträge, aber sicher auch über entsprechende Standards einfordern und auch definieren. So gesehen auch hier wieder ganz klar, das hilft auf jeden Fall.

E3_{F2} Das geht eben auch wieder in die Richtung, was ich gerade angedeutet habe, dass wenn ich Regeln habe zur Datenerhebung: Das heißt welche Daten, mit welcher „Maturity“, wie es in Neudeutsch heißt, gesammelt werden, kann ich es natürlich schaffen, dort eine Gleichheit auch zu gewährleisten. Interessant ist dann im nächsten Moment, die Daten und die Datenbanken dahinter. Aktuell haben wir ein unglaubliches Sammelsurium von unterschiedlichen Datenformaten, Datendarstellung, Datentiefe. Sei es im Haus oder eben auch auf der Herstellerseite, dass es danach auch eher interessant wird, wie danach diese Daten verwaltet werden. Sie einfach nur abzuverlangen und dann so, „One-Off“ eine Analyse zu machen, das ist eine Sache. Aber wie lege ich systematisch genau diese Daten ab, um dann auch sicherzustellen, dass es reproduzierbar ist, dass wenn Änderungen in der Lieferkette erfolgen, diese Änderungen dann auch durchkaskadiert werden. Nur als ein Beispiel: Wenn jetzt wieder irgendwelche „Reach-Änderungen“ kommen und sich auf einmal Untermaterialien ändern, muss ich ja auch sicherstellen, dass ich eine saubere Verknüpfung der Datenpunkte habe, um auch herauszufinden, was muss ich eventuell noch mal anpassen oder was nicht? Auf der einen Seite hört es sich eigentlich immer recht einfach an, Daten zu vereinnahmen, das ist wie so eine Einbahnstraße, aber ich muss eben auch das System dahinter aufstellen, dass ich diese Daten auch, wenn es denn wirtschaftlich notwendig und gewollt ist, up-to-date halte. Und das Interessante gerade bei der Produktgröße, die wir einfach haben, wenn wir mal außerhalb der Kabine denken, ist das auch die Herausforderung, mit der wir einfach zu tun haben.

F3 Wie bewerten Sie die Fokussierung auf direkte Zulieferer und die ausschließlich optionale Einbindung von indirekten Zulieferern (Tier-n)?

E1_{F3} Zum ersten Schritt würde ich sagen, unser direkter Ansprechpartner ist der direkte Zulieferer. Ich würde das in den Anforderungen, Spezifikationen und Verträgen so beschreiben, dass ich vom direkten Zulieferer erwarte, dass die Sachbilanz oder was auch immer ich als Ergebnis entweder die Rohdaten zusammengestellt oder schon eine durchgeführten LCA bekomme, dass die Daten den Qualitätsansprüchen genügen. Und ob der Zulieferer dann

sagt: Ich habe das auf dieser Basis gemacht, ich habe selbst die entsprechenden Daten oder ich habe verlässliche Datenbanken, mit denen ich das abdecken kann. Oder er sagt, um das machen zu können muss ich zwingend meine Sub-Lieferanten abfragen und von denen einen ähnlichen Prozess wieder etablieren, wie der Flugzeughersteller das mit dem direkten Supplier hat. Das ist dann im Einzelfall zu klären, würde ich dann aber dem Zulieferer überlassen. Wichtig ist, dass unsere Anforderungen beschrieben sind. So läuft es auch generell mit unseren technischen Spezifikationen oder wenn man an das Lieferkettengesetz denkt. Es geht dann auch in die Richtung, dass wir den Supplier in die Pflicht nehmen zu sagen: Achte auch auf die Randbedingungen, die deine Sub-Lieferanten haben, du bist dafür verantwortlich das sicherzustellen.

E2_{F3} Also ich glaube auch, dass für den ersten Schritt die Fokussierung auf den First-Tier-Supplier absolut Sinn macht, weil wir dieses ganze Thema der Ökobilanzierung überhaupt erst mal beginnen. Und da sind die First-Tier-Supplier, mit denen wir noch den direkten Vertrag haben, natürlich der erste Schritt, um es überhaupt erstmal zum Laufen zu kriegen. Ich denke, dass man nach und nach die Tier-n-Supplier dort mit einbringen muss, gerade eben auch Materiallieferanten. Und dass das eben nach und nach immer weiter runter gebrochen wird, aber dann wahrscheinlich auch über die First-Tier-Supplier, dass sie sozusagen in der Verantwortung stehen auch bei Ihnen diese Kette abzubilden. Wichtig ist, wenn man genauer wird, dass wir eben keine Verfälschung der Ergebnisse haben. Also da muss man auf jeden Fall auch noch mal schauen, dass man jetzt diesen ersten Schritt so setzt, dass eine weitere Verfeinerung nicht am Ende die Ergebnisse zu stark verfälscht. So gesehen ist da der entsprechende Kontext und Rahmen, den man dafür setzt, auch wichtig. Aber als erster Schritt ist ein pragmatischer und auch umsetzbarer Ansatz in einer relativ kurzen Zeit mit überschaubaren oder zu bewerkstellenden Mitteln absolut sinnvoll.

E3_{F3} Ich glaube auch einfach, dass man hier eigentlich die Prozesse auch weiter mitberücksichtigen sollte, wo wir auch eine wirtschaftliche Seite haben oder kontraktuelle Seite. Wir haben einen direkten Link zu unserer Tier-1. Wenn ich jetzt wirklich auch anfangen würde, in die Kette reinzugehen, Tier-2 und weiter, birgt es auch, finde ich, auch die Gefahr von unabgestimmter Kommunikation, unabgestimmten Datenaustausch. Ich glaube, das ist auch ein Risiko, das darf man gar nicht außer Acht lassen, weil im Endeffekt ist, auch mein Tier-1, agiert das als eigenständiges Unternehmen, hat seine eigenen Regeln und Prozesse, wie er seine Unterlieferanten aussucht oder die Materialien dahinter. Die sind selbst mit ihren eigenen Einkaufsabteilungen und mit ihren eigenen Kommunikationswegen. Das, was ich in der Vergangenheit oft auch hatte, jetzt unabhängig von diesen Themen, wo wir von anderen Themen reden: Von einem Semi-finished-Parts-Hersteller fliegt eine Firma in die Luft. Das ist immer eine interessante Kette der News. Man versucht zu ergründen, wo ist dann welcher Impact auf dem Bauteil? Und da hat es sich einfach in der Vergangenheit gezeigt, wenn ich einen Ansprechpartner habe, der dann seine Kette auch gut im Auge hat, hilft es mir, als wenn ich jetzt wirklich dieses weltweite Konstrukt von Zulieferern ansprechen muss. Und das gegebenenfalls noch verschlimmbessert durch vielleicht schlecht gesteuerte Kommunikation und Datenerhebung. Von daher finde ich, es geht es komplett einher in der gängigen Praxis, wie wir aktuell mit unserer Zuliefererlandschaft umgehen.

Wir haben ähnliches auch in den Delegationsszenarien, wo man einfach den Tier-1 dann auch sagt „Da hast du auch die Verantwortung für die darunterliegenden Zulieferer. Wenn der was schief läuft, kommen wir zuerst zu dir.“

F4 Für wie wichtig erachten Sie einen hohen Standardisierungsgrad bei dem beschriebenen Prozessmodell?

E1_{F4} Ja, genau. Also insofern, um eine Verlässlichkeit, eine Vergleichbarkeit der Ergebnisse von verschiedenen Zulieferern zu bekommen, ist das aus meiner Sicht der kritischste Punkt: Wirklich sauber die Vorgehensweise zu beschreiben, zu standardisieren, in welcher Form auch immer das niedergeschrieben ist. Ob das dann ein offizieller Standard wird, ob das in entsprechenden Spezifikationen beschrieben ist. Aber letzten Endes müssen die Randbedingungen relativ klar beschrieben werden, vor allem wenn wir in die Richtung denken, bei einigen Zulieferern kriegen wir vielleicht schon Ergebnisse, bei anderen Sachen kriegen wir nur Rohdaten und machen das dann selbst. Wir müssen das sicherstellen, dass, wenn wir das machen, das in der gleichen Weise gemacht wird, wie es ein Zulieferer machen würde.

E2_{F4} Standardisierung entlang des Prozesses, auch in dem entsprechenden Detailgrad, ist essenziell. Ohne allgemeingültige Standards, die dann eben auch für alle gelten, werden wir hier, gerade wenn wir uns den Bereich Kabine anschauen, große Schwierigkeiten haben, die Daten auch zu aggregieren und zusammenzuführen, weil wir einfach nicht vergleichbare Ergebnisse bekommen. Und gerade da, wo wir auch verschiedene Part-Nummern haben, verschiedene Hersteller, die eben auch als Konkurrenz zueinander sind, ist eben dieses Thema Standard, absolut essenziell. Aber auch natürlich, um sicherzustellen, dass wir hier kein „Greenwashing“ betreiben, ist ein Standard essenziell. Wir müssen hier uns auch nach außen hin absichern, dass wir hier eben auch wissenschaftlich und entsprechend der übergreifenden direktiven LCA oder Ökobilanzierung machen, um uns da auch entsprechend abzusichern. Also so gesehen, aus verschiedenen Gründen ist ein Standard eben auch tatsächlich runtergebrochen in diese Prozessschritte, wie hier beschrieben, absolut essenziell.

E3_{F4} Unabdingbar. Und zum Glück ja auch erkennbar, wie sich auch mehr und mehr Gruppen formieren rund um dieses Thema. Jetzt will ich mal, wie ein Helikopter mal nach oben fliegt, was habe ich auf Seite der Regularien: Was schwebt vor mir? ESDP heißt es doch - Eco-Design-Direktive, die dann Hand in Hand geht mit einer Green-Claims-Direktive. Das heißt, wo geguckt wird, dass ich gegebenenfalls „Third-Party-Validation“ habe, um sicherzustellen, dass ich nicht einem Kunden etwas suggeriere, was er dann nicht wirklich bekommt. Hand in Hand in Diskussion mit „PEF und Co.“ zeigt es ja eindeutig die richtige Richtung in das Thema Standardisierung. Wir haben auch beispielsweise die ersten Arbeitsgruppen von der IAEG. Die ebenfalls sich zum Thema gemacht hat, wie so eine Art Sammelstelle zu fungieren und zu gucken, was in den unterschiedlichen Ebenen, sei auf ISO-Ebene, gemacht wird. Hinsichtlich Metriken, Datenerhebung und dann alles auch gesund zusammenzuziehen. Ohne Standardisierung kommen wir in einen Dschungel, wo ich dann

nicht mehr gut vergleichen kann, wo es mir schwerfallen wird, auch Einschätzungen zu geben, und wo ich eine ganz, ganz große Gefahr sehe, dass ich in irgendwelchen Greenwashing Fallen mich verstricke. Und das ist auch das, was ich bei uns aktuell schon sehe. Der Einkauf ist oft sehr viel schneller unterwegs, weil sie natürlich auch die Notwendigkeit haben mit den Katalogen, um Kunden darzustellen, was sie einbauen können, ohne dass wir den großen Impact haben, auf Produktion und Co. Ich meine, das ist ja ein großes Thema dahinter. Produktion oder Katalog heißt, ich gebe etwas vor, von dem ich weiß, dass es meinen „Produktions-Set-Up“ nicht torpediert. Und genau da müssen wir aufpassen, dass wir Kataloge so gestalten, dass sie fair sind. Ich darf ja nicht in den Markt eingreifen, sondern ich muss irgendwie sicherstellen, dass ich eine Messlatte vielleicht auch setze, weil ich habe vielleicht Dekarbonisierungsziele, aber diese muss gleich anwendbar sein, und es geht nicht ohne Standardisierung. Das hast du in anderen Bereichen der Luftfahrt auch. Also, ganz ähnliches, hochrelevantes Thema ist die Sicherheit, z.B. Fire-Safety und auch dort haben wir es nur geschafft durch gleiche Regeln und durch viel Kommunikation „Wie wird etwas gemacht?“ Quasi mal wirklich eine Messlatte hochzulegen, dass alle das gleich machen und das auch eine Bewertbarkeit dadurch dann auch einfacher fällt, und auch eine Diskussion, wenn sie denn ansteht. Also, es geht gar nichts ohne Standardisierung. Dazu aber auch einen Nachtrag: Standardisierung nicht um jeden Preis. Also das Interessante sollte werden, Komplexität und Standardisierung unter einen Hut zu kriegen. Und das finde ich manchmal, fehlt etwas. Bei Standardisierung hast du oft, und jetzt nicht falsch verstehen, eine sehr wissenschaftliche Brille. Aber um es dann in dieses Business zu übersetzen. Also wirklich der pragmatische Weg der Standardisierung. Das wird glaube ich noch etwas, die Herausforderung werden. Wir haben viele Leute, die sich mit dem Thema auseinandersetzen, die sehr, sehr tief detailliert unterwegs sind, die dann aber auch oft das Fingerspitzengefühl für wirtschaftliche Notwendigkeiten in dem Moment nicht haben. Das ist das auch mit dieser Datenerhebung. Ich muss einen smarten Weg finden, der mich nicht unbedingt zu einem sehr teuren Produkt führt. Und das wird die Herausforderung, denn im Moment verstrecken wir uns in immer mehr Komplexität. In Masse und man muss hinkommen zur Datenklasse, die ich gut aus einem System rausziehen kann, und dann wieder das System befeuern kann. Ohne wirklich immense Mehrkosten zu haben.

F5 Welche Voraussetzungen müssen erfüllt sein, um das Prozessmodell zu implementieren?

- E1_{F5}** Die größte Voraussetzung und wichtigste Hürde ist eine Vereinbarung mit der großen Supplier-Landschaft, die wir haben. Zu vereinbaren, dass wir entweder vertraglich oder im Rahmen einer Spezifikation oder vielleicht kann man das auf freiwilliger Basis machen und sagen, dass irgendwann haben alle verstanden, dass das wichtig ist und wir kriegen die Daten sowieso, weil sie im Rahmen eines Arbeitskreises alle vertreten sind und die dann liefern. Das muss sichergestellt sein. Wenn ich allerdings sehe, wie manche Diskussionen mit einigen Suppliern laufen, die dann vielleicht ein wenig unwillig sind gewisse Dinge zu liefern. Damit steht und fällt, ob ich den Prozess so umgesetzt kriege oder nicht.
- E2_{F5}** Eine wichtige Voraussetzung ist, dass die entsprechenden Stakeholder, die eben hier entlang dieser Prozessschritte Daten liefern sollen, genau wissen, was sie liefern sollen. Dass

das Detaillevel klar ist, dass die Art und Weise der Bearbeitung der Daten klar ist, auch Vorgaben und Muster vorbereitet werden, dass eben die Qualität und Genauigkeit der Daten tatsächlich vergleichbar und auch harmonisiert ist. Das ist das erste. Das andere ist natürlich, um sowas umzusetzen, müssen wir eben die entsprechenden Requirements formulieren. Das heißt, wir müssen das in die Verträge reinbekommen und dann eben sicherstellen, dass wir diese Daten auch tatsächlich abverlangen können. Dann müssen wir in der Lage sein, die Daten, die zur Verfügung gestellt werden, auch überhaupt zu bewerten und zu verarbeiten. Das heißt, wir müssen nicht nur intern bei uns als Flugzeughersteller die entsprechenden Tools haben, mit diesen Daten umzugehen, wir müssen natürlich auch die Kompetenzen und Möglichkeiten haben. Und zwar nicht nur in dem Umweltdienst oder Umwelt-Focal Points, wie wir es vielleicht sind, sondern tatsächlich in allen Entwicklungsabteilungen, die dann entsprechend dieses Bauteil entwickeln, müssen wir die Möglichkeiten schaffen, dass mit diesen Daten auch umgegangen werden kann und auch die entsprechenden Maßnahmen und Bewertungen gemacht werden. Zum Beispiel zum entsprechenden Design-Meilenstein. Es geht nicht nur darum, dass die Daten zum richtigen Zeitpunkt im richtigen Format verfügbar sind, sondern natürlich auch, dass wir sowohl beim Lieferanten als auch bei uns, als Kunde dieser Daten auch die entsprechenden inhaltlichen Möglichkeiten und Skills schaffen: Also dementsprechend die richtigen Tools, aber auch die entsprechenden Kompetenzen trainieren.

E3_{F5} Ich muss mehrere Seiten bei diesem Modell durchleuchten. Erst mal ganz wichtig am Ende des Tages: Wer will diese Daten auch wirklich haben und kann auch was damit anfangen? Das heißt nur des Datenerhebens Willens das aufzusetzen bringt mir ja nichts. Ich muss den Anwender der Resultate finden und mir auch hier die Prozesse angucken. Wo kann ich denn den Anwender in unserem Fall, wir diskutieren ja viel, ich möchte gerne Customer-Guidance etwas besser gestalten, dass ein Kunde, die Auswahlmöglichkeiten hat und auch das bessere Verständnis, wie er das Produkt nutzt, um einen kleineren Fußabdruck zu generieren. Das heißt, da muss ich einfach auch sicherstellen, dass die Umsetzung, dass ich die gleiche Sprache spreche. Ich komme nämlich von, wenn wir hier diskutieren, ich komme aus einem hochwissenschaftlichen, hochkomplexen, also bei uns dann auch Expertensicht, und treffen auf Nicht-Experten. Und dann diese Transferleistung auch hinzubekommen, ich glaube, das ist das, was dieses Konstrukt am Leben erhalten wird. Wenn ich es schaffe es sauber zu übersetzen und wie der eine oder andere Datensatz das Konglomerat aus mehreren Lebenszyklusanalysen der Kabinenbauteile ein Gesamtbild meiner Kabinen macht und mir dann eben auch aufzeigen kann: „Und hier sind deine Regler, die du hast. und die du selber mitentscheidest, weil du bist derjenige, du Kunde. Du sagst „Ich nehme jetzt: wie viel Abstand haben meine Sitze, wie viele Menschen passen wirklich in mein Flugzeug rein, oder wie stelle ich dann mittlerweile, weil meine Küche, brauche ich wirklich die ganzen Kaffeemaschinen, brauche ich alles an Wasser, wie gehe ich mit meinem Abfall am Ende des Tages um?“. Wenn wir es nicht schaffen, diese Transferleistung für den finalen Kunden hinzubekommen. Dann birgt es die Gefahr, dass wir zu komplex unterwegs sind. Das ist die eine Seite, das ist hinten quasi: Das Handling meiner Ergebnisse. So, jetzt kommen wir noch zu der Anfangsseite, und das ist auch wiederum, dass wir es in der Luftfahrt gerade bei uns sehr interessant ist. Will ich jetzt heute anfangen alles für

ein neues Flugzeugprogramm zu sammeln und aufzubauen, bin ich recht einfach unterwegs. Dann schaffe ich das. Ich kann gleich von vorne meine Verträge so bauen, dass ich Zugang zu allen Daten bekomme, und ich kann mir ein Datenkonstrukt aufbauen. Wir haben aber Produkte, wo wir genau diese Kunden Guidance extrem brauchen, aber das sind die alten Produkte. Und da wird es umso interessanter werden: Wie schaffe ich eine Datenbasis, hinter der auch jeder steht und sich wiederfindet? Weil wenn ich im ersten Moment sage, ich muss jetzt alle Daten für alle Produkte aufsammeln, da kommen wir jetzt in die wirtschaftliche Seite, wird gesagt werden: „Nö, kriegst du nicht, weil das war nicht von vornerein vereinbart - Oh willst du haben? Kostet es dich so und so viel.“ Also in diesen „Running-Mode“ zu kommen, grad auf den Altprodukten. Das wird noch eine Herausforderung werden. Oder wir starten einen smarten Weg, wie wir auch wirklich „Assumption-based-Data“ am Anfang für Altprogramme, aber eben „Mature-Assumption-based“, wie wir uns dahin bewegen können. Aber auch da brauchen wir Regeln. Da braucht jeder, jeder der Bauteilverantwortung hat, muss ich dem quasi an die Hand gehen und das sind die Daten, die ich von dir brauche, und das nochmal bitte bei allen gleich. Und da sind wir wieder bei dem Punkt Data-Handling. Also das wird spannend. Generell ist es machbar, aber es auch braucht einige Stellgrößen Drumherum.

F6 Wie schätzen Sie die Bereitschaft der Zulieferer hinsichtlich der Umsetzung ein?

E1_{F6} Da ich in diesen Projekten, Arbeitskreisen und Meetings nicht direkt dabei bin, tue ich mich jetzt schwer diese Frage zu beantworten, das können die Kollegen besser beantworten. Aber was ich so mitbekommen habe, ist grundsätzlich das Verständnis schon da, dass über kurz oder lang diese Transparenz, die ja der Flugzeughersteller sich auf die Fahnen geschrieben hat, dass die generell erforderlich ist, dass sie vielleicht gesetzlich irgendwo eingefordert wird. Die grundsätzliche Bereitschaft ist da, aber es ist abhängig vom Supplier. Einige, die für sich schon ambitionierten Ziele gesetzt haben, was Umweltbilanzen angeht, die sind dann sicherlich offener und es gibt eben auch Supplier, was ich so mitbekommen habe, die tun sich damit ein bisschen schwer.

E2_{F6} Aus bisherigen Gesprächen haben wir gelernt, dass die Zulieferer durchaus noch Interesse haben, das mit umzusetzen und zu unterstützen. Aber das große Problem wird natürlich sein, wie aufwändig und auch kostenintensiv das Ganze ist. Also erstmal grundsätzliche Offenheit für das Thema, aber natürlich immer unter der Prämisse, dass das entweder möglichst wenig oder gar nichts kostet oder die Kosten nicht von ihnen selbst getragen werden müssen und eben auch nicht zu ihrem Nachteil ist. Und das sind, glaube ich, die schwierigen Punkte, wenn es dann am Ende doch dazu kommt, dass es zusätzliche Aufwände beim Supplier beinhaltet oder diese erhöhte Transparenz dazu führt, was vielleicht auch die ein oder andere Entscheidung gegen ein Produkt oder ein Supplier gefällt wird. Dann sieht das Ganze wieder ein bisschen schwieriger aus. Umso wichtiger sind eigentlich auch hier 2-3 Aspekte, die wir zum Teil auch schon vorher gesagt haben. Zum einen, wir müssen eben pragmatische, möglichst geringschwellige oder einfache Ansätze wählen, um diese Daten einzubinden. Das zweite ist, was wir auch schon gesagt haben, wir brauchen eben konsistente, harmonisierte Prozesse, ganz klare Beschreibungen: welche Daten

brauchen wir, was passiert am Ende mit den Daten, wofür diese Prozesskette? Wie du es ja dargelegt hast, eben genau aufzeigen und natürlich die vertragliche Vereinbarung. Was sicherlich auch noch wichtig ist, dass man einerseits auch das Ganze attraktiv für Zulieferer macht. Also, was ist ihr Vorteil, wenn sie eben daran mitwirken? Nicht nur über die vertragliche Seite drohen, sondern hier auch eine gewisse „Win-Win Situationen“ herbeirufen. Zum Beispiel, dass man Innovationen, auch deren Verbesserungen, besser darstellen kann. Dass man eben auch Optimierungen durchführen kann, also verschiedene Parameter gemeinsam balancieren, um dann eben das Gesamtoptimum zu finden und eben sich gemeinsam als Luftfahrt zu rüsten gegenüber zusätzlichen Regularien. Einerseits, wie gesagt, möglichst pragmatisch. Das nächste ist wirklich standardisiert harmonisiert. Das dritte ist, dass man schaut: Wie kann man die Supplier auch so abholen, dass sie auch am Ende von der Ökobilanzierung ihren Nutzen ziehen können?

E3_{F6} Ich glaube, am Anfang wird sehr viel „Hähsitzenz“ da sein und die werden sagen „Nee, ich möchte es nicht mit dir teilen.“ Ich glaube, in dem Moment, wo man aber nochmal aufzeigt wie man sich gemeinsam weiterentwickeln kann und wie man sich auch gewinnbringend Bälle zuspielen kann, werden wir die Hersteller mit auf die Reise nehmen. Wir haben im Moment noch keine Regeln, quasi eine Regularie die uns sagt „Du darfst und musst das von deiner Supplychain einfordern“. Wir sind hier gerade in dem Bereich des luftleeren Raums gefühlt. Ich habe noch keine wirkliche Regel, die ich erfüllen muss. Wo es heißt, du brauchst 100 Prozent auf Daten, auf Materialien, auf Prozesse, um eine Lebenszyklusanalyse für jedes Produkt, was du auslieferst, zu machen. Das haben wir noch nicht. Das heißt, ich bewege mich langsam dahin, um mich auch an einen Messbarkeits-Korridor langsam zu bewegen. Weil auch das: Wenn ich auch später mir Ziele setze. Das schnelle Beispiel ist: Ich will irgendwann mehr Recycled-Content haben. Um das als Ziel in einer Spezifikation gegenüber einem Supplier oder auch bei unseren eigenen Bauteilen zusetzen, muss ich erstmal wissen, was ist der Status quo, damit ich sagen kann „Du musst so und so springen.“ Ich kann aber nicht von vornerein sagen, ich wünsche mir jetzt was. Das geht nicht, ich finde es keine gute Praxis. Weil ich muss erstmal sagen, wo stehe ich überhaupt. Ich habe das Gefühl, es würde uns etwas in die Karten spielen, dass du eben diese Reporting-Notwendigkeiten hast. So wie der Flugzeughersteller ja selber auch schon, CSRD, wo wir ja auch schon länger dieses Non-Financial-Reporting recht intensiv betreiben. Ist es ja auch so, dass viele unserer Zulieferer mittlerweile auch eine Größe haben, einen Umsatz haben, in einem ähnlichen Bereich kommen. Mehr und mehr müssen sich die Firmen aufstellen, um ihren Reporting-Notwendigkeiten gerecht zu werden. Das heißt auch dort mit den sauberen Standards, mit den sauberen Erhebungsmethoden spielen wir mehr und mehr alles zusammen. Mehr Fäden werden zusammengeführt. Damit auch sichergestellt wird, dass das, was jemand in seinen Scope-3 Emissionen berichtet, dass es matched mit dem, was der andere vielleicht in seinem Scope-1 darstellt. Aber auch das, das ist diese Transition-Phase. Von daher, ich glaube am Anfang ziemlich viel Sand im Betrieb und ziemlich viele Steine in den Speichen. Aber langfristig für alle glaube ich, kriege ich zumindest schon mit bei der Diskussion mit unseren Zulieferern. Der Weg, wo langfristig alle hin müssen, ist klar. Das Wie ist noch sehr in der Diskussion. Wieder getrieben von Aufwand, von Geld.

F7 Welche Voraussetzungen müssen vorhanden sein, um eine hohe Bereitschaft aller Stakeholder zu erreichen?

E1_{F7} Da sind wir an der gleichen Fragestellung wie bei „Track und Trace und End of Life“, wo das vielleicht noch ein bisschen schwieriger ist. Wenn am Ende eine gesetzliche Vorgabe kommt oder absehbar ist, dann gibt es keine Frage mehr, dann muss das gemacht werden. Andererseits, wenn das einen wirtschaftlichen Vorteil für den Supplier bringt, dann ist die Bereitschaft sicherlich auch sehr hoch und ansonsten ist es letzten Endes die Frage, wie die eigene Einstellung der Supplier zu dem Thema ist. Was die sagen, also der Flugzeughersteller gibt da Ziele vor, Airlines fragen auch nach dem Thema. Ich glaube, das ist mit auch ein Punkt, der wichtig ist, also wir erleben auch, dass Airlines diese Dinge nachfragen und das ist natürlich auch ein Punkt für Motivation für den Supplier zu sagen: Am Ende konfiguriert die Airline die Kabine und wenn da von einem Supplier eine Unwilligkeit herrscht, die Ökobilanz offen zu legen, dann sagt die Airline vielleicht: Was hat der denn zu verbergen, ich will auch in Richtung Nachhaltigkeit gehen, dann suche ich mir eben ein anderes Equipment aus, wo der Supplier die Daten zur Verfügung stellt.

E2_{F7} Das war auch schon die vorherige Antwort. Ja, ganz entscheidend ist, weil du jetzt Stakeholder sagst und nicht First-Tier-Supplier. Mit denen wir ja dann direkte Verträge haben; Stakeholder sind auch zum Teil Bereiche, mit denen wir keine direkten Verträge haben. Und hier ist es eben wichtig, wie bekommen wir da die Bereitstellung von Daten zugesichert, dass man über Regularien, über Standards, das auch sicherstellen. Wie gesagt, gerade da, wo wir eben nicht diese direkten Verträge haben, muss man auch bei anderen Zulieferern, wie zum Beispiel Recycler und Dismantler, schauen, wie man an die entsprechenden Daten kommt. Das wird sicherlich noch ein bisschen schwieriger sein als mit den First-Tier-Suppliern. Aber grundsätzlich gelten die Punkte generell bei den Stakeholdern.

E3_{F7} Das, was sich mehr und mehr widerspiegelt, finde ich, in den Diskussionen, ist wirklich diese Vernetztheit. Dass ich Systeme habe, wo wir miteinander reden können und die von A bis Z einfach durchgehen. Da erkenne ich gerade einen ziemlich großen Push in die Richtung. Gerade wenn wir über das Thema MRO und auch Recycling und Entsorger sprechen. Das ist genau das, wo wir gerade noch die größte Unabhängigkeit haben voneinander. Weil im Moment bin ich ja relativ gut darin, Datenerhebung, bis zu dem Moment zu machen, wo das Flugzeug ausgeliefert wird, und unsere Facility verlässt. Dann aber weiter Track zu halten über das Flugzeugleben, über das was dort passiert, was Treiber sind, das kann noch besser werden. Je nach Bauteil ist die Vernetztheit relativ gut. Ich glaube, es hängt auch sehr viel damit zusammen, wie Safety-relevant es ist. Ich glaube schon, dass unsere Kollegen, die mit Triebwerken zu tun haben, sehr, sehr genau wissen, was gerade wo Phase ist. Wo welches Flugzeug ist, wie was gemacht wird, welche Checks anstehen und so weiter. Und da ist die Besonderheit bei dieser sehr kleinteiligen Kabine und auch dieser sehr unterschiedlichen Momente des „Du schmeißt eins raus und baust ein neues Bauteil ein und weil sie unterschiedliche Lebensdauer haben von den jeweiligen Bauteilen“ Und auch es, jetzt nicht verkehrt verstehen, aber auf der MRO-Seite haben mehr Firmen das Recht an einer Kabine rumzuschrauben, als beispielsweise an einem Triebwerk. Und

jetzt auch weil ich unterschiedliche sicherheitsrelevante Momente habe. Aber ich glaube da dieses weltumfassende Netz von Firmen, die an dem Produkt, mit dem Produkt, mit dem Service an dem Produkt ihr tägliches Brot haben. Das wird noch, ist mit dieser ganz großen Digitalisierungsnotwendigkeit, nur da wird es wiederum spannend zu gucken, was mit dem Minimum an Daten, was man austauschen kann und sollte, und wo wird es dann einfach auch zu viel? Also wo ist dann quasi der, wenn du zu viele Daten handelst, ist ja auch die Gefahr, dass du dich in dem Datenschwungel einfach verlierst. Ich glaube, das wird eine der wichtigsten Herausforderungen sein, dass jeder Arbeitsbereich sagen kann: Welche Daten möchte ich gerne tracken, welche Bauteilinformationen möchte ich gerne haben und dann das Gesamtbild zu machen. Ich glaube, das wird die größte Herausforderung sein, weil es in so einem globalumfassenden Netz ist. Ist ja nicht so, dass man ein Produkt hat, was nur auf einem Markt unterwegs ist. Das wäre einfacher.

F8 Wie bewerten Sie den Aufwand für die Umsetzung?

E1_{F8} Diesen Prozess ins Leben zu rufen? Den schätze ich recht hoch ein. Also ich glaube, das ist kein, wenn wir jetzt über unsere interne Mannschaft sprechen, eben kein primäres Engineering-Thema. Sondern da muss man, wie gesagt, über den Einkauf, über die ganze Prozesslandschaft und das Thema „wie kooperieren wir mit Suppliern“ dicke Bretter bohren und einfach kontinuierlich am Ball bleiben, um am Ende zu einer Einigung zu kommen, weil eben die Supplier-Landschaft, wie du es gesagt hast, kleinteilig und zerstreut ist und wir eine sehr große Anzahl an Suppliern haben. Wenn es nur an 5 großen liegt, dann ist es einfacher zu machen, weil die ähnlich ticken als Konzern wie vielleicht wir und sagen „Die Notwendigkeit sehe ich auch, lass uns einen pragmatischen Ansatz finden, wie wir das Schritt für Schritt umsetzen“. Aber wir reden hier über hunderte Supplier und gerade kleinere tun sich vielleicht schwer mit einigen Fragestellungen. Das macht das Ganze relativ langwierig und umständlich.

E2_{F8} Ja, das ist schwer zu sagen. Also, zunächst mal glaube ich, dass es bei allen Stakeholdern eines größeren Aufwands bedarf. Selbst wenn man hier pragmatisch herangeht, muss man die Daten, die größtenteils auch da sind, also eben nur für diese Mittel dann bereitgestellt und verarbeitet werden müssen. Aber trotz allem muss man natürlich hier auch neue Daten, Informationskanäle etablieren. Und auch tatsächlich in allen Stakeholdern dann entsprechend Leute haben, die sich mit diesem Thema grundsätzlich auskennen. So gesehen ist es eben nicht nur die Tätigkeit an sich, sondern eben auch das Thema Ressourcen bei allen Stakeholdern. Das andere ist, dass es eben nicht nur für Neuentwicklungen gilt, sondern dass wir auch rückwirkend die Datenverfügbarkeit sicherstellen müssen, um eben zum Beispiel für komplette Kabinenkonfiguration, um die es hier auch im Wesentlichen geht, im Customization-Prozess auch die Vergleiche anstellen können zu älteren Produktgenerationen. So gesehen ist das schon ein sehr großes Volumen, was wir da stemmen müssen. Das ist schwer zu beziffern, das in Zahlen auszudrücken. Es ist schwer, eine Schätzung abzugeben. Ich will mich da nicht festlegen, aber wir reden hier tatsächlich über signifikante Beträge und über größere Aufgaben, die da vor uns stehen, von wahrscheinlich sogar mehreren Jahren, bis sich das Ganze etabliert. Auf der anderen Seite ist diese

Transparenz einfach alternativlos, weil erstens natürlich immer stärkere Regularien vor uns stehen. Aber zweitens ist es eben wichtig, dass wir auch diese Marktdynamik nutzen durch diese erhöhte Transparenz und drittens, was ich auch tatsächlich als großes Risiko sehe, wenn wir diese Transparenz nicht hätten, dass wir auf falsche Innovationen setzen, dass wir nicht auf die falschen Pferde setzen, weil wir die Ökobilanz unserer Produkte oder des Gesamtflugzeugs verbessern wollen. Und das ist gerade in der Kabine nicht immer ganz so offensichtlich, was da die richtigen Hebel sind, und so gesehen glaube ich ist ein gemeinsames Verständnis, eine gemeinsame Datenbasis, die es uns dahin ermöglicht, die richtigen Schritte einzuleiten. Und wenn wir das nicht hätten, wäre die Gefahr groß, dass man da auf sehr, sehr große Investitionen, vielleicht falsche Themenfelder oder falsche Technologien setzt. Und da ist die Investition deutlich größer, die man hat und auch der der Zeitverzug. Das können wir uns einfach nicht leisten. Deswegen glaube ich, dass man frühzeitig diese Transparenz hat, um dann wirklich viel effizienter die Schritte und Maßnahmen technologisch zu ergreifen auf jeden Fall richtig und wichtig.

E3_{F8} Ich glaube, da müssen wir einmal eben noch genau wieder unterscheiden zwischen dem Moment, dass ich quasi rückwirkend Daten sammeln muss. Und natürlich dem Moment, dass ich jetzt vorwärtsgerichtet einsammle, dass ich langsam meine Liste fülle. Ich habe im Moment, sehe ich, dass es sehr viel Aufwand bedeutet, die Daten, des Ist-Status, zu erfassen. Um in einen Modus zu kommen, wo ich auch weiter mit genau diesem Prozess leben kann. Weil da, wo wir gerade noch nicht richtig drüber diskutiert haben, ist, ich will ja sammeln. Ich habe dann eine Version, ich baue ein Layout auf und spiele dann damit rum. Also regle innerhalb dieses Layouts. Es fällt mir richtig schwer, den Aufwand einzuschätzen. Ich bin jetzt einfach ehrlich. Ich kann im Moment noch nicht wirklich sagen, wie viel Aufwand dahinter ist, weil es zu vielschichtig ist. Wir haben das angeschnitten: Ich muss erstmal kontraktuell sicherstellen, dass ich Daten zu meinen alten Bauteilen kriege, weil Verträge bei uns aktuell dieses Datenteil nicht vorsehen. Die Daten sind da, aber das Teil nicht. Das heißt, gegebenenfalls, in dem Moment, wo ich eine gute „Legal-Stellschraube“ kriege, ist mein Aufwand, um Daten zu vereinnahmen für gewisse Bauteile, ich hatte mal aufgerechnet bekommen, ich glaube 250 unterschiedliche Baugruppen auf Bauprodukte sozusagen. Dann kannst du dahinter eigentlich hochrechnen: Lass es 10 Stunden sein, was du da wieder umrechnest in einen gewissen Betrag, das ist berechenbar, aber das steht und fällt mit dieser kontraktuellen Stellschraube. Und die kann ich gerade noch nicht wirklich greifen. Wie viel Aufwand bedeutet das für mich, dass ich überhaupt an die Daten komme. Weil ich in dem Moment, wo ich an die Daten komme, ist es alles einschätzbar.

F9 Inwieweit halten Sie die Art der Modellierung für weitere Untersuchungen für zielführend?

E1_{F9} Ja, absolut. Weil das eben hilft zu visualisieren, was wollen wir, in welche Richtung geht es eigentlich. Wie gesagt, ich glaube, dass es noch Supplier gibt, die sich mit dem Thema wenig bis gar nicht auseinandergesetzt haben. Wenn ich daran denke, wie lange wir schon an diesem Thema arbeiten, um uns klarer zu werden, in welche Richtung das gehen soll, ist eine systematische Darstellung absolut hilfreich.

E2_{F9} Auf jeden Fall hilft diese Darstellung. Man muss dann vielleicht noch mal schauen, wo man eventuell sogar die Darstellung, die Modellierung erweitern kann. Wenn ich das richtig verstanden habe, war das jetzt auf Produktebene. Wenn wir dann auch sagen, wir wollen die Konfiguration, die Konfigurierbarkeit der Kabine betrachten, geht es natürlich dann auch um weiterführende Systemgrenzen. Und dass man dann auch schaut, wer ist der Kunde dieser Daten, dieser Informationen. Das ist dann, wie du es auch dargestellt hast, der Supplier, aber natürlich auch die Airline. Und das heißt, dass man tatsächlich alle Stakeholder, die Daten bereitstellen, aber auch in irgendeiner Weise diese Daten nutzen und für sich verarbeiten, darstellt. Und da hilft auf jeden Fall diese Prozessdarstellung.

E3_{F9} Ich finde es absolut hilfreich. Weil das, was ich nämlich schaffen kann mit dieser Hilfe, ist: Ich muss ja dann irgendwann auch meine eigenen Methoden erstellen. Die bestmöglich genau diesem Ablauf folgen. Ich kann dann anfangen zu übersetzen, und das ist in meiner Art und Weise der Darstellung zu machen, weil die sind natürlich unterschiedlich gewählt. Du hast das sehr standardisiert gemacht, sodass es viele auch Außenstehende verstehen. Wenn ich dann in meine Prozesse reingucke, die EPA und so weiter. Wir haben eine sehr eigene Art und Weise der Darstellung. Und wo du eben ganz genau sagst: Was geht wo ein, was kommt wo raus, welches Tablet wird benutzt, welche Methode ist dahinter, und, und, und. Da kann mir das hier aber helfen, dass ich genau die richtigen Schritte auch 1:1 spiegeln kann. Nur wahrscheinlich werden sie hinter anders heißen. Aber es wird mir helfen, mit unseren Process, Methods and Tools Leuten zu reden und zu sagen, „Pass mal auf, das ist das, was ich gerne abgebildet sehen möchte. Wie können wir das übersetzen in unseren Bereich?“

F10 Fördert das Phasenmodell aus Ihrer Sicht die Integration von Ökobilanzen (der Systematik dieser Arbeit) in den Konfigurationsprozess?

E1_{F10} Ja, weil man muss am Ende einen Prozess beschreiben. Wenn wir das jetzt einführen wollen, und das gibt es noch nicht, muss ich wissen: Wie läuft der Konfigurationsprozess ab? Wie wird mit einer Airline zusammengearbeitet, an welcher Stelle macht es dann Sinn diesen Konfigurator zu nutzen und was brauche ich dafür? Insofern, das zu systematisieren und so eine Phasenbeschreibung niederzulegen, ist eigentlich die Grundvoraussetzung, um das überhaupt umzusetzen.

E2_{F10} Ja, definitiv unterstützt das Phasenmodell in meinen Augen die Anwendung. Wir haben ja schon gesagt, es ist ganz wichtig, dass man entlang dieser Schritte der Konfigurationen und Individualisierung, die Transparenz bekommt. Um eben auch den Kunden in seiner Auswahl und seinen Entscheidungsmöglichkeiten leitet und lenkt. Und dementsprechend hilft das Definitiv dann zur Implementierung. Zumal dann natürlich auch die Transparenz in diesem Konfigurationsprozess über den Umwelteinfluss, gegebenenfalls dann auch die Verfügbarkeit an Produkten verbessert. Das erhöht auch den Innovationsdruck auf die Zulieferer, entsprechend ökoeffizientere Produkte zur Verfügung zu stellen, die dann durch die erhöhte Transparenz dann auch hoffentlich bevorzugt werden im Vergleich zu Heute.

Und so gesehen, ist das in allen Belangen ein ganz wichtiger Aspekt und hilft bei der Implementierung. Einerseits „Guidance“ der Kunden, zum anderen aber auch die Tatsache, dass das zurückgespielt wird auf die Zulieferer und entsprechend auch den Innovationsdruck erhöht.

E3_{F10} Ich glaube schon, dass es sehr hilfreich und förderlich ist, weil es ja auch immer wieder aufzeigt: „Bin ich im richtigen Modus unterwegs oder auch nicht.“ Und gerade die unterschiedlichen Phasen, wie sie hier aufgezeigt werden, bedeuten unterschiedliche Notwendigkeiten, weil ich einfach bei uns auch in den Prozessen in unterschiedlichen Prozessen unterwegs bin: Bin ich in einem Prozess unterwegs, wo ich wirklich beraten, sprich mein Marketingprozess unterwegs bin, bin ich in dem Prozess unterwegs, wo ich die Schnittstelle, die Anbindung an den Hersteller habe, sehr technisch unterwegs sein muss, auch bis hin zu: „Wie gehe ich mit dieser Datenakquise um und bringe das in einen Rahmen rein, der auch wirklich reproduzierbar ist. Weil das, was ja auch ganz schlimm wäre, weil man muss es auch mitbetrachten, wir haben ja nicht nur einen Kunden, der ankommt und kommt ja nie wieder, sondern die Kunden kommen immer wieder. Das ist auch gut so. Und wir wollen sie immer wieder in der gleichen Form und mit der gleichen Qualität natürlich auch beraten. Von daher finde ich auch ein sehr strukturiertes Vorgehen notwendig, weil man glaubt gar nicht, mit welchen Fragestellungen man konfrontiert ist und es beim Kunden ein „Elefantenhirn“ gibt. Sie haben wirklich ein sehr, sehr hohes Wissenssum und merken sich das auch sehr gut. Ich meine, wäre ich auch, würde ich ein so teures Produkt kaufen, würde ich aufpassen, was mir erklärt und erzählt wird, und im Falle eines Falles dann auch hinterfragen.“

F11 Unterstützt das Phasenmodell die Berücksichtigung von ökologischen Aspekten während des Konfigurationsprozesses?

E1_{F11} Ich weiß nicht, ob ich die Frage jetzt richtig verstanden habe, aber ich glaube, das ist nicht eine Frage von dem Phasenmodell. Am Ende geht es darum, dass man verstehen muss, was die Airline will, ob sie daran interessiert ist, beziehungsweise die Flugzeughersteller müssen einen Vorschlag machen, in welche Richtung Airline-Entscheidungen Einfluss auf den Umweltaspekt des Flugzeugs haben. Mit anderen Worten, man muss erstmal Awareness schaffen und dann sagt die Airline vielleicht „Oh, da habe ich noch gar nicht drüber nachgedacht, wenn ich das so und so mache, sehe ich besser aus, was die Umweltbelastung angeht oder halt schlechter“. Das muss den Airlines bekannt gemacht werden, und das kann man in so einem Phasenmodell machen. Aber letzten Endes ist das eher die Umsetzung: wie mache ich es denn konkret? Der erste Schritt ist erstmal darzustellen: was ist die Methode und wie kann sie helfen?

E2_{F11} Ja, definitiv glaube ich, dass es das unterstützt.

E3_{F11} Das Interessante ist halt, dass gerade die Kabine, diese Gestaltungsfreiräume hat. Die findest du in vielen anderen Systemen des Flugzeugs nicht wieder. Das heißt, man ist doch einfach sehr, sehr individuell unterwegs. Und hat eine Bandbreite von unterschiedlichen

Konfigurationen, Produkten, Zusammensetzungen. Und da finde ich es einfach notwendig, dass ich meinem Kunden, der ein sehr spezielles Produkt bekommt, nämlich auf ihn zugeschnitten, auf seine Mission zugeschnitten. Dass ich dort dann eben auch einen Aufbau habe, der dessen gerecht wird. Ich ahne, ich kann mir sehr gut vorstellen, wenn wir gleich später, das ist ja auch ein Ziel, das wir auch haben. Wir wollen gemeinsam auch versuchen, dass das Tool vielleicht nicht nur in der Kabine anwendbar ist, sondern immer noch ausgeweitet werden kann. Ich glaube, dort wird dann sehr schnell erkennbar werden, wo habe ich diese Freiheitsgrade und wo habe ich sie nicht. Ich ahne das dann in Systemen, in vielen, die dann sehr eng miteinander, mit einer Konfiguration verknüpft sind, dass ich da viel mehr Möglichkeiten habe des Impacts als beispielsweise bei den Landing-Gears. Die Funktionalität eines Landing-Gears bleibt relativ gleich. Egal ob ich da drin eine Kabine habe, wo ich vielleicht nur 30 Business Class-Sitze habe oder ich habe 140 Economy Class-Sitze reingequetscht. Ich denke, dass es auch dadurch sinnfälliger ist, gerade diese Individualisierung der Kabine genauer in Betracht zu ziehen, weil im Endeffekt werden Leute hinterfragen „Was war denn eure Basis?“. Es geht dann auch gerade bei „Kunden-Education“ vielleicht, in Sachen Wiedererkennungswert. Bin wirklich mit meinem Produkt drinnen oder nicht? Und daher kann ich einfach nur davon ausgehen, das ist das, was wir brauchen, um sauber und sehr kundenorientiert zu kommunizieren.

F12 Wie bewerten Sie die Unterscheidung nach Phasen?

E1_{F12} Das macht Sinn. Man muss erstmal die Datenbasis evaluieren und sagen „Habe ich eigentlich alles zur Verfügung, kann ich jetzt loslegen für diese konkrete Head of Version?“. Dann wird es umgesetzt. Zum Abschluss wäre die Konfiguration abgeschlossen und die Airline bekommt die finalen Ergebnisse.

E2_{F12} Vom Ablauf her ist das definitiv nachvollziehbar und sinnvoll. Also, den Ablaufplan, den man beim Thema „Customization“ hat und auch jetzt der Fokus Konfiguration und Individualisierung ist tatsächlich auch der Schwerpunkt wo mit dem Life Cycle Assessment eingreifen. Wo die Verkaufskampagne abgeschlossen ist, aber eben die Airline die Konfiguration der Kabine zusammenstellt, auch im Zusammenspiel mit der Art und Weise wie die Kabine betrieben wird. Das ist genau der Punkt, wo man ansetzen kann, wo man den größten Hebel in Bezug auf die Airlines, auf die Kunden hat und auch der generelle Ablauf innerhalb dieses Punktes ist absolut logisch und in meinen Augen richtig.

E3_{F12} Phase 1 und 2 hast du ja etwas näher noch erläutert. Ich bin gerade, darum war ich auch kurz ruhig, bei der Phase 3 mit dem Abschluss, war ich gerade noch so etwas am überlegen. Woher du da den Abschluss genommen hast. Weil fortlaufende Vorbereitung und Initiieren heißt, ich habe die gleiche Qualität von Daten und auch ein Update der Daten gewährleistet, dass ich Ad-hoc eine Konfiguration mache, aber ziehe per se, das ist ein Status quo, so wie ich es in der Produktion habe. Weil da nehme ich auch, wenn ich eben vielleicht ein Design-Change habe in einem System, weil das ist einfach, wo der Standard sich verändert, ziehe ich ja auch mit. Und Durchführung finde ich auch, das trifft einfach,

was wir brauchen. Ich muss ganz genau sagen: Wo sind meine Grenzen für meine Ökobilanzierung, was nehme ich mit und was nehme ich nicht mit und mache auch immer wieder das Gleiche. Und habe dann hoffentlich eine Software, die mich dabei unterstützt. Die mir beispielsweise aber auch aufzeigen könnte, wenn sich etwas verändert hat, oder ich dann rückwirkend vielleicht noch mal ein paar Veränderungen durchführen muss. Wir haben auch ein bisschen darüber diskutiert. Worst-Case wäre, man fängt an, setzt auch auf eine gewisse Berechnungsmethode und dann kommt irgendjemand um eine Ecke und entscheidet dann „Heute machen wir nicht mehr PEF oder nicht mehr ReCiPe, sondern wir machen morgen XYZ.“ Und dann auf einmal ist dann ja die Frage, was hat das dann für Auswirkungen, wenn du da mittendrin im Prozess bist, willst du ja auch dann reagieren können. Da ja ein FCO-Prozess, ein Customization-Prozess, der ist nicht nur von einem Tag auf den anderen durch, der zieht sich ja teilweise über Monate. Wie du es auch richtig aufgezeigt hast, dass Konfiguration, Individualisierung, habe ich auch später noch mal ein „Late-RFC“ drin. Das sind diese späten Kundenwünsche, die dann wiederum weiter vorne ansetzen. Und ich muss dann auch wieder anfangen, anfangen und anfangen. Und das kann sich, je nach Flugzeugmodell, bei den kleinen nicht so, aber bei den größeren zieht sich das über Wochen und Monate hin, dieser Prozess. Das heißt, da muss ich auch sicherstellen, dass ich bei den etwaigen Veränderungen nichts torpedieren. - (Nachfrage zum Prozessschritt Abschluss) - Das heißt, dass für den Abschluss wird dann beispielsweise: „Ich sag mal bei der Durchführung entsteht ja am Ende des Prozesses eine Übersicht, ein Report.“ Was wir auch diskutiert haben, was mit Zeit, Datum gestempelt wird, gesagt wird: „Per heute ist das folgendes. Können wir dir das überspiegeln als Impulse, als Rückmeldung, und danach kannst du deine etwaigen Entscheidungen treffen“

F13 Für wie wichtig erachten Sie die Fokussierung auf Daten entlang des Phasenmodells?

E1_{F13} Grundsätzlich ist das Thema Daten das A und O. Wir können noch so ein tolles Tool entwickeln, aber wenn ich nicht für die einzelnen wichtigen Geräte die entsprechenden Umweltdaten habe, nützt mir das Tool nichts. Aber das ist genau die Herausforderung, die ich jetzt im nächsten Jahr sehe, auch mit unserem Tool jetzt, um darauf nochmal zurückzukommen. Dieser Balanceakt zwischen Vereinfachung gegenüber dem konkreten Konfigurationsprozess bei der Airline, also, was muss ich berücksichtigen, was brauche ich nicht berücksichtigen, was kann ich auch gar nicht berücksichtigen, weil es dann zu sehr ins Detail geht. Als Beispiel, wir haben jetzt die Galley, und ich vereinfache einfach mal ein bisschen und habe dann nur 7 verschiedene Galley-Typen. Dann müsste ich jetzt in diesem Prozess oder Phasenmodell überhaupt erstmal gucken. Jetzt hat eine Airline aber die Galley so und so genommen, das war ja unsere Idee, und da müsste ich gucken, genau die habe ich jetzt nicht, aber ich habe so eine generische Galley, die eigentlich mehrere Typen zusammenfasst und die passt dann, aber die muss ich dann auswählen und dafür muss ich dann aber auch die entsprechenden Daten zur Verfügung haben. Mit anderen Worten, da ist noch ein bisschen Arbeit notwendig, um die richtigen Daten auch zu nutzen und zur Verfügung zu haben, was vielleicht über die reine Nutzung des Tools hinausgeht. Insofern sind Daten das A und O.

E2_{F13} Wie du es schon gesagt hast, das entscheidende ist, dass die Daten verfügbar sind. Also all das muss natürlich datenbasiert sein. Nur so kann man ein konsistentes und auch detailliertes Ergebnis erarbeiten, was für die Anwendungsfälle auch notwendig ist. Und auch die Qualität der Daten muss gewährleistet sein. So gesehen, ist es ganz wichtig, dass man für diese datengestützten Modelle auch die entsprechenden Vorgaben und Standards erarbeitet. Aber ich sehe das genauso, im Zentrum muss sein, dass man das ganze datenbasiert machen. Auch um sicherzustellen, dass hier die Ergebnisse nicht für Greenwashing beispielsweise benutzt werden, sondern dass man wirklich zurückverfolgen kann, auch belegen kann auf welcher Grundlage man die Ergebnisse erzeugt hat. So gesehen, absolut entscheidend, dass das eine valide Datengrundlage hat.

E3_{F13} Für mich sind Daten das Futtermittel meiner Ökobilanz. Wenn ich nicht saubere Datensätze am Anfang generiere und definiere „was verstehe ich unter Daten“. Dann kann ich gar nicht weiter das System sauber und gleichmäßig füttern, so wie ich es einfach bei einer Vielzahl von Produkten machen muss. Das heißt, für mich steht hinter dem weiten Begriff von Daten damit die Definition, welche Daten meine ich denn bitte genauer hinter. Und die ich dann auch entlang meiner jeweiligen Produkte, egal von welchem Hersteller, gleich dann auch erfasse. Daten können ja sein, die Materialpunkte, Prozessparameter, es kann sein Gewicht. Also sehr, sehr wichtig natürlich, dass ich mit den richtigen Gewichtsangaben auch arbeite. Denn das Schlimmste was hier passieren wird, wenn ich anfangs ein eigenes Gewichtsmerkmal aufzusammeln und wir haben ja auch, das ist wiederum das Interessante, irgendwann später trifft ja dieser Customizationprozess, sprich „Ich-suche-mir-aus-Prozess“ auf den „Ich-werde-fertig-gebaut-Prozess“. Und ich Flugzeug komme dann auf eine Waage. Ganz, ganz doof wäre es, wenn ich vorne mit anderen Datenpunkten arbeite als hinten, dann habe ich irgendwo wieder eine Diskrepanz, die ich dann irgendjemandem erklären muss. Diskrepanzen führen dazu, dass Prozesse wieder hinterfragt werden, Methoden, wie man etwas macht. Das ist Reibung und das kostet. Daten ist für mich der übergeordnete Begriff von Charakterpunkten, von Bauteilen, die ich erfasse, um dann ein Bild zu generieren, wie ist der Status-Quo, wie ist mein Fußabdruck dieses Produktes in Kombination mit dem übergeordneten Produkt, aber wohlwissentlich, dass wir die Daten, wenn ich über Gewicht rede, rede ich eigentlich über das Gleichgewicht, was ich dann auch hoffentlich am Ende des Tages auch auf der Waage sehe. Von daher ist es ja vielschichtig, aber wir hatten vorhin ein bisschen Prozesse geredet, wo ich auch gesagt habe, dass ein erstes Prozessschaubild mir helfen wird, das in meine Businessprozesse zu übertragen. Und genau da ist dann auch der Punkt, dass du dann sagst: „Ich brauche Gewichtsdaten. Woher? Aus welchem Template? Aus welcher Methode? Wie wird das gemacht?“ Und so weiter.

F14 Welche Rollen nehmen aus Ihrer Sicht Fluggesellschaft, Konfigurationsteams und Zulieferer im Rahmen des Phasenmodells ein?

E1_{F14} Wir haben jetzt natürlich genau die Herausforderung, dass wir die Praxis nicht mal wirklich kennen. Das sind Annahmen oder Spekulation. Anders angefangen: Der Flugzeugherstel-

ler müsste überhaupt erst mal das Tool bewerben und sagen „Im Laufe deines Konfigurationsprozesses gegenüber der Airline kann ich dir auch Hilfestellung geben hinsichtlich der Umweltaspekte“. Da sind wir bei der Initiierung. Überhaupt der Airline den Hinweis zu geben „Wenn du interessiert bist, kann ich dir das mitliefern“. Dann muss er dann wollen, das auch durchzuführen, die Daten bereit zu haben und mit der Airline zusammen die Ergebnisse zu arbeiten. Die Airline ist letzten Endes die, die dann auch Interesse haben muss zu sagen „Wenn ich jetzt meine verschiedenen Layout-Konfigurationen hier durchgehe, dann kannst du mir eine Aussage darüber geben, ob jetzt mein Layout A oder B besser ist, was das Ganze angeht. Den Zulieferer sehe ich da jetzt direkt in dem Prozess eigentlich nur als Datenzulieferer. Also, die müssen die Daten zur Verfügung stellen, aber in diesem Prozess selbst sehe ich die eigentlich gar nicht richtig involviert.

E2_{F14} Fangen wir mal an mit den Zulieferern. Die Zulieferer müssen zu den entsprechenden Produkten die sie „beisteuern“, die sie herstellen und die entsprechend in der Kabine eingebaut werden, die entsprechenden Daten liefern. Sie stehen am Anfang der gesamten Prozesskette, dass wir konsistent von den Zulieferern die entsprechenden Informationen haben. Als Flugzeughersteller ist derjenige, der diese Supplier-Daten integrieren und adaptieren muss auf die entsprechenden Konfigurationen und Layouts, die dann von den Airlines abgefragt werden. Und die Airlines sind diejenigen, die einerseits Kunde von diesen Ergebnissen sind. Wenn man dann verschiedene Konfigurationsanfragen macht, aber auch die die Rahmenbedingungen setzt, z.B. wie das Flugzeug, wie die Kabine betrieben wird, um entsprechende Anpassungen im gesamten Modell dann vorzunehmen. Alle haben ihre Rolle, am Ende müssen die Daten, die Zahnräder ineinandergreifen, dass sozusagen all die Datenpakete dann übertragen und integriert werden und am Ende auch zusammenpassen.

E3_{F14} Jeder von uns hat eine gewisse Interessenslage, in diesem Konglomerat. Dann fangen wir mal hinten an. Die Airline bekommt das Produkt am Ende. Hat aber quasi das Interesse schon von Anfang an richtig beraten zu werden, was Auswahlmöglichkeiten angeht. Ich will eine Transparenz haben. Gerne auf einem „Silbertablett“ hingelagte Auswahlmöglichkeiten. Auswahl und Impact quasi. Das heißt, das ist mein Interesse. Ich möchte ganz genau wissen, wie eine Entscheidung, wie meine Kaufentscheidung, sich auf das Produkt und auch die ganzen Parameter rund um die Verwendung meines Produktes auswirkt. Im Umkehrschluss sollte ein Inverkehrbringer eines Produktes auch daran einfach interessiert sein, seinen Kaufinteressenten genau darzulegen: „Was kann mein Produkt?“ Wo komme ich an Grenzen? Wo kann eine andere Verwendung meines Produktes oder ein gewisser Parameter einfach einen negativen Impact haben? Wir haben es ja übertrieben gerade in der Luftfahrt, dann geht es natürlich darum, wie trainieren wir auch die Piloten, wenn ein neues System kommt? Entscheidungen im Gebrauch haben eine Konsequenz und genau das liegt dann auch in unserem Interesse. Hier zu zeigen, du hast einen gewissen Charakter, einen Fußabdruck. Wir sind alle gemeinsam daran interessiert, diesen Fußabdruck langfristig zu minimieren, weil er A: Geld kostet. Es wird teurer werden, aber jedes Kilo Kerosin ist seit jeher ein Diskussionspunkt. Auch andere Ressourcen drum herum, um die Verwen-

derung des Produktes kosten auch Geld. Wir hatten Catering auch als Beispiel mit dem Wasserverbrauch, Abwasser, Müll. Das sind einfach die Momente, wo ich als derjenige, der das Produkt entwickelt, meiner Airline sagen muss: „So und so, musst du es verwenden.“ Und jetzt kommt der Haken zu der dritten Partei. Wir hatten dann den Zulieferer, derjenige, der eine Unterbaugruppe mit ins Produkt reinkriegt und die muss sich auch weitergeben. Was sind meine Anforderungen an dieses Produkt? Das darf auf keinen Fall passieren, wenn ich dein Produkt integriere in mein größeres Produkt? Das heißt, im Prinzip schaffst du es daraus eine Art Lasten- und Pflichtenheft mit abzuleiten. Und zu sagen, das ist meine Erwartungshaltung und das ist das was ich dir verspreche, Kaufversprechen. Da ist es dann eben wichtig, dass ich ganz genau weiß, wer erwartet was von wem und auf welcher Datenbasis. Kommen wir wieder zu dem Punkt: Je einheitlicher die Datenbasis ist, insbesondere, wenn ich nicht nur mit einem Zulieferer zu tun habe, sondern im schlimmsten aller Fälle mit tausend. Dass ich dort auch sage: „Das ist die Datenbasis, die ich erwarte.“ Damit ich vergleichend tätig sein kann und auch Entscheidungen mit beeinflussen kann.

F15 Sollten aus Ihrer Sicht weitere Stakeholder berücksichtigt werden?

E1_{F15} Nein, so spontan nicht.

E2_{F15} In meinen Augen ist es erstmal richtig und wichtig, dass wir mit den drei Stakeholdern, wie von dir auch vorgeschlagen, beginnen. Also sprich, die Supplier, die Flugzeughersteller und Airlines. Trotzdem denke ich, dass wir langfristig einen schrittweisen Ansatz machen müssen, dass wir nach und nach weitere Stakeholder einbeziehen, sobald sich dieses Grundgerüst mit den drei Stakeholdern etabliert hat und wir dann von der Grundlage auch weiter vorgehen können. Und da hast du jetzt auch genannt, sind weitere Stakeholder wie MROs, aber auch Dismantlers wichtig, dass wir einerseits die Transparenz Richtung Stakeholder geben. Aber auch, dass wir Informationen, Daten von den Stakeholdern bekommen, um unser Modell, unsere Life Cycle Assessment-Ergebnisse noch breiter mit echten Daten auffüllen zu können. Also, ein Beispiel, die Frage, zu welchem Prozentsatz am Ende die Kabine recycelt und wiederverwertet wird. Haben wir heute wahrscheinlich nur unzureichend die Möglichkeit über diese drei Stakeholder, die hier aufgeführt sind, die tatsächlichen Zahlen einzubauen. Wir müssen hier teilweise mit Annahmen arbeiten, und so gesehen ist es auch hier wichtig das Ganze auf breitere Datengrundlagen zu stellen, dass man nach und nach weitere Stakeholder abholt. Aber, Problem ist, wir haben teilweise gar keine direkten Verträge und so gesehen ist es erstmal wichtig, dass man mit drei Stakeholdern startet, es implementiert und nach und nach versucht, das Ganze zu erweitern. Hier kann natürlich ein industrieller Standard helfen, der dann auch die weiteren Stakeholder automatisch einbindet. Da müssen wir auch daran arbeiten, dass wir die Methodik dann über die Kabine hinaus etablieren. Wie gesagt, in meinen Augen ist der schrittweise Ansatz genau der richtige Weg.

E3_{F15} Ich glaube, im ersten Moment nicht. Weil alleine schon diese 3 unter einen Hut zu bekommen ist nämlich ziemlich schwer. Ich kann mir schon vorstellen in dem Moment, wenn wir

in einem eingeschwungenen Zustand sind, kommen wir dahin, was wir vorhin mal diskutiert haben, mit diesen Daten oder mit der Produktlebenszykluskontinuität. Das heißt, das ist dann irgendwann, weil es dann auch vorgelagerte Momente in der Lieferkette vielleicht zu berücksichtigen, oder dann irgendwann MRO und End-of-Life. Aber ich glaube, für den Moment ist es schon interessant genug, diese 3 Stakeholder in einer Balance zu halten. Dass alle im richtigen Moment kriegen, was sie brauchen. Aber auch einsteuern, was sie geben können. Und das im Gleichgewicht zu halten.

F16 Was sind die notwendigen Voraussetzungen für eine erfolgreiche Umsetzung?

E1_{F16} Also als wichtige Herausforderung natürlich hier das Thema Daten. Also ich muss eine verlässliche, umfangreiche Datenbank aufbauen, die realistisch ist. Das gibt die Glaubwürdigkeit des Tools wieder. Also ich stelle mir den Worst-Case vor: Wir bewerben das Tool. Es gibt Airlines, die dann sagen „Oh ja, super, das interessiert mich. Ich habe jetzt eine Detailfrage: Ich habe hier drei verschiedene Equipments oder Layouts, die ich wählen kann. Jetzt sag mir doch mal, was jetzt besser ist.“ Und dann sagen wir: „Da haben wir vom Supply leider noch gar keine Daten“. Und dann wird es ungenau, wir können das noch nicht machen, und dann sagen wir „Okay, Dankeschön, kommt später mal wieder, wenn ihr eure Datenbasis habt“. Das ist für mich die wichtigste Herausforderung oder Grundvoraussetzung, damit das überhaupt zum Laufen kommen kann.

E2_{F16} Im Prinzip sind das drei Voraussetzungen, die ich da sehe. Und die beziehen sich auch auf die drei Haupt-Stakeholder: Wenn man sich das Thema Supplier anschaut, als einer der Stakeholder, ist es natürlich absolute Voraussetzung, um diesen Prozess zu etablieren, dass wir in der Lage sind, für Neuentwicklungen aber auch rückwirkend für bestehende Produkte, überhaupt diese Daten in der notwendigen Genauigkeit zu bekommen. Das heißt hier Datenverfügbarkeit von den Suppliern absolut essenziell, und hier müssen wir einfach eine Datenbasis aufbauen, die genau diese ganze Vielschichtigkeit, die verschiedenen Layouts und Konfigurationen auch abbildet, und es nicht nur die Neuentwicklungen nach und nach umsetzen. Also die Bereitschaft von den Suppliern, daran mitzuarbeiten und die Daten zur Verfügung zu stellen. Dann der Flugzeughersteller natürlich, ganz klar, muss es Teil der Ambition, Teil der Ziele sein, dass man genau die Transparenz und die Life Cycle Assessments mit nutzt und auch in die internen Prozesse eingliedert. Customization ist eines davon, andere sind die Entwicklungsprojekte zusammen mit den Herstellern, also hier entlang der Prozesse das Ganze miteinbauen, und natürlich auch die Tools bereitstellen, um das Ganze umzusetzen. Und am Ende die Airlines, ist natürlich auch wichtig, gerade wenn wir uns das Thema Customization angucken. Voraussetzung ist natürlich, dass die Airlines diese Daten abfragen und auch brauchen für Layoutentscheidungen. Und so gesehen ist es auch ganz entscheidend, also wirklich auch als möglicher Nutzer der Ergebnisse, die daran ziehen, und natürlich auch die Rahmenbedingungen setzt. Und darüber hinaus glaube ich, früher oder später muss man auch schauen, wie weiter Regularien die verschiedenen Stakeholder irgendwann dazu zwingen, diese Datengrundlage bereitzustellen in

diesem Genauigkeitslevel. Und hier muss man das auch im Blick behalten, zukünftige Regularien, die am Ende, wenn es darum geht, eventuell zusätzliche Aufwände, Kosten zu haben, dass das darüber auch mitbegründet werden kann.

E3_{F16} Eigentlich das Thema, was du immer bei uns gestresst hast. Das heißt, mein Umsetzungsbedarf - Ich muss sehr genau wissen: Wer sind später meine Anwender? was sind meine Use Cases? Um dann Stakeholder Management zu betreiben und diese abzuholen und gemeinschaftlich auf den Weg zu gehen. Weil auch, wenn ich jetzt einfach nur sage „Ich konzentriere mich jetzt vielleicht nur und vielleicht ist das auch ein bisschen zu sehr passiert, keine Ahnung - Da bin ich auch ein bisschen am Zweifeln - Wenn ich mich jetzt nur auf meine Zulieferer konzentriere, mit denen ich etwas zusammenbaue. Später aber, ich nicht die Transferleistung hin zu meinem Kunden hinkriege, dann habe ich ein Problem. Bevor ich überhaupt an meinem Kunden bin, habe ich dann auch noch das interne Stakeholder Management, unsere Kollegen vom FCO-Prozess, die Programmorganisation. Die haben andere Treiber im Moment. Wenn es darum geht, wie sie ein Produkt an die Airline kriegen. Die haben andere Notwendigkeiten. Und das ist eben das, was aktuell hier Herausforderungen ist: Wir quetschen in einen aktuell relativ eingeschwungenen Zustand ein neues Deliverable, ein neues Thema mit ein. Und dann musst du alle mitnehmen auf die Reise, keinen unterwegs verlieren, damit man sich gemeinsam dahin entwickelt. Dann kommt man wieder in „Business-as-usual“, wie es so schön heißt, oder Daily Business. Das ist verdammt schwer das umzusetzen, also diese Prozessänderungen in ein bestehendes System reinzutragen, ist schwer, weil sehr oft die Gegenwehr kommt mit „Ja, aber“. Und das sehe ich gerade noch mit als die größte Herausforderung. Auf Unternehmensebene kommen sehr viele, ich will nicht sagen Parolen, aber eigentlich die richtigen Lichter in die richtige Richtung. Jetzt haben wir vor unten ein Tool entwickelt, was dabei helfen soll. Und jetzt kommt diese Transferleistung mit den unterschiedlichen Interessensträgern: Sei es Geld, sei es Zeit, sei es Impact auf Produktion, sei es Umgang mit Suppliern und so weiter. Dann noch unser Konstrukt mit unterschiedlichen Kaufverträgen, dass wir mehr Mitspracherecht haben oder auch weniger Mitspracherecht. Dass wir für das Bauteil bezahlen oder die Airline direkt bezahlt. Und das macht das Ganze eben nicht einfacher. Aber es ist eben diese gemeinschaftliche Reise und die wird spannend.

A.13.2 Datensätze für Vergleich mit Modellierungssoftware

Tabelle A-35: Ergebnisse der Modellierung von Umberto und Tabellenkalkulationsprogramm, Treibstoffherstellung sowie Verbrauch

Midpoint Indikator	Einheit	Ergebnisse Umberto	Ergebnisse Tabellenkalkulationssoftware
Klimawandel	[kg CO ₂ eq]	1,48E+08	1,48E+08
Ozonabbau	[kg CFC11eq]	0,00E+00	1,66E+01
Ionisierende Strahlung	[kBq Co-60 to air eq]	0,00E+00	0,00E+00
Feinstaubbildung	[kg PM _{2,5} -eq]	3,22E+04	3,43E+04
Photochemische Ozonbildung (Mensch)	[kg NO _x -eq]	3,00E+05	2,94E+05
Photochemische Ozonbildung (Land)	[kg NO _x -eq]	3,21E+05	2,91E+05
Toxizität (krebserregend)	[1,4-DCB eq,]	0,00E+00	7,40E+02
Toxizität (nicht krebserregend)	[1,4-DCB eq,]	2,50E+03	3,37E+03
Toxizität (Land)	[1,4-DCB eq,]	7,74E+03	1,29E+02
Toxizität (Süßwasser)	[1,4-DCB eq,]	8,29E+00	6,62E-02
Toxizität (Meerwasser)	[1,4-DCB eq,]	3,30E+00	1,67E+00
Wasserverbrauch	[m ³ H ₂ O consumed]	0,00E+00	0,00E+00
Übersäuerung	[kg SO ₂ -eq]	1,09E+05	1,16E+05
Landnutzung & Transformation	[m ² ·annual crop eq]	0,00E+00	0,00E+00
Süßwasser-Eutrophierung	[kg P-eq, to freshwater]	0,00E+00	0,00E+00
Meerwasser-Eutrophierung	[kg N-eq to marine water]	1,21E+04	1,11E+04
Mineralienverbrauch	[kg Cu-eq]	0,00E+00	0,00E+00
Verbrauch fossiler Ressourcen	[kg oil-eq]	1,76E+07	1,77E+07
<i>Normalisierung und Gewichtung mittels ReCiPe-Methode zur Berechnung von Endpoint Indikatoren sowie Single Score</i>			
Endpoint Indikatoren			
Menschliche Gesundheit	[DALY]	1,58E+02	1,59E+02
Ökosystem	[species]	4,36E-01	4,38E-01
Ressourcenverfügbarkeit	[\$]	8,02E+06	7,91E+06
Single Score			
Single Score	-	4,29E+07	4,33E+07

A.13.3 Daten zur Nutzerstudie

Tabelle A- 36: Demografische Charakterisierung der Studienteilnehmer, Erfahrungen und Dauer für Durchführung

Proband	Alter	Erfahrungen Konfiguration Kabine	Erfahrungen Ökobilanzen	Dauer bei Durchführung [mm:ss]
P1	28	4	4	19:29
P2	29	2	4	13:56
P3	21	1	1	19:40
P4	26	1	1	09:30
P5	34	5	2	12:45
P6	40	1	1	12:45
P7	26	1	3	30:48
P8	29	1	2	25:26
P9	20	1	1	21:28
P10	36	1	3	19:08
P11	36	1	1	16:02
P12	30	1	1	13:33
P13	41	1	2	32:05
P14	32	1	1	17:55
P15	23	1	1	12:13
P16	29	1	3	14:04
P17	22	1	1	18:44
P18	30	3	3	13:24
P19	28	1	2	07:47
P20	29	1	1	09:44
P21	21	1	2	11:57
Mittelwert	29,7	1,5	1,9	16:47
SD	5,6	1,1	1,0	06:32

Erklärungen zu Erfahrungen Konfiguration Kabine/Ökobilanz:
1 = Keine Erfahrungen | 5 = Experten

Tabelle A- 37: Rohdaten und Bestimmung des ATI-Score

Proband	F1	F2	F3*	F4	F5	F6*	F7	F8*	F9	Mittelwert
P1	4	4	2	5	5	3	3	2	5	4,9
P2	4	5	2	4	5	4	3	2	4	3,8
P3	5	5	2	4	5	2	4	2	5	4,6
P4	5	5	2	3	3	2	4	4	3	4,4
P5	4	5	1	4	3	2	4	2	3	4,2
P6	5	5	2	4	3	4	3	2	3	4,8
P7	3	4	1	4	3	2	4	3	4	4,0
P8	5	4	2	3	3	2	4	2	4	4,3
P9	4	4	2	2	4	5	2	4	4	4,0
P10	5	5	2	4	4	2	4	2	5	4,1
P11	5	5	2	4	4	2	5	2	4	4,2
P12	5	5	2	4	4	2	4	2	4	3,3
P13	5	5	2	4	5	5	4	4	5	4,7
P14	5	5	1	4	4	1	5	1	5	4,7
P15	4	4	2	4	4	2	5	2	4	4,6
P16	5	5	4	5	5	1	4	1	4	4,2
P17	5	5	2	5	5	3	5	2	5	5,1
P18	4	4	2	4	3	2	3	3	3	4,4
P19	4	4	2	5	5	3	3	2	5	4,8
P20	4	5	2	4	5	4	3	2	4	4,9
P21	5	5	2	4	5	2	4	2	5	3,9
Mittelwert 4,4										
SD 0,4										
Mit * gekennzeichnete Items werden für die Berechnung des ATI-Score invertiert.										

Tabelle A- 38: Rohdaten und Bestimmung des SUS-Scales

Proband	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	SUS-Wert
P1	5	1	5	1	5	1	4	1	5	1	97,5
P2	1	1	4	1	5	1	5	1	5	1	87,5
P3	4	2	4	1	4	1	4	2	4	2	80
P4	3	1	4	1	4	2	5	2	4	1	82,5
P5	5	1	5	1	5	2	5	1	5	1	97,5
P6	4	1	5	1	4	1	4	1	4	1	90
P7	5	1	5	1	4	1	5	1	4	1	95
P8	4	1	5	2	5	1	5	2	4	1	90
P9	4	1	4	1	5	1	5	2	5	1	92,5
P10	5	1	5	1	5	4	5	1	4	2	87,5
P11	5	1	5	1	4	1	4	1	5	1	95
P12	5	1	5	1	5	1	5	1	5	1	100
P13	5	2	3	1	3	1	4	1	4	1	82,5
P14	4	1	5	1	5	1	5	2	5	1	95
P15	4	2	5	1	5	1	4	1	5	1	92,5
P16	5	2	4	1	4	1	5	1	4	1	90
P17	4	2	4	2	5	1	5	1	4	1	87,5
P18	5	1	5	1	5	1	5	1	4	2	95
P19	4	2	4	1	4	1	5	1	4	1	87,5
P20	5	1	4	2	5	1	4	1	4	1	90
P21	4	1	5	1	4	1	5	1	4	1	92,5
SUS-Score 90,83											
SD 5,14											