

Diese Arbeit wurde vorgelegt am Institut für Luft- und Raumfahrtsysteme

von

Sarah SPOHR

Matrikel-Nr.: 432534

Masterarbeit

**Kreislaufwirtschaft in der Luftfahrt:
Entwicklung eines einheitlichen Bewertungsansatzes
für verschiedene Flugzeugtypen**

Aachen, 13. November 2023

Wissenschaftliche Leitung: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eike Stumpf
Betreuender Mitarbeiter: Ansgar Kirste, M.Sc. (RWTH)
Externer Betreuer: Tim Hoff, M.Sc. (DLR)

1. Prüfer: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Eike Stumpf
2. Prüfer: Dr.-Ing. Ralf Hörnschemeyer

Kurzfassung

Die gegenwärtige Forschung im Bereich der Luftfahrtkreislaufwirtschaft konzentriert sich vorrangig auf die Betrachtung von Flugzeugen am Ende ihres Lebenszyklus. Das Hauptziel dieser Arbeit ist es, den vollständigen Lebenszyklus durch einen ganzheitlichen Ansatz zu quantifizieren und verschiedene Flugzeugtypen unter Berücksichtigung ökonomischer, ökologischer und kreislaufwirtschaftlicher Faktoren zu vergleichen. Dazu wurden vier Fragestellungen adressiert: die aktuelle Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in der Luftfahrt und bestehende Herausforderungen, die Anpassung des Butterfly-Diagramms der Ellen MacArthur Foundation an die Luftfahrt, die Entwicklung eines Bewertungsansatzes für verschiedene Flugzeugtypen und die Auswirkungen unterschiedlicher Materialien auf die Umsetzbarkeit der Kreislaufwirtschaft.

Im ersten Schritt wurde das Butterfly-Diagramm der Ellen MacArthur Foundation an die verschiedenen Szenarien innerhalb der Luftfahrt angepasst, wodurch deutlich wurde, dass bereits einige Kreislaufwirtschaftsansätze in der Branche implementiert sind. Dies schließt die Weiterverwendung von Bauteilen in anderen Flugzeugen und umfassendes Recycling am Ende des Lebenszyklus ein. Zusätzlich wurde die Notwendigkeit weiterer Forschung in Richtung effizienter und kostengünstiger Recyclingmethoden für Verbundwerkstoffe deutlich.

Im Anschluss wurde ein Bewertungstool entwickelt, das Bauteile ganzheitlich bewertet. Die Lebenszyklusanalyse ermöglichte die Ermittlung der CO₂-Äquivalente, wobei Reifen und Felgen aufgrund ihrer hohen Wechselfrequenz den größten Anteil ausmachten. Die Lebenszykluskostenanalyse verdeutlichte, dass Bremsen mehr als 50% der Gesamtkosten ausmachen. Der Kreislaufwirtschaftsindex zeigte, dass verschiedene Materialklassen unterschiedliche Umsetzbarkeiten in der Kreislaufwirtschaft aufweisen, während bei verschiedenen Metallen kaum Unterschiede erkennbar waren.

Die bisherige Forschung eröffnet vielversprechende Ansätze für zukünftige Untersuchungen, darunter die detailliertere Weiterentwicklung des Butterfly-Diagramms der Ellen MacArthur Foundation unter Berücksichtigung verschiedener Zuliefererkonstellationen. Die Bewertung neuer Flugzeugkonzepte wie des Blended Wing Body oder wasserstoffbetriebener Flugzeuge könnte mithilfe des entwickelten Tools erfolgen, wobei eine ganzheitliche Vergleichsanalyse mit aktuellen Modellen durchgeführt werden sollte. Das entwickelte Tool ermöglicht durch einfache Anpassung die Einbeziehung zusätzlicher Komponenten oder Flugzeugtypen.

***Schlagworte:** Luftfahrt, Kreislaufwirtschaft, Butterfly-Diagramm, Lebenszyklusanalyse, Lebenszykluskostenanalyse, Kreislaufwirtschaftsindex*

Abstract

Current research in the field of aviation circular economy focuses primarily on the consideration of aircraft at the end of their life cycle. The main objective of this work is to quantify the full life cycle using a comprehensive assessment tool and to compare different types of aircraft, taking into account economic, environmental and circular economy aspects. Four central questions were addressed: the implementation of the circular economy in aviation and existing challenges, the adaptation of the Ellen MacArthur Foundation's Butterfly Diagram to aviation, the development of a comprehensive assessment tool for different aircraft types and the impact of different material classes on the circular economy.

The first step was to adapt the Ellen MacArthur Foundation's butterfly diagram to the range of scenarios within aviation, which revealed that some circular economy approaches have already been implemented in the industry. This includes the reuse of components in other aircraft and comprehensive recycling at the end of the life cycle. In addition, the need for further research into more efficient and cost-effective recycling methods for composite materials was highlighted.

Subsequently, an assessment tool was developed that evaluates components holistically. The life cycle analysis made it possible to determine the CO₂ equivalents, with tires and rims accounting for the largest share due to their high replacement frequency. The life cycle cost analysis revealed that brakes account for more than 50% of the total costs. The circular economy index demonstrated that different classes of materials have different levels of recyclability, while hardly any differences were discernible for different metals.

The results of the research carried out so far open up promising approaches for future investigations, including the more detailed development of the Ellen MacArthur Foundation's butterfly diagram, taking into account different supplier constellations. The evaluation of new aircraft concepts such as the blended wing body or hydrogen-powered aircraft could be carried out using the assessment tool, whereby a holistic comparative analysis with current models could be performed. The developed tool enables the inclusion of additional components or aircraft types through simple customization.

Keywords: *aviation, circular economy, butterfly diagram, life cycle analysis, life cycle cost analysis, material flow index*

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	III
Tabellenverzeichnis	V
Symbolverzeichnis	VII
1 Einleitung	1
2 Stand der Technik	4
2.1 Methode der Literaturrecherche	4
2.2 Kreislaufwirtschaft	5
2.2.1 Aktueller Stand	5
2.2.2 Grundlagen	6
2.2.3 Kreislaufwirtschaft in der Luftfahrt	9
2.2.4 Probleme bei der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft	12
2.3 Das Flugzeug	14
2.3.1 Allgemein	14
2.3.2 Unterschiede Airbus A320-200 und Airbus A350-900	15
2.3.3 Wartung	17
2.3.4 Das Fahrwerk	18
2.4 Ökonomische und Ökologische Grundlagen	19
2.4.1 Ökologische Grundlagen	19
2.4.2 Ökonomische Grundlagen	23
2.5 Kreislaufwirtschaftsindex	25
3 Butterfly-Diagramm	26
3.1 Allgemeine Darstellung	26
3.1.1 Der biologische Kreislauf	27
3.1.2 Der technische Kreislauf	29
3.2 Luftfahrtspezifische Anpassung	30
4 Bewertung unterschiedlicher Flugzeugtypen	37
4.1 Konzept	37
4.2 Methode der Berechnung	39
4.2.1 LCA	39
4.2.2 LCC	41
4.2.3 Kreislaufwirtschaftsindex	44

4.3	Daten und Annahmen.....	46
4.3.1	Allgemeine Flugzeugdaten.....	46
4.3.2	Das Fahrwerk	48
4.3.3	Sonstige Daten	53
4.4	Darstellung Tool	53
5	Auswertung	56
5.1	LCA.....	56
5.2	LCC.....	60
5.3	Kreislaufwirtschaftsindex	63
5.4	Vergleich der verschiedenen Bewertungsmethoden	66
6	Zusammenfassung und Ausblick	68
7	Literaturverzeichnis	71
Anhang.....	A
A	Arten der LCA	A
B	Arten der LCC.....	C
C	Daten zur Berechnung des Auslastungsfaktors.....	D
D	Fahrwerk Airbus A320-200 und A350-900: Maße und Volumen.....	E
E	Fahrwerk Airbus A320-200 und A350-900: Materialien.....	J
F	Wartungstasks A320-200 und A350-900.....	K
G	Werte Kreislaufwirtschaftsindex.....	O

Abbildungsverzeichnis

1-1	Übersicht über die Struktur der Masterarbeit	3
2-1	Anzahl der Veröffentlichungen pro Jahr der verwendeten Literatur	5
2-2	Vereinfachtes Modell der Kreislaufwirtschaft.....	7
2-3	Lineare Wirtschaft	8
2-4	Abfallhierarchie nach Keivanpour et al. (2015)	9
2-5	Prozessdarstellung vom Flugzeug Recycling nach Zhao et al. (2020)	10
2-6	Verschiedene Stufen, die ein Flugzeug während der Lebenszeit durchläuft nach Franz et al. (2012).....	15
2-7	Materialien die in einem Airbus A350-900 verbaut sind und wo diese verbaut sind...	16
2-8	Hauptfahrwerk (links) und Bugfahrwerk (rechts) A320-200	18
2-9	Hauptfahrwerk (links) und Bugfahrwerk (rechts) A350-900	19
2-10	Vier Schritte der Ökobilanz	20
2-11	Darstellung des Materialfluss nach Ellen MacArthur Foundation (2015).....	25
3-1	Das Butterfly-Diagramm der Ellen MacArthur Foundation.....	26
3-2	Angepasstes Butterfly-Diagramm auf die Luftfahrt	34
3-3	Schematische Darstellung des angepassten Butterfly-Diagramms.....	35
3-4	Detailausschnitt des angepassten Butterfly-Diagramms für Airlines mit eigenem Wartungsunternehmen	36
4-1	Schematische Darstellung des Tools	38
4-2	Vorgehen Berechnung CO ₂ -Äquivalent	40
4-3	Vorgehen Berechnung Gesamtkosten.....	42
4-4	Vorgehen Berechnung Kreislaufwirtschaftsindex	44
4-5	Vereinfachte Darstellung A320-200 Hauptfahrwerk (links) und Bugfahrwerk (rechts)	48
4-6	Vereinfachte Darstellung A350-900 Hauptfahrwerk (links) und Bugfahrwerk (rechts)	49
4-7	Auswahlmöglichkeiten in der Eingabeschnittstelle des Tools	54
4-8	Standardwerte (links) und Möglichkeiten der Anpassung (rechts) in der Eingabeschnittstelle des Tools.....	54
4-9	Ausgabeschnittstelle des Tools.....	55
5-1	Darstellung der Gewichtsaufteilung des Airbus A320-200 und Airbus A350-900.....	58
5-2	Darstellung der CO ₂ -Äquivalentsaufteilung des Airbus A320-200 und Airbus A350-900	58
5-3	Vergleich der CO ₂ -Äquivalente der Bauteile des Bugfahrwerks	59
5-4	Vergleich der CO ₂ -Äquivalente der Bauteile des Hauptfahrwerks	60

5-5	Gesamtkosten für Bug- und Hauptfahrwerk des Airbus A320-200 und Airbus A350-900	61
5-6	Kosten pro Flug für Bug- und Hauptfahrwerk des Airbus A320-200 und Airbus A350-900	62
5-7	Darstellung der Gesamtkostenaufteilung (in 1.000€) des Airbus A320-200 und Airbus A350-900	62
5-8	Kreislaufwirtschaftsindex für das A320-200 Bug- (links) und Hauptfahrwerk (rechts) sowie das gesamte Bauteil (graue Linie).....	64
5-9	Kreislaufwirtschaftsindex für das A350-900 Bug- (links) und Haupt-fahrwerk (rechts) sowie das gesamte Bauteil (graue Linie).....	64
5-10	Kreislaufwirtschaftsindex für das Bug- und Hauptfahrwerk des Airbus A320-200 und des Airbus A350-900	66
D-1	Vereinfachte Darstellung A320-200 Hauptfahrwerk (links) und Bugfahrwerk (rechts)	E
D-2	Vereinfachte Darstellung A350-900 Hauptfahrwerk (links) und Bugfahrwerk (rechts)	G

Tabellenverzeichnis

2-1	Suchbegriffe bei der Literaturrecherche	4
2-2	Materialverteilung beim Airbus A320-200 und Airbus A350-900 ohne Triebwerk	17
3-1	Tabellarische Darstellung der Anpassung des Butterfly-Diagramms	36
4-1	Gegenüberstellung verschiedener Daten des Airbus A320-200 und Airbus A350-900 hinsichtlich der durchgeführten Flüge	47
4-2	Leergewicht (OEW) und maximales Startgewicht (MTOW) des Airbus A320-200 und des Airbus A350-900.....	48
4-3	Austauschzyklen des Airbus A320-200 und A350-900 Hauptfahrwerks	51
4-4	Austauschzyklen des Airbus A320-200 und A350-900 Bugfahrwerks	51
4-5	Kosten pro Flug k_{Flug} für das Fahrwerk des Airbus A320-200	51
4-6	Kosten pro Flug k_{Flug} für das Fahrwerk des Airbus A350-900	52
4-7	Bauteilkosten des Airbus A320-200 und A350-900 Hauptfahrwerks.....	52
4-8	Bauteilkosten des Airbus A320-200 und A350-900 Bugfahrwerks.....	52
4-9	Materialien mit dazugehörigem GWP 100 [35]	53
5-1	LCA Daten für Airbus A320-200 Hauptfahrwerk	56
5-2	LCA Daten für Airbus A320-200 Bugfahrwerk.....	56
5-3	LCA Daten für Airbus A350-900 Hauptfahrwerk	57
5-4	LCA Daten für Airbus A350-900 Bugfahrwerk.....	57
5-5	LCC Daten für Airbus A320-200 Hauptfahrwerk.....	60
5-6	LCC Daten für Airbus A320-200 Bugfahrwerk.....	61
5-7	LCC Daten für Airbus A350-900 Hauptfahrwerk.....	61
5-8	LCC Daten für Airbus A350-900 Bugfahrwerk.....	61
5-9	Materialien mit dazugehörigem Kreislaufindexwert.....	64
C-1	Auslastung der Flugzeuge (Lufthansa Group) Q2 2022 bis Q1 2023	D
D-1	Maße und Volumen des Airbus A320-200 Hauptfahrwerk	F
D-2	Maße und Volumen des Airbus A320-200 Bugfahrwerk	G
D-3	Maße und Volumen des Airbus A350-900 Hauptfahrwerk	H
D-4	Maße und Volumen des Airbus A350-900 Bugfahrwerk	I
E-1	Materialien des Airbus A320-200 Hauptfahrwerks	J
E-2	Materialien des Airbus A320-200 Bugfahrwerks	J
E-3	Materialien des Airbus A350-900 Hauptfahrwerks	J
E-4	Materialien des Airbus A350-900 Bugfahrwerks	J
F-1	Mannstunden für die Wartung des A320-200 Hauptfahrwerk	K
F-2	Fixe Kosten für die Wartung des A320-200 Hauptfahrwerk	K

F-3	Mannstunden für die Wartung des A320-200 Bugfahrwerk	L
F-4	Fixe Kosten für die Wartung des A320-200 Bugfahrwerk	L
F-5	Mannstunden für die Wartung des A350-900 Hauptfahrwerk	M
F-6	Fixe Kosten für die Wartung des A350-900 Hauptfahrwerk	M
F-7	Mannstunden für die Wartung des A350-900 Bugfahrwerk	N
F-8	Fixe Kosten für die Wartung des A350-900 Bugfahrwerk	N
G-1	Fixe Kosten für die Wartung des A350-900 Bugfahrwerk	O

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AFK	Aramidfaserverstärkte Kunststoffe
AMP	Aircraft characteristics Airport and Maintenance planning
ATA	Air Transport Association
CFK	Kohlenstoffverstärkte Kunststoffe
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
ELCC	Ecological Life-Cycle-Costing
EoL	End of Life
FC	Flight Cycle
GFK	Glasfaserverstärkte Kunststoffe
GWP	Global Warming Potential
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
KWI	Kreislaufwirtschaftsindex
LCA	Life-Cycle-Assessment
LCC	Life-Cycle-Costing
LCI	Life Cycle Inventory
LCIA	Life Cycle Impact Assessment
MH	Manhour
MPD	Maintenance Planning Document
MRO	Maintenance Repair and Overhaul
MTOW	Maximum Take-off Weight
OEM	Original Equipment Manufacturer
OEW	Operating Empty Mass
PAX	Passenger
PEI	Polyetherimid
PPS	Polyphenylensulfid
PUR	Polyurethanschaum
PVC	Polyvinylchlorid
S-LCA	Social Life-Cycle-Assessment

Symbole

$\%_{Material,i,j}$	[%]	Anteil Material j am Gesamtvolumen von Bauteil i
$A_{Bauteil,i}$	[]	Anzahl der Austausche von Bauteil i während der Lebensspanne des Flugzeugs
$C_{1000PAXkm,i}$	$\left[\frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{1000\text{PAXkm}} \right]$	CO ₂ Äquivalent pro 1000 Passagierkilometer Bauteil i
C_E	[]	Anteil des Materials der am Ende des Lebenszyklus verbrannt wird
$C_{Flug,i}$	$\left[\frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{Flug}} \right]$	CO ₂ Äquivalent pro Flug Bauteil i
$C_{Material,i,j}$	$\left[\frac{\text{kgCO}_2\text{eq}}{\text{kg}} \right]$	CO ₂ Äquivalent von Material j
$C_{Material,i}$	$\left[\frac{\text{CO}_2}{\text{kg}} \right]$	CO ₂ Äquivalent
C_R	[]	Anteil des Materials der am Ende des Lebenszyklus recycelt wird
C_U	[]	Anteil des Materials der am Ende des Lebenszyklus wiederverwendet wird
$C_{gesamt,i}$	[kgCO ₂ eq]	CO ₂ Äquivalent für die gesamte Lebensdauer von Bauteil i
E_C	[]	Effektivität des Recyclingprozesses Ende des Lebenszyklus
E_F	[]	Effektivität des Recyclingprozesses der Rohmaterialien
F_R	[]	Anteil der recycelten Rohstoffe am Gesamtprodukt
F_U	[]	Anteil der wiederverwendeten Rohstoffe am Gesamtprodukt
L_{av}	[]	Branchenübliche Nutzungsdauer eines Produktes
T_{AC}	[Jahren]	Lebensdauer eines Flugzeuges
$T_{Bauteil,i}$	[FC]	Wechselzyklus Bauteil i
U_{av}	[]	Branchenübliche Nutzungsintensität eines Produktes
$V_{Bauteil,i}$	[cm ³]	Volumen Bauteil i
W_0	[]	Anteil an Abfall der am Ende des Produktlebenszyklus entsteht
W_C	[]	Anteil an Abfall der während des Recyclings der Materialien am Ende des Lebenszyklus entsteht
W_F	[]	Anteil an Abfall der während des Recyclings hin zum recycelten Rohmaterial entsteht
b_i	[km]	Angebotene Sitzkilometer (in Mio.)
$k_{1000 PAXkm,i}$	[m]	Kosten pro 1000 Passagierkilometer

Symbolverzeichnis

$k_{Flug,i}$	[m]	Kosten pro Flug
k_{Flug}	[€]	Wartungskosten pro Flug
$k_{a,i}$	[€]	Überholungskosten von Bauteil i
$k_{austausch,i}$	[m]	Kosten pro Austausch von Bauteil i
$k_{gesamt,i}$	[m]	Gesamtkosten Bauteil i
$k_{s,i}$	[€]	Sonstige Kosten Bauteil i
$k_{t,i}$	[€]	Anschaffungskosten Bauteil i
$m_{Bauteil,i}$	[kg]	Gewicht Bauteil i
$n_{Bauteil,i}$	[]	Anzahl an Bauteilen pro Komponente
n_{PAX}	[]	Anzahl an Passagieren
n_i	[]	Anzahl möglicher Überholungen bis Austausch
S_{Flug}	[km]	Durchschnittliche Flugstrecke
t_{AC}	[pro Tag]	Durchschnittliche Anzahl an Flügen pro Tag
u_{AC}	[%]	Auslastungsfaktor
$\rho_{Material,i,j}$	$[\frac{g}{cm^3}]$	Dichte von Material j
L	[]	Tatsächliche Nutzungsdauer eines Produktes
LFI	[]	Linear Flow Index
MCI	[]	Material Circularity Indicator
U	[]	Tatsächliche Nutzungsintensität eines Produktes
V	[]	Anteil der neuen Rohstoffe am Gesamtprodukt
W	[]	Anteil an Gesamtabfall der während des Kreislaufs entsteht
X	[]	Nutzungsindex

1 Einleitung

Der Flugverkehr ist jährlich für ca. 3% der weltweiten CO₂-Emissionen verantwortlich [122]. Diese Tatsache verdeutlicht den bedeutenden Einfluss der Luftfahrt auf die Klimaerwärmung. Spätestens seit der Unterzeichnung des Pariser -Klimaabkommens im Jahr 2015 ist das Thema aktueller denn je. Weltweit haben sich seit 2015 sukzessive alle Staaten verpflichtet, die vom Menschen verursachte Erderwärmung auf 1,5 °C zu begrenzen [24]. Im Zuge dessen wurden in den letzten Jahren vermehrt Initiativen ins Leben gerufen, die sich bewusst mit dem Thema Nachhaltigkeit und Klimaerwärmung auseinandersetzen. Eine davon ist die Ellen MacArthur Foundation. Diese wurde bereits 2009 gegründet und beschäftigt sich aktiv mit dem Thema Kreislaufwirtschaft und deren Umsetzung in der heutigen Gesellschaft. Ziel ist es dabei, durch die Vermeidung von Abfall nicht nur Ressourcen zu schonen, sondern auch CO₂ einzusparen welches bei der Neugewinnung von Rohstoffen entsteht [43].

Auch in der Luftfahrt wird im Rahmen verschiedener Initiativen versucht, Nachhaltigkeit zu fördern und Treibhausgasemissionen zu reduzieren. So wurde 2011 der "Flightpath 2050" entwickelt, mit dem Ziel, die in der EU ansässigen Luftfahrtunternehmen durch ehrgeizige Emissionsreduktionsziele (70 % weniger CO₂ und 90 % weniger NO_x pro Passagierkilometer bis 2050) zu stärken [1]. In diesem Zusammenhang wird weltweit an der Nutzung erneuerbarer Energien (z.B. Brennstoffzelle statt Gasturbinen), neuer Designs (z.B. Blended Wing Body statt des herkömmlichen Flugzeugdesigns) und neuer Materialien (z.B. CFK statt Aluminium) geforscht. Dabei geht es nicht nur darum, den direkten CO₂-Ausstoß durch Emission in der Nutzungsphase zu reduzieren, sondern auch den indirekten, z.B. durch den Einsatz umweltfreundlicherer Materialien, die bei der Herstellung weniger CO₂ verbrauchen und länger in der Kreislaufwirtschaft verbleiben können.

Die aktuelle Forschung zum Thema Nachhaltigkeit in der Luftfahrt konzentriert sich hauptsächlich auf die Nutzung des Flugzeugs am Ende seines Lebenszyklus. Hierbei ist in den letzten Jahren eine Lücke zwischen der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft und der Entsorgung von Flugzeugen am Ende ihres Lebenszyklus entstanden. Ziel der hier vorliegenden Masterarbeit ist es, diese Lücke zu schließen, indem vier Fragestellungen beantwortet werden:

1. *In welchen Bereichen wird die Kreislaufwirtschaft bereits heute in der Luftfahrt umgesetzt und wo treten Probleme auf?*
2. *Wie muss das Butterfly Diagramm der Ellen MacArthur Foundation für die Luftfahrt angepasst werden?*

3. *Inwiefern ist es möglich einen einheitlichen Bewertungsansatz für verschiedene Flugzeugtypen zu entwickeln, um diese ganzheitlich zu betrachten und wo treten Probleme auf?*
4. *Wie wirkt sich die Verwendung verschiedener Materialklassen auf die Umsetzbarkeit der Kreislaufwirtschaft aus?*

Bei der Bearbeitung der Thematik ist eine ganzheitliche¹ Betrachtung wichtig, da die gefundenen Möglichkeiten realistisch nur dann in der Industrie umgesetzt werden, wenn diese auch wirtschaftliche Vorteile bringen. Dabei stellt sich die grundlegende Frage nach dem Nutzen der Entwicklung von fortschrittlichen Flugzeugen, wenn diese aufgrund eines zu hohen Preises keinen Käufer finden. In der Vergangenheit hat sich immer wieder gezeigt, dass insbesondere diejenigen Technologien in der Luftfahrt eingesetzt werden, die neben ökologische auch ökonomische Vorteile bieten.

Die vorliegende Masterarbeit ist in vier Teile unterteilt (siehe Abbildung 1-1), um die verschiedenen Fragen zu beantworten. Kapitel 2 befasst sich mit dem Thema Kreislaufwirtschaft und deren Umsetzung in der Luftfahrt sowie den Hintergründen der in dieser Arbeit verwendeten Methoden. Im nächsten Kapitel wird das Butterfly Diagramm der Ellen MacArthur Foundation vorgestellt und an die Luftfahrt angepasst. In Kapitel 4 wird auf Basis der vorherigen Kapitel ein Tool vorgestellt, das zur Bewertung ökologischer, ökonomischer und kreislaufwirtschaftlicher Faktoren verschiedener Bauteile verwendet werden kann. Dabei wird eine umfassende Betrachtung des Fahrwerks des Airbus A320-200 und des Airbus A350-900 durchgeführt. Im Anschluss werden die erzielten Ergebnisse ausgewertet und interpretiert, bevor es im letzten Kapitel eine Zusammenfassung und ein Ausblick auf mögliche weitere Forschungsthemen gibt.

¹ ganzheitlich bedeutet hier sowohl, dass der gesamte Lebenszyklus des Flugzeugs berücksichtigt wird, von der Produktion der einzelnen Komponenten, über die Wartung bis zur Verschrottung am Ende des Lebenszyklus. Als auch, dass das Flugzeug unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten analysiert wird.

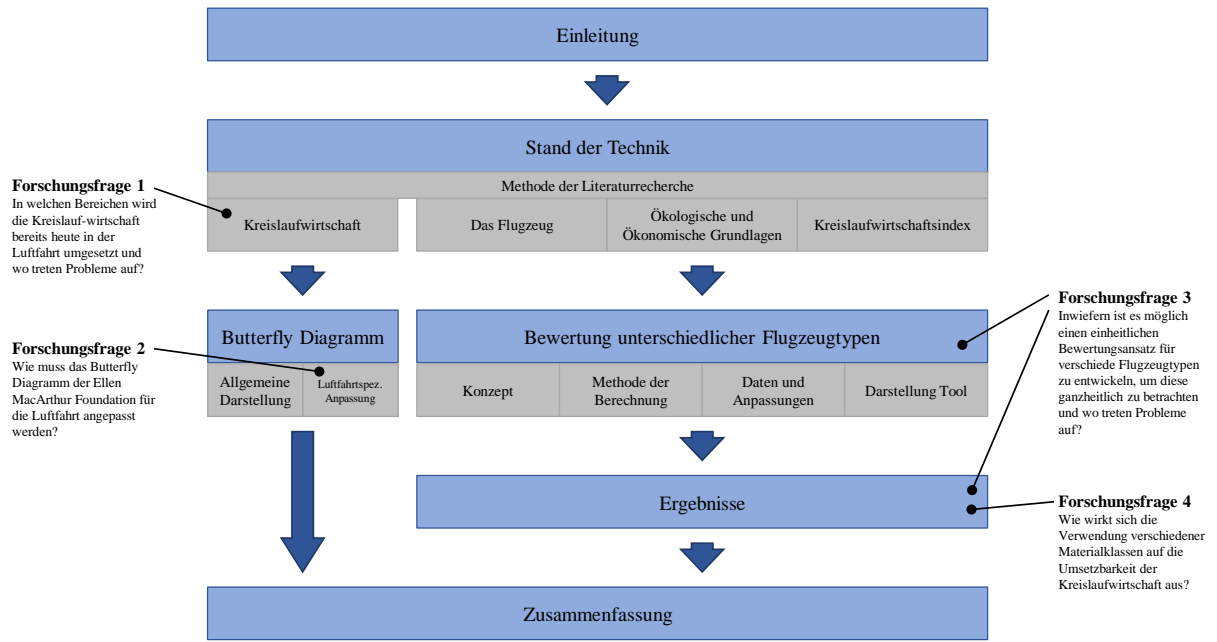


Abbildung 1-1: Übersicht über die Struktur der Masterarbeit

2 Stand der Technik

In diesem Kapitel werden die Grundlagen und der aktuelle Stand der Technik näher erläutert, auf deren Basis die spätere Bewertung der verschiedenen Flugzeugtypen erfolgt. In Abschnitt 2.1 wird das Vorgehen bei der Literaturrecherche erläutert. Anschließend wird in Abschnitt 2.2 der aktuelle Stand, der Grundgedanke und mögliche Umsetzungsstrategien der Kreislaufwirtschaft in der Luftfahrt, sowie die damit verbundenen Probleme, behandelt. In Abschnitt 2.3 schließt sich ein Unterkapitel zu Flugzeugen an, das die Unterschiede zwischen einem Airbus A320 und einem Airbus A350 hervorhebt und auf die Wartung eingeht. Anschließend daran wird in Kapitel 2.4 die Methode des Life-Cycle-Assessments (LCA) und Life-Cycle-Costings (LCC), einschließlich ihrer Vor- und Nachteile vorgestellt. Das Kapitel schließt mit einem kurzen Abschnitt zum Thema Kreislaufwirtschaftsindex.

2.1 Methode der Literaturrecherche

Zu Beginn der Masterarbeit wurde eine umfassende Literaturrecherche durchgeführt, um ein Verständnis der Grundlagen und des Konzepts der Kreislaufwirtschaft zu schaffen. Für die Durchführung dieser Literaturrecherche wurden die wissenschaftlichen Datenbanken "Scopus" und "Web of Science" genutzt. Der Ausgangspunkt dieser Recherche bildeten die Suchbegriffe "Circular AND Economy". Von diesem Ausgangspunkt aus wurde eine systematische Erweiterung der Suchbegriffe vorgenommen. Eine Übersicht der verschiedenen Suchbegriffe und deren Kombinationen ist in Tabelle 2-1 dargestellt. Hier wurden die Titel, Zusammenfassungen und Schlagwörter auf Übereinstimmung durchsucht.

Nr.	Suchbegriffe	Web of Science	Scopus	Zuletzt aktualisiert
01	Circular AND Economy	15.693	22.798	07.07.2023
02	Aircraft AND Recycling	241	523	07.07.2023
03	Aviation AND Recycling	94	209	07.07.2023
04	Aircraft AND Life AND Cycle AND Assessment	266	523	10.07.2023
05	Aviation AND Life AND Cycle AND Assessment	216	335	10.07.2023
06	Aircraft AND Circular AND Economy	14	41	10.07.2023
07	Aviation AND Circular AND Economy	16	37	10.07.2023
08	Aircraft AND End AND of AND Life	312	937	12.07.2023
09	Aviation AND End AND of AND Life	123	301	12.07.2023
10	Aircraft AND Life AND Cycle AND Costing	432	68	13.07.2023
11	Aviation AND Life AND Cycle AND Costing	163	24	13.07.2023

Tabelle 2-1: Suchbegriffe bei der Literaturrecherche

Bei der Durchsicht der Publikationen wurde eine Begrenzung auf die ersten 200 Einträge in der Sortierung nach "cited by (Highest)" vorgenommen. Diese Begrenzung wurde durchgeführt, um den Fokus auf die relevantesten Artikel zu legen und den Umfang der zu überprüfenden Literatur einzuschränken. Die Literaturrecherche bestätigt die Aktualität des Themas Kreislaufwirtschaft, das in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen hat (vgl. Abbildung 2-1). Etwa 65% der verwendeten Publikationen wurden in den letzten 10 Jahren und sogar 80% der Publikationen in den letzten 15 Jahren veröffentlicht.

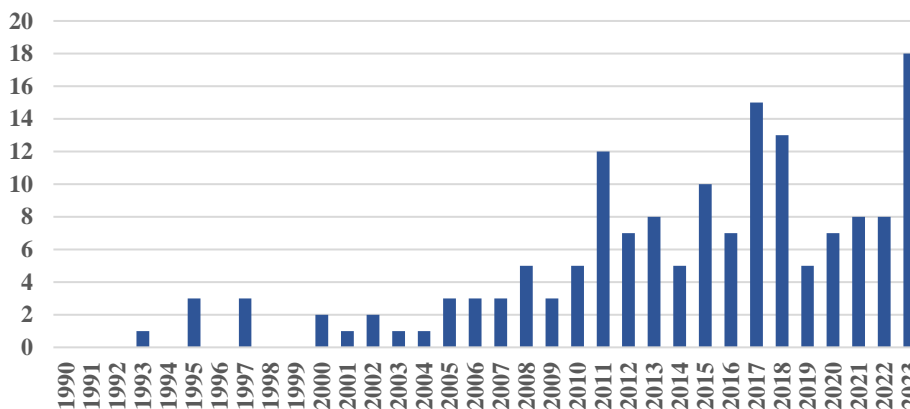


Abbildung 2-1: Anzahl der Veröffentlichungen pro Jahr der verwendeten Literatur

Neben den so identifizierten Publikationen wurden auch die Quellen dieser auf weiterführende Informationen durchsucht. Nach der Auswertung dieser Artikel hinsichtlich relevanter Daten wurden die gewonnenen Erkenntnisse zusammengetragen und im folgenden Abschnitt der theoretischen Grundlagen zusammengefasst.

2.2 Kreislaufwirtschaft

In diesem Abschnitt wird der aktuelle Stand der wissenschaftlichen Forschung dargelegt. Es werden die Grundlagen der Kreislaufwirtschaft erläutert und die gegenwärtige Umsetzung dieses Konzeptes in der Luftfahrt aufgezeigt. Des Weiteren werden potenzielle Herausforderungen bei der Implementierung der Kreislaufwirtschaft erörtert und mögliche Lösungsansätze aufgezeigt sowie deren Umsetzungsmöglichkeiten beschrieben.

2.2.1 Aktueller Stand

In gegenwärtigen Wirtschaftsstrukturen dominiert weitgehend ein lineares Wirtschaftsmodell, das dem Prinzip "take-make-dispose" folgt und mit einem erheblichen Ressourcenverbrauch einhergeht [106, S. 500]. In diesem Ansatz werden Ressourcen nach ihrer Herstellung und Verwendung zu Abfällen. Diese Vorgehensweise hat negative Auswirkungen auf die Umwelt

durch die Entnahme von Rohstoffen, führt zu einer Steigerung des CO₂-Ausstoßes und zu einer erhöhten Abfallmenge [21, S. 4].

Allerdings steht dieser Ansatz im Widerspruch zu den Zielen des Pariser Klimaabkommens, das die Begrenzung der globalen Erwärmung auf 1,5°C vorsieht. Daher wurden in den letzten Jahren verschiedene Konzepte, wie das der Kreislaufwirtschaft, entwickelt, um bis 2045 emissionsfrei zu werden, ohne das Konsumverhalten grundlegend ändern zu müssen. Vor dem Hintergrund aktueller Entwicklungen, wie beispielsweise, dass ein Drittel des weltweiten Plastikmülls weder gesammelt noch fachgerecht entsorgt wird und ein signifikanter Teil dessen in die Weltmeere gelangt, erlangt das Konzept der Kreislaufwirtschaft an Relevanz und Popularität. Dieses Konzept impliziert eine grundlegende Abkehr von den Grundsätzen einer linearen Wirtschaft, die auf dem Prinzip "größer, besser, schneller, weiter" beruht, hin zu einer nachhaltigen und verantwortungsvollen Nutzung von Ressourcen [121, S. 435].

2.2.2 Grundlagen

Bei der Betrachtung des Themas Kreislaufwirtschaft wird deutlich, dass keine einheitliche Definition für dieses Konzept existiert. Stattdessen gibt es verschiedene Definitionen, die sich im Umfang und Detailierungsgrad unterscheiden. Eine etablierte Definition stammt von der Ellen MacArthur Foundation. Diese beschreibt die Kreislaufwirtschaft als "an economy that is restorative and regenerative by design" [38, S. 46]. In ähnlicher Weise formulieren Geng und Doberstein ihre Definition, indem sie die Kreislaufwirtschaft als "realisation of a closed loop of materialsflow in the whole economic system". Geissdoerfer et al. (2017) fassen die zuvor genannten Definitionen zusammen und definieren Kreislaufwirtschaft als:

"a regenerative system in which resource input and waste, emission, and energy leakage are minimised by slowing, closing, and narrowing material and energy loops. This can be achieved through long-lasting design, maintenance, repair, reuse, remanufacturing, refurbishing, and recycling." [57, S. 764]

In allen vorliegenden Definitionen fällt auf, dass es nicht allein um das Konzept der Kreislaufwirtschaft selbst geht, sondern vielmehr um seine Integration in ein umfassendes Wirtschaftssystem. Aufgrund ihrer umfassenden Abdeckung und der Berücksichtigung aller wesentlichen Aspekte wird im weiteren Verlauf mit der Definition von Geissdoerfer gearbeitet.

Abbildung 2-2 zeigt ein vereinfachtes Modell der Kreislaufwirtschaft, in dem alle relevanten Schritte dargestellt sind. Dieses Modell kann als Grundlage dienen, um die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft für verschiedene Produkte zu überprüfen.



Abbildung 2-2: Vereinfachtes Modell der Kreislaufwirtschaft [36, S. 10]

Ziel der Kreislaufwirtschaft ist die Entkopplung von Wirtschaftswachstum und Ressourcenverbrauch durch die Schaffung eines regenerativen und restaurativen Systems [129]. Dazu soll die effiziente Nutzung von Ressourcen und die Abfallminimierung gefördert werden. In diesem Zusammenhang wurde von Keivanpour et. al (2015) das 3R-Konzept „Reduce, Reuse and Recycle“ eingeführt [82, S. 1103].

Die erste Säule des 3R-Ansatzes, *Reduce*, konzentriert sich auf die Minimierung des Ressourcenverbrauchs und die Verringerung des Abfallaufkommens. Hierbei werden diverse Strategien angewandt, darunter die Steigerung der Ressourceneffizienz und die Förderung nachhaltiger Produktionsprozesse. Unternehmen haben verschiedene Möglichkeiten, um dieses Ziel zu erreichen, wie beispielsweise die Implementierung schlanker Produktionsmethoden, die durch verbessertes Design den Produktlebenszyklus verlängern können. Ein weiteres Ziel besteht in der Förderung eines verantwortungsbewussten Konsumverhaltens. Auch Endverbraucherinnen und Endverbraucher können hier einen Beitrag leisten, indem sie bewusster konsumieren, ihre Konsumgewohnheiten überdenken und sich beispielsweise für nachhaltige Produkte entscheiden. [48, S. 137ff.; 97, S. 87ff.]

Die zweite Säule des 3R-Ansatzes, auch als *Reuse* bezeichnet, zielt darauf ab, den Lebenszyklus von Produkten zu verlängern und sie länger im Kreislauf zu halten [116, S. 90]. Dies geschieht durch Maßnahmen wie Reparatur, Aufarbeitung oder Wiederverwendung, um sicherzustellen, dass Produkte nach einmaliger Nutzung nicht sofort entsorgt werden müssen. Ein bekanntes

Beispiel für Wiederverwendung sind Second-Hand-Läden, in denen Privatpersonen ihre gut erhaltenen, gebrauchten Kleidungsstücke verkaufen, die dann von anderen Käuferinnen und Käufern erworben werden, wodurch der Lebenszyklus der Produkte erheblich verlängert wird [48, S. 137ff.; 97, S. 87ff.].

Die dritte Säule des 3R-Ansatzes, das *Recycling*, sollte als letzte Option in Betracht gezogen werden. Priorität hat immer die Umsetzung der beiden anderen Säulen. Recycling bezieht sich auf die Wiederverwendung von Abfällen zur Herstellung neuer Produkte. Diese Methode ermöglicht es, nicht wiederverwendbare Produkte von Deponien fernzuhalten und die darin enthaltenen Rohstoffe bestmöglich zu nutzen. Eine effektive Recyclingpraxis kann durch eine gezielte Gestaltung von Produkten in der Designphase erleichtert werden, um eine einfache Trennung der einzelnen Komponenten zu ermöglichen. Damit trägt Recycling zur Förderung einer nachhaltigen und zirkulären Wirtschaft bei. [48, S. 137ff.; 97, S. 87ff.]

Generell ist die gegenseitige Verknüpfung der 3R's von entscheidender Bedeutung, um eine optimale Umsetzung des Kreislaufwirtschaftskonzepts zu erreichen. Daher ist es unerlässlich, Produkte als Ganzes zu betrachten und unter Berücksichtigung aller 3R's zu optimieren. Dieser integrative Ansatz fördert eine nachhaltige und effiziente Nutzung von Ressourcen in der Kreislaufwirtschaft. [59, S. 15]

Der Lebenszyklus eines Werkstoffes, in der linearen Wirtschaft, (vgl. Abbildung 2-3) umfasst vier verschiedene Phasen. Zunächst existiert der Werkstoff als Rohstoff (Phase 1), bevor er über die Produktion (Phase 2) in die Nutzungsphase (Phase 3) eintritt. In der Nutzungsphase wird der Werkstoff zusammen mit anderen Werkstoffen im Produkt verwendet, bevor er am Ende der Nutzungsdauer entsorgt wird (Phase 4). [15, S. 4]



Abbildung 2-3: Lineare Wirtschaft

Um eine Abkehr von der linearen Wirtschaft hin zur Implementierung der Kreislaufwirtschaft zu erleichtern, werden zwei grundlegende Strategien verfolgt [22, S. 5]. Zum einen wird durch eine Verlangsamung der Ressourcenkreisläufe die Produktlebensdauer verlängert. Dies führt dazu, dass weniger Produkte produziert werden müssen und die Dauer der Ressourcennutzung maximiert wird. Andererseits besteht das Ziel darin, Kreisläufe zu schließen. Hierbei wird angestrebt, Materialien nach ihrer Nutzung wiederzuverwenden und so den Ressourcenverbrauch zu reduzieren [119; 120, S. 225ff.]. Ebenfalls ist es von Bedeutung, die Menge an Ressourcen, die pro Produkt verbraucht wird, zu minimieren [98].

Abbildung 2-4 zeigt die Abfallhierarchie nach Keivanpour. Ziel ist es, einen möglichst hohen Wert des ursprünglichen Produktes zu erhalten und gleichzeitig die Materialien möglichst lange in der Kreislaufwirtschaft zu halten. Dazu sollte immer zuerst versucht werden, Abfall zu vermeiden, beispielsweise durch angemessene Wartung des Produkts. Falls dies nicht möglich ist, sollte das Ziel darin bestehen, die anfallenden Abfälle wiederzuverwenden, auch wenn dies in einem anderen Nutzungskontext geschieht. Ist auch dies nicht möglich, sollte versucht werden, die verschiedenen Materialien des Produkts zu recyceln. Erst danach sollten die anfallenden Abfälle energetisch genutzt und anschließend als Abfall auf Deponien entsorgt werden. Dies ist die letzte Stufe der Abfallhierarchie und sollte nur als äußerste Maßnahme in Betracht gezogen werden. [82, S. 1109ff.]



Abbildung 2-4: Abfallhierarchie nach Keivanpour et al. (2015) [82, S. 1109]

2.2.3 Kreislaufwirtschaft in der Luftfahrt

Zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in der Luftfahrt gibt es zahlreiche Ansätze bzw. Ideen. Ziel ist es immer, den Ressourcenverbrauch und Abfall zu minimieren und die Lebensdauer des Produkts zu verlängern.

Der wichtigste Aspekt der Kreislaufwirtschaft in der Luftfahrt ist das Flugzeugrecycling. In den letzten Jahren hat sich hier der Trend weg von der Lagerung von Flugzeugen auf Flugzeugfriedhöfen hin zu der Idee entwickelt, das Flugzeug als Ganzes zu recyceln. In diesem Zusammenhang gibt es mittlerweile einige Unternehmen, die sich speziell auf das Flugzeugrecycling fokussieren [135].

In der einschlägigen Fachliteratur sind umfassende Ausführungen zum Themenkomplex des Flugzeugrecyclings dokumentiert. Beispielsweise werden verschiedene Vorgehensweisen dargestellt, wie das Flugzeugrecycling am EoL durchgeführt werden kann. In Abbildung 2-5 ist die Vorgehensweise nach Zhao et al. (2020) dargestellt [145, S. 5]. Weitere Vorgehensweisen zum Flugzeugrecycling finden sich in Elsayed et al. (2019), Keivanpour und Ait Kadi (2016) und Zahedi et al. (2015) [44, S. 281; 81, S. 1894; 144, S. 770]. An dieser Stelle wurde der Ansatz von Zhao et al. (2020) gewählt, da dieser detailliert aufschlüsselt, wie die einzelnen Komponenten wiederverwendet und das Flugzeug in seine Einzelteile zerlegt werden kann. Durch die Darstellung mit Hilfe eines Flussdiagramms und Ja-/Nein-Fragen ist es für den Betrachter ersichtlich, wie das jeweilige Teil recycelt werden kann.

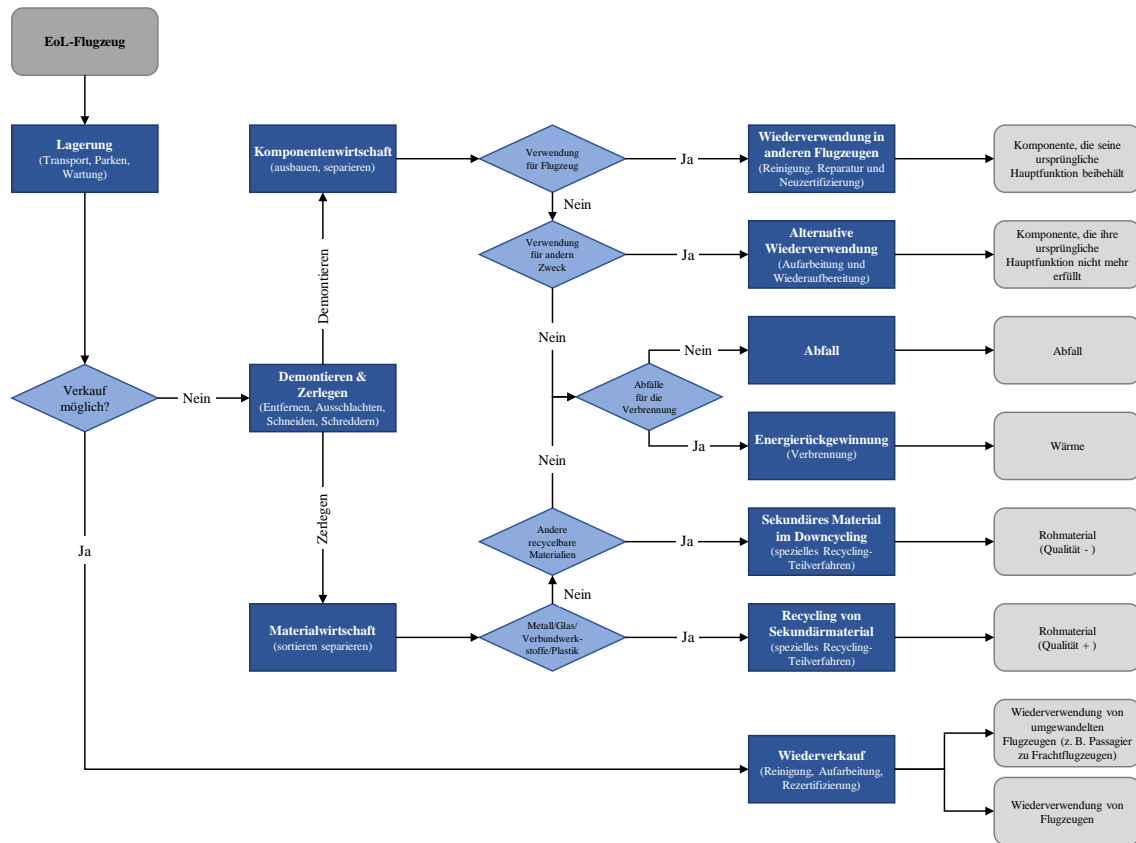


Abbildung 2-5: Prozessdarstellung vom Flugzeug Recycling nach Zhao et al. (2020) [145, S. 5]

Im Jahr 2006 führte Airbus eine Studie zum Thema Flugzeugrecycling durch, bekannt als das Projekt PAMELA (Process for Advanced Management of End-of-Life Aircraft). Obwohl die Studie selbst nicht öffentlich zugänglich ist, wird sie in zahlreichen wissenschaftlichen Artikeln zitiert. Die Ergebnisse dieser Untersuchung zeigten, dass etwa 85% des Flugzeugmaterials recycelt oder wiederverwendet werden können [82, S. 1104]. Besonders gut und leicht wiederverwendbare Komponenten sind Triebwerke, Fahrwerke sowie Avionik und Elektromotoren. Diese Teile werden oft am Ende ihrer Lebensdauer aus den Flugzeugen entfernt, überprüft und nach erfolgreicher Zertifizierung in andere Flugzeuge eingebaut [146, S. 3]. Des Weiteren werden die Innenausstattung, Türen und bestimmte Teile der Tragflächen oft für Schulungszwecke verwendet, beispielsweise für die Ausbildung von Flugbegleitern. Dadurch erhalten diese Komponenten eine verlängerte Lebensdauer [82, S. 1103]. Die Wiederverwendung von Flugzeugteilen stellt das vorrangige Ziel im Kontext der Kreislaufwirtschaft dar, um die Umweltbelastung so gering wie möglich zu halten [32, S. 3719].

Zusätzlich zur direkten Wiederverwendung von Flugzeugteilen ist es auch möglich, Teile und Materialien zu recyceln und in anderen Bereichen wie z.B. dem Schienenverkehr, der Automobilindustrie oder auch dem Maschinenbau einzusetzen. Diese Vorgehensweise ist für Bauteile

mit geringeren Anforderungen an die Werkstoffe sinnvoll, wie z.B. nicht tragende Konstruktionen. [82, S. 1112]

Neben der Airbus-Studie gibt es verschiedene weitere Studien, zum Thema Flugzeugrecycling. Im Jahr 2015 führte Boeing im Rahmen einer Studie das Recycling einer 30 Jahre alten Boeing 757 durch. Dabei konnte das Flugzeug innerhalb von 30 Tagen recycelt und ca. 90 % des Gesamtgewichts des Flugzeugs zurückgewonnen werden [140, S. 1292]. Im Rahmen des Projektes „Air Transport Vehicle Life Cycle Analysis“ (ATLA) wurde 2012 an der RWTH Aachen eine Methode entwickelt, die die Vorentwurfsphase unter ökologischen und ökonomischen Gesichtspunkten analysiert [55]. Dies stellt eine Ergänzung zu den bisherigen EoL-Konzepten dar. Dabei kann der Entwurf dahingehend optimiert werden, dass am EoL ein einfaches, kostengünstiges und umweltschonendes Recycling möglich ist [55]. In diesem Zusammenhang hat sich in Europa der Begriff „Ecodesign“ etabliert. Ca. 80 % der späteren Kosten und Umweltauswirkungen werden bereits in der Designphase festgelegt, weswegen eine frühzeitige Betrachtung zu erheblichen Einsparungen führt [100].

Für eine optimale Umsetzung der Kreislaufwirtschaft ist es wichtig, dass bereits in der Designphase das Produkt als Ganzes betrachtet und im Hinblick auf Kreislaufwirtschaftsstrategien optimiert wird. Der Fokus sollte dabei auf der Maximierung der Lebensdauer, der Reparaturfreundlichkeit und der Recyclingfähigkeit der einzelnen Komponenten liegen. Generell ist es sinnvoll, Produkte modular zu gestalten und so weit wie möglich zu standardisieren, um sowohl das Recycling als auch die Reparatur der Produkte zu vereinfachen und so die Lebensdauer zu maximieren. [139, S. 243ff.]

Die vorgestellten Ansätze verdeutlichen, dass eine Vielzahl von Ansätzen zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft existieren. Es fällt auf, dass die meisten Methoden auf das Ende des Produktlebenszyklus abzielen und nur wenige während des gesamten Produktlebenszyklus die Prinzipien der Kreislaufwirtschaft integrieren.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass das übergeordnete und allgemeine Ziel der Kreislaufwirtschaft darin besteht, die Umweltauswirkungen eines Produkts über seinen gesamten Lebenszyklus hinweg zu minimieren [34, S. 274]. Darüber hinaus kann ein Produkt als nachhaltig angesehen werden, wenn der Hersteller bereits während der Produktion nicht nur wirtschaftliche, sondern auch ökologische und soziale Aspekte berücksichtigt [79, S. 148]. Dies kann durch verschiedene Maßnahmen erreicht werden, darunter nachhaltige Produktgestaltung [78, S. 145f.], Wiederaufbereitung [102, S. 191ff.], die Implementierung nachhaltiger Lieferketten [118, S. 347ff.], Rückwärtslogistik und geschlossene Lieferketten [77, S. 487]. Auch im Koalitionsvertrag der deutschen Bundesregierung für die Legislaturperiode 2021-2025 ist das Thema Kreislaufwirtschaft angekommen. Hier geht es um das "Recht auf Reparatur", das Her-

steller dazu verpflichtet, defekte Geräte nicht direkt gegen neue auszutauschen, sondern Reparaturmöglichkeiten anzubieten. Dieser Schritt zielt darauf ab, Ressourcen nachhaltig zu schonen und bereits im Kreislauf befindliche Materialien länger zu erhalten [23].

2.2.4 Probleme bei der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft

Neben den verschiedenen Möglichkeiten gibt es einige Probleme, die bei der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in der Luftfahrt auftreten können und die Implementierung erschweren. Hier ist es wichtig, dass mögliche Probleme bereits im Vorfeld bekannt sind. Im Nachfolgenden werden fünf mögliche Probleme näher erläutert.

Das größte Problem ist die *Wirtschaftlichkeit*. In vielen Fällen ist es kostengünstiger, gebrauchte Produkte zu entsorgen und nicht wieder in eine Kreislaufwirtschaft zurückzuführen. Unternehmen, die heute eine lineare Wirtschaft verfolgen, müssen bei der Umstellung auf eine Kreislaufwirtschaft zunächst mit deutlich erhöhten Kosten rechnen. In diesem Zusammenhang ist häufig die Entwicklung neuer Technologien, Infrastrukturen oder auch Geschäftsmodelle notwendig, um die Kreislaufwirtschaft ganzheitlich zu implementieren [103, S. 114ff.]. Zudem stellt die Implementierung der Kreislaufwirtschaft oft keine direkt sichtbare Verbesserung für das Unternehmen dar, da z.B. durch nachhaltige Materialien weder der Umsatz steigt noch die Kosten sinken. Dies kann dazu führen, dass einige Unternehmen zurückhaltend sind, da sie den Wertbeitrag nicht direkt erkennen, sondern nur den ökonomischen Vorteil berücksichtigen [80, S. 804]. Zusätzlich besteht oft Unsicherheit darüber, ob sich die langfristigen Vorteile der Umstellung für das Unternehmen auszahlen werden [56, S. 779f.].

Auch auf der technischen Ebene treten Herausforderungen auf, da es häufig an kostengünstigen und energieeffizienten *Recycling-Technologien* mangelt. Zur Umsetzung der Kreislaufwirtschaft müssten solche Recyclingtechnologien stärker erforscht und weiterentwickelt werden [45, S. 209]. Ein Beispiel hierfür wäre der Bereich der Verbundwerkstoffe. Der zunehmende Einsatz von Verbundwerkstoffen im Flugzeugbau wird in den nächsten Jahren zu einem erhöhten Aufkommen von Verbundabfällen führen. [140, S. 1291] Gerade bei Verbundwerkstoffen ist das Recyclingvolumen derzeit noch sehr gering, da es meist mit hohen Kosten und hohem Aufwand verbunden ist. In diesem Zusammenhang sollte in Zukunft weiter an effizienten Recyclingverfahren geforscht werden, um die Wiederverwendung und damit den Verbleib in der Kreislaufwirtschaft zu gewährleisten [143, S. 53]. Laut Carberry (2008) können durch das Recycling und die Wiederverwendung von 1.000 Tonnen Kohlenstofffaserabfällen (was den Abfällen entspricht, die bei der Ausmusterung von 180 A320-200 oder 15 A350-900 anfallen) bis

zu 437,5 GWh Strom² eingespart werden [26]. Darüber hinaus kann der Materialverbrauch bereits in der Produktion durch die Automatisierung der Arbeitsschritte verringert werden. Dies reduziert neben der Schnittzeit auch die Abfallmenge [140, S. 1293]. Beim Recycling ist das Hauptziel dieses auf atomarer Ebene durchzuführen. Der Ansatz ermöglicht die Wiederverwendung verschiedener Rohstoffe ohne Materialverlust und schafft somit die Möglichkeit neue Rohstoffe und recycelte Materialien gleichwertig zu verwenden. Dadurch wird eine unendliche Wiederverwertung der verschiedenen Rohstoffe ermöglicht und ihr Erhalt in der Kreislaufwirtschaft gewährleistet. Da die Forschung in diesem Bereich bisher wenig fortgeschritten ist sind weitere Untersuchungen und Entwicklungen notwendig, um das volle Potenzial der Rohstoffe auszuschöpfen. [121, S. 436]

Als nächsten Punkt sollten hier die *rechtlichen Bestimmungen* genannt werden [125, S. 3ff.]. In der stark regulierten Luftfahrtbranche haben Sicherheit und Zertifizierung Vorrang. Jedes neue Material und jede neue Technologie muss zunächst eine umfangreiche Sicherheitsprüfung und Zertifizierung durchlaufen. Dies gilt auch für neue Konzepte im Bereich des Recyclings oder der Wiederverwendung von Materialien, was zu einem deutlich höheren Zeit- und Ressourcenaufwand führt. Zudem besteht bei der Erforschung neuer Technologien das Risiko, dass diese die hohen Anforderungen nicht erfüllen und später in der Praxis nicht eingesetzt werden können. [32]

Eine weitere mögliche Herausforderung ergibt sich aus der Notwendigkeit einer umfassenden *Zusammenarbeit verschiedener Akteure* für die effektive Umsetzung der Kreislaufwirtschaft [137, S. 271ff.]. Um eine vollständige Kreislaufwirtschaft umsetzen zu können, müssen Flugzeughersteller, Fluggesellschaften, Wartungsunternehmen und Recyclingpartner verstärkt zusammenarbeiten. Dies erfordert ein hohes Maß an Koordination und damit einen hohen Aufwand, der für das einzelne Unternehmen zunächst einen unsicheren/schwierig zu beziffernden Mehrwert bietet. Bei konsequenter Umsetzung können jedoch Ressourcen geschont, CO₂-Emissionen reduziert und langfristig Kosten gespart werden. [91, S. 36ff.]

Eine weitere Schwierigkeit ist der hohe *Globalisierungsgrad*. Die weltweite Verbreitung der Luftfahrt, bringt logistische Herausforderungen mit sich. Im Hinblick auf das Recycling und die Wiederverwendung von Teilen müssen diese oft über weite Strecken zum neuen Einsatzort oder zur Aufbereitungsanlage transportiert werden. Dies führt zu einem erhöhten Ausstoß von Emissionen, und zu einem erhöhten logistischen Aufwand, um die Bauteile dorthin zu transportieren, wo sie wiederverwendet werden können. [91, S. 44ff.] Ein Widerspruch zum eigentlichen Sinn des Recyclens bzw. der Kreislaufwirtschaft.

Der letzte Punkt ist die *extrem hohe Komplexität* der Luftfahrt. In fast allen Fällen dauert die Entwicklung neuer Flugzeuge Jahre und nicht selten müssen hierzu neue Technologien oder

² Dies entspricht dem durchschnittlichen jährlichen Stromverbrauch von ca. 175.000 Haushalten

Materialien entwickelt werden. Hier kann die Umsetzbarkeit der Kreislaufwirtschaft bereits in der Designphase berücksichtigt werden, was aber zu zusätzlichem Aufwand führt. Komplexer gestaltet sich die Optimierung von bestehenden Flugzeugen. Dies ist häufig mit erhöhten Investitionen verbunden, da die neuen Technologien auf den bestehenden Bauraum und Schnittstellen angepasst werden müssen. [80, S. 797ff.]

2.3 Das Flugzeug

Der folgende Abschnitt befasst sich mit dem grundsätzlichen Aufbau von Flugzeugen und den dabei verwendeten Materialien. Der Fokus liegt dabei auf den Modellen Airbus A320-200 und Airbus A350-900, da diese im weiteren Verlauf der Arbeit im Hinblick auf die umgesetzte Kreislaufwirtschaft genauer analysiert werden.

2.3.1 Allgemein

Umweltbelastung

Die größten Umweltauswirkungen hat ein Flugzeug während seiner Betriebsphase. Nach Howe et al. (2013) entfallen weniger als 1 % auf die Herstellungsphase und etwa 10 % auf die Entsorgungsphase. Der Rest entfällt auf die Betriebszeit des Flugzeugs [71, S. 37]. Darüber hinaus stellen Pierrat et al. (2021) fest, dass weniger als 1% der in der Luftfahrt eingesetzten Energie aus erneuerbaren Ressourcen stammt, da insbesondere im Bereich des Kerosins zum aktuellen Zeitpunkt fast ausschließlich fossile Brennstoffe verwendet werden [107, S. 7].

Flottenentwicklung

Die Prognosen für die kommerzielle Luftfahrt deuten darauf hin, dass die Branche in den kommenden Jahren weiterhin stark wachsen wird. Schätzungen gehen davon aus, dass sich die Verkehrsflugzeugflotte bis zum Jahr 2050 verdoppeln wird [30]. Boeing geht davon aus, dass „der weltweite Passagierverkehr bis 2030 um durchschnittlich 5,1 % pro Jahr und der Frachtverkehr um durchschnittlich 5,6 % pro Jahr zunehmen wird“ [126]. Um diesen Bedarf decken zu können, werden in den nächsten 20 Jahren weltweit voraussichtlich 33.500 Flugzeuge ausgeliefert [2; 46]. Dem stehen bis zu 15.500 Ausmusterungen von Airbus und Boeing im Zeitraum 2014-2033 gegenüber [3; 19]. Bereits im Jahr 2012 waren mehr als 5.000 Flugzeuge auf sogenannten Flugzeugfriedhöfen geparkt und warteten auf eine fachgerechte Weiterverwendung [115; 131].

Lebenszyklus

Ein Flugzeug durchläuft während seiner Lebensdauer verschiedene Phasen, die in Abbildung 2-6 schematisch dargestellt sind. Der Lebenszyklus beginnt mit der Materialgewinnung und

endet mit dem Recycling der Rohstoffe. Diese Darstellung entspricht dem Konzept von "Cradle to Cradle" (von der Wiege zur Wiege), bei dem das recycelte Material nach dem Recyclingprozess als neuer Grundstoff für weitere Produkte verwendet werden kann.

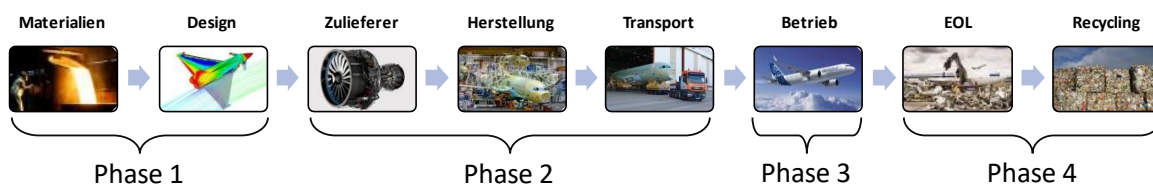


Abbildung 2-6: Verschiedene Stufen, die ein Flugzeug während der Lebenszeit durchläuft nach Franz et al. (2012) [54]

Je nach Autor werden die einzelnen Stufen zu unterschiedlichen Phasen zusammengefasst. Im Folgenden werden die vier Lebenszyklusphasen nach Franz et al. (2012) verwendet (vgl. Abbildung 2-6). Danach beginnt die erste Phase eines Flugzeugs immer mit der Entwurfs- und Entwicklungsphase, der die ersten beiden Phasen (Material und Design) zugeordnet werden können. Die zweite Phase stellt die Produktion dar, der die Stufen drei bis fünf (Zulieferer, Fertigung und Transport) zugeordnet werden können. In der dritten Phase (Betriebsphase) befindet sich das Flugzeug nach Franz et al. im Flugbetrieb und in der Wartung, bevor es in die letzte Phase, EoL und Recycling, übergeht [55]. Die Betriebsphase stellt dabei die Schlüsselphase dar, da sie mit Abstand die längste Zeit des Lebenszyklus in Anspruch nimmt und mit den höchsten Kosten, sowie bereits erwähnt den höchsten Umweltauswirkungen verbunden ist [141].

2.3.2 Unterschiede Airbus A320-200 und Airbus A350-900

Bis zur Einführung des Airbus A350 im Jahr 2013 bestanden Flugzeuge hauptsächlich aus Aluminium [52]. Seitdem steigt der Trend zur Verwendung von Kompositbauteilen stark an. Neben Aluminium und Verbundwerkstoffen werden aber noch viele weitere Materialien verwendet. Gerade bei den Kompositbauteilen ergeben sich zunehmend Schwierigkeiten im Rahmen der Kreislaufwirtschaft, da diese nur unter hohem Energieaufwand recycelt werden können und der in der Produktion entstehende negative Effekt auf die Ökobilanz deutlich höher ist [125, S. 4f.].

In Wimmer et al. (2016) werden die verschiedenen Werkstoffe im Flugzeugbau analysiert und in fünf Hauptkategorien eingeteilt. Die am meisten verwendete Kategorie bilden die Metalle/Legierungen. Dazu gehören z.B. Aluminium (Serie 2000, 5000, 6000 und 7000 [33, S. 355ff.], das bis vor wenigen Jahren bevorzugt für die Außenhaut von Flugzeugen verwendet wurde, aber auch Titan, Magnesium oder Edelstahl. Hybridbauteile stellen eine zunehmend an Bedeutung gewinnende Kategorie dar. Gerade in den letzten Jahren ist häufig eine Umstellung

auf faserverstärkte Rumpfsektionen oder auch Tragflächen zu beobachten. Hierbei werden bevorzugt kohlenstoffverstärkte Kunststoffe (CFK), aber auch glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) oder auch aramidfaserverstärkte Kunststoffe (AFK) eingesetzt. Neben diesen beiden Hauptkategorien gibt es noch drei für den Flugzeugbau weniger relevante Kategorien wie Polymere (z.B. Epoxid, Polyetherimid (PEI), Phenolharz oder Polyphenylsulfid (PPS)), Schäume (z.B. PVC- oder PUR-Schaum), Fasern (z.B. Kohlenstofffasern, Glasfasern oder Aramidfasern) und sonstige Materialien (z.B. Befestigungsmaterialien oder Grundierungen) [138, S. 491].

Abbildung 2-7 zeigt in diesem Zusammenhang die Materialverteilung in einem Airbus A350-900. Dabei wurde nur die Außenansicht berücksichtigt.

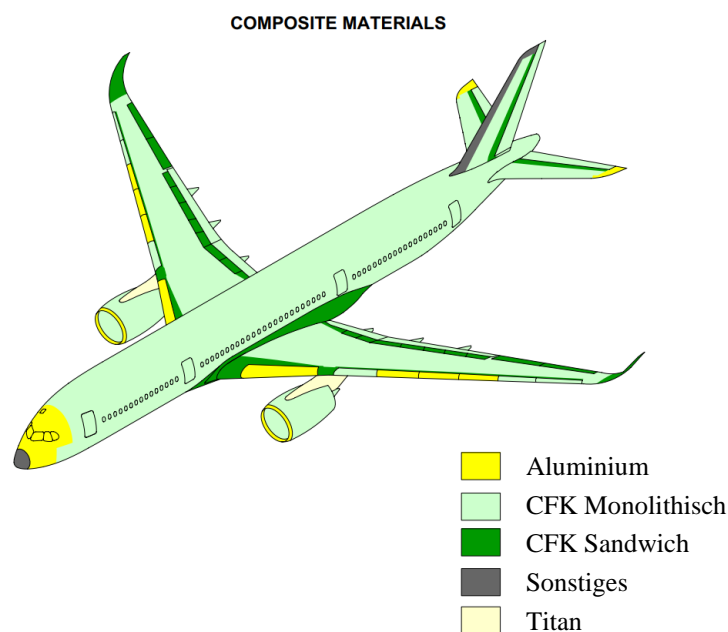


Abbildung 2-7: Materialien die in einem Airbus A350-900 verbaut sind und wo diese verbaut sind [4, S. 397]

In Tabelle 2-2 sind die wichtigsten Materialien übersichtlich aufgeführt, einschließlich ihres prozentualen Anteils an der Gesamtmasse sowie ihrer absoluten Masse in Kilogramm.

Material	A320-200		A350-900	
	Anteil an Gesamtmasse [%]	Masse [kg]	Anteil an Gesamtmasse [%]	Masse [kg]
Aluminium	68	25.227	19	23.835
Verbundwerkstoffe	15	5.565	53	66.486
Stahl	9	3.339	6	7.527
Titan	6	2.226	14	17.562
Sonstiges	2	742	8	10.036
Gesamt		37.098		125.446

Tabelle 2-2: Materialverteilung beim Airbus A320-200 und Airbus A350-900 ohne Triebwerk [4, S. 24ff.; 7, S. 26ff.; 12, S. 1302; 90]

Durch die Veränderung der eingesetzten Materialien ändern sich die Fertigungsprozesse, gerade zu Beginn der Einführung von CFK wurden viele Prepregs³ noch manuell zugeschnitten, was zu einem hohen Materialverlust von über 60% führte. Dieser Prozess ist mittlerweile weitestgehend automatisiert, wodurch nicht nur die Materialausnutzung verbessert werden konnte, sondern auch die Schneidzeiten und damit die Herstellungszeiten der einzelnen Bauteile deutlich reduziert werden konnten [140, S. 1293].

2.3.3 Wartung

Ein wichtiger Bestandteil zur Aufrechterhaltung der Lufttüchtigkeit eines Flugzeuges ist die Wartung. [67, S. 14f.] Dabei wird grundsätzlich zwischen scheduled Maintenance (geplante Wartung) und unscheduled Maintenance (ungeplante Wartung) unterschieden.

Bei der geplanten Wartung gibt es festgelegte Wartungsintervalle, in denen ein Teil geprüft oder ausgetauscht werden muss. [67, S. 223ff.] Diese Austausch- oder Prüfintervalle sind im Maintenance Planning Document (MPD) eines Flugzeuges dokumentiert. [4; 7] Darüber hinaus gibt es bei der geplanten Wartung zwei verschiedene Arten von Checks. Zum einen gibt es Checks, die den Flugbetrieb nicht unterbrechen und z.B. direkt auf dem Vorfeld durchgeführt werden können (Ramp Check oder Pre-Flight Check), zum anderen gibt es Checks, die den Flugplan unterbrechen und zu längeren Standzeiten führen (A-Check, C-Check oder D-Check). Die Kontrolle des Reifenprofils oder auch des Reifendrucks gehört beispielsweise zur ersten Art, der Austausch und die Wartung des gesamten Fahrwerks zur zweiten Art. [85, S. 308f.]

Die ungeplante Wartung muss dagegen immer dann durchgeführt werden, wenn z.B. während des Fluges ein Fehler auftritt oder bei der Inspektion ein Defekt festgestellt wird. [67, S. 223ff.]

³ Prepregs (Kurzform für preimpregnated fibers) sind vorimprägnierte textile Faserhalbzeuge welche zur Herstellung von Kompositbauteilen verwendet werden [89].

Diese Art der Wartung ist nur sehr schwer vorhersehbar und wird daher bei der weiteren Betrachtung (Abschnitt 4.3.2) nicht weiter berücksichtigt.

2.3.4 Das Fahrwerk

Das Fahrwerk wird im ATA (Air Transport Association) Chapter 32 beschrieben und trägt wesentlich zur Sicherheit von Start und Landung bei. Es ist eine der wenigen Komponenten, die nur für Start und Landung verwendet wird und sich während des gesamten Fluges als zusätzlicher Ballast aber ohne primären Nutzen an Bord des Flugzeugs befindet. Für Start und Landung ist es jedoch unverzichtbar und muss dabei das gesamte Gewicht des Flugzeugs aufnehmen. Dabei ist das Fahrwerk so konzipiert, dass es auch bei einem Ausfall der Hydraulik noch ausgefahren werden kann und deshalb so eingebaut ist, dass es nach dem Öffnen der Türen durch die Schwerkraft von selbst herunterfällt und durch den Fahrtwind einrastet.

A320-200

Das Fahrwerk des Airbus A320-200 besteht aus zwei zweirädrigen Hauptfahrwerken und einem zweirädrigen Bugfahrwerk (Abbildung 2-8).

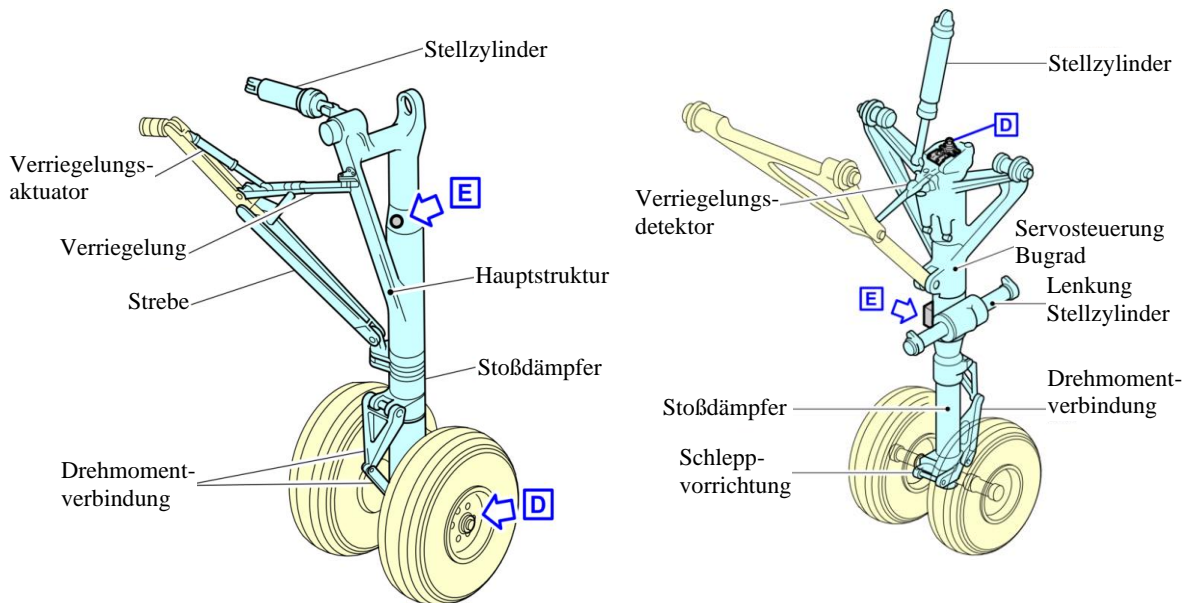


Abbildung 2-8: Hauptfahrwerk (links) und Bugfahrwerk (rechts) A320-200 [7, S. 80ff.]

Für die weitere Analyse wurde das Fahrwerk in vereinfachter Form angenommen. Vgl. dazu Abschnitt 4.3.2.

A350-900

Das Fahrwerk des Airbus A350-900 besteht aus zwei vierrädrigen Hauptfahrwerken und einem zweirädrigen Bugfahrwerk (Abbildung 2-9).

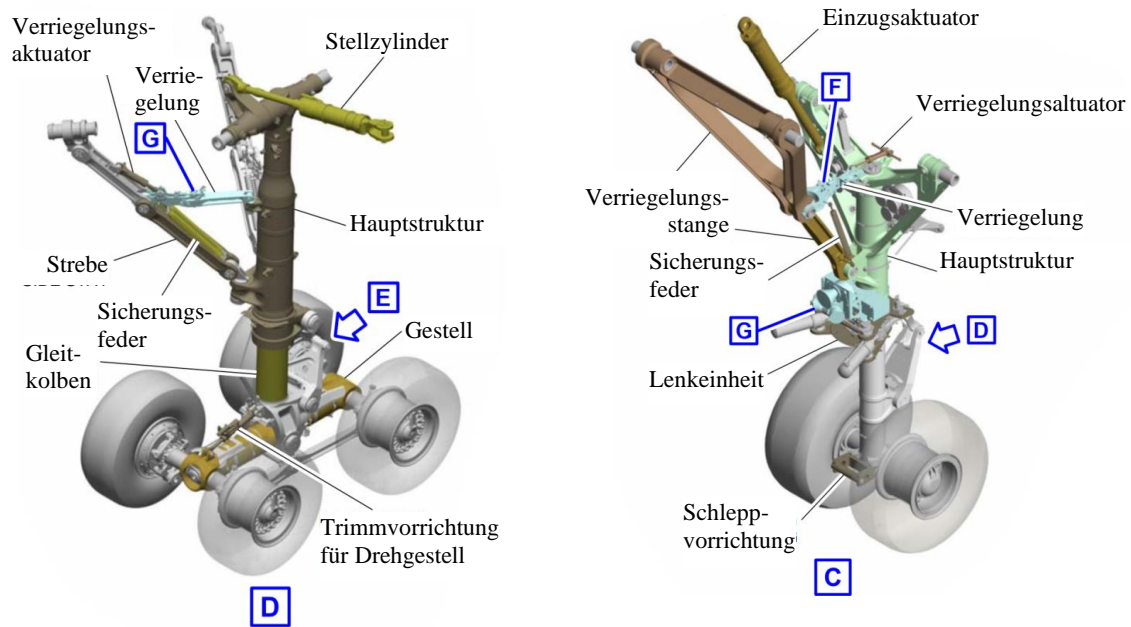


Abbildung 2-9: Hauptfahrwerk (links) und Bugfahrwerk (rechts) A350-900 [4, S. 90ff.]

Für die weitere Analyse wurde das Fahrwerk ebenfalls in vereinfachter Form angenommen. Vgl. dazu Abschnitt 4.3.2.

2.4 Ökonomische und Ökologische Grundlagen

Dieser Abschnitt behandelt die Grundlagen der Ökobilanz (Life Cycle Assessment, LCA) und der Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing, LCC). Es wird ein Überblick über die Grundlagen gegeben, Vor- und Nachteile der jeweiligen Methode werden vorgestellt und verschiedene Arten sowie Anwendungsmöglichkeiten erläutert. Die in diesen Abschnitt erläuterten Grundlagen werden in Kapitel 4 dazu verwendet um eine ganzheitliche Betrachtung des Fahrwerks des Airbus A320-200 und des Airbus A350-900 durchzuführen.

2.4.1 Ökologische Grundlagen

Durch die Ökobilanzierung ergibt sich eine Möglichkeit, um den Lebenszyklus eines Produktes in Hinblick auf ökologische Faktoren zu quantifizieren.

Grundlagen

Die Ökobilanzierung (Life-Cycle Analysis, LCA) ist ein systematischer Ansatz zur Bewertung der Umweltauswirkungen eines Produkts, eines Prozesses oder einer Dienstleistung [62, S. 6]. Dabei ist es möglich, die Auswirkungen über den gesamten Lebenszyklus zu betrachten und nicht nur zu einem bestimmten Zeitpunkt oder für eine bestimmte Phase, wie es bei anderen Methoden häufig der Fall ist [74, S. 4f.]. Bei der LCA werden alle In- und Outputfaktoren berücksichtigt, die während des Lebenszyklus eines Produktes auftreten, einschließlich Rohstoffe, Herstellung, Nutzung und Entsorgung [16, S. 45].

Darüber hinaus werden bei der Durchführung der Ökobilanzierung alle relevanten Umweltfaktoren berücksichtigt. Dazu gehören beispielsweise Energieverbrauch, Ressourcenverbrauch, Treibhausgasemissionen, Wasserverbrauch, Abfallaufkommen sowie Auswirkungen auf Menschen und Ökosystem. Übergeordnetes Ziel ist eine ganzheitliche Bewertung, die alle Einflussfaktoren berücksichtigt, um Entscheidungen (z.B. bei der Abwägung zwischen zwei Produkten) fundierter treffen zu können und Umweltauswirkungen zu minimieren. [88, S. 904]

Zusätzlich kann die Ökobilanz auch dafür genutzt werden, Verbesserungspotenziale aufzudecken und Prozesse besser zu verstehen, um nachhaltige Produkte zu entwickeln. Damit kann die Ökobilanz eine Doppelrolle einnehmen, wenn sie nicht nur als reine Bewertungsmethode eingesetzt wird, sondern auch, um aktiv Verbesserungen herbeizuführen und verschiedene Möglichkeiten gegeneinander abzuwägen. [83, S. 537]

Vorgehensweise

Eine Ökobilanz wird in der Regel in vier Schritten durchgeführt, die im Folgenden erläutert werden (vgl. Abbildung 2-10). [121, S. 58ff]

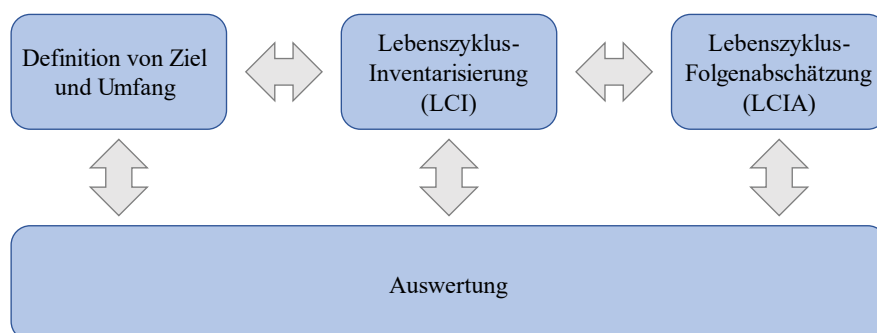


Abbildung 2-10: Vier Schritte der Ökobilanz [74, S. 17]

1. Definition von Ziel und Umfang:

Im ersten Schritt werden Ziel und Grenzen der durchzuführenden Ökobilanz festgelegt. Dabei wird das zu bewertende Produkt (der Prozess oder die Dienstleistung) eindeutig identifiziert, die funktionelle Einheit (z.B. ein Kilogramm vom Produkt) festgelegt und die Systemgrenzen bestimmt. Außerdem werden die zu betrachtenden Umweltwirkungskategorien festgelegt. [18, S. 83ff.]

2. Lebenszyklus-Inventarisierung (LCI):

Im zweiten Schritt der Ökobilanz werden alle vorhandenen Inputs (z.B. Rohstoffe, Energie oder Wasser) und Outputs (z.B. Emissionen oder Abfälle), die während des Lebenszyklus des Produkts entstehen, identifiziert. Dabei können sowohl Primärdaten (direkt vom Hersteller) als auch Sekundärdaten (z.B. aus Datenbanken) verwendet werden, um alle Einflussfaktoren zu ermitteln. [17, S. 119ff.]

3. Lebenszyklus-Folgenabschätzung (LCIA):

Im Anschluss werden die in Schritt 2 gesammelten Daten analysiert und bewertet. Hierbei gibt es verschiedene Möglichkeiten, die gesammelten Daten hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen zu analysieren. Ziel ist es, die Umweltauswirkungen in diesem Teilschritt zu quantifizieren und vergleichbar zu machen. [114, S. 168ff.]

4. Auswertung:

Im letzten Schritt werden die Daten und Ergebnisse interpretiert und kommuniziert. Dabei ist es wichtig, die Ergebnisse kritisch zu hinterfragen und objektiv darzustellen. [65, S. 324ff.]

Vorteile und Nachteile

Eine Stärke der Ökobilanz liegt in ihrer wissenschaftlich fundierten Methodik. Sie basiert auf den Normen DIN ISO 14040 und 14044, die ein standardisiertes Vorgehen gewährleisten. Dies ermöglicht die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit der Ergebnisse, was für eine fundierte Entscheidungsfindung ermöglicht [74; 75]. Ein weiterer Vorteil der Ökobilanz besteht darin, dass Verbesserungsmöglichkeiten identifiziert werden können. Durch die ganzheitliche Betrachtung werden Umweltauswirkungen sichtbar gemacht, und es ist möglich, Bereiche zu identifizieren, in denen Werte verloren gehen. Darüber hinaus ist es möglich verschiedene Materialien gegeneinander abzuwägen und so bereits in der Design Phase das Produkt hinsichtlich der späteren Umweltauswirkungen zu optimieren [58, S. 4]. Die Ökobilanzierung ermöglicht es, neben einer rein ökologischen Betrachtung, auch die Kosten oder sozialen Auswirkungen eines Produktes zu betrachten. Dies ermöglicht die verschiedenen Interessen der Stakeholder besser zu berücksichtigen und das Produkt in Hinblick auf die unterschiedlichen Faktoren zu optimieren [92].

Allerdings sind mit der Ökobilanzierung auch einige Herausforderungen verbunden. Die umfassende Bewertung erfordert eine große Menge an Daten, um komplexe Zusammenhänge genau zu erfassen. Die Beschaffung dieser Daten ist häufig mit hohem Aufwand verbunden und erfordert eine genaue Kenntnis der verschiedenen Prozesse [88, S. 910]. Ein weiterer Kritikpunkt betrifft den begrenzten Umfang der Bewertung, da die Ökobilanz sich oft stark auf Umweltauswirkungen konzentriert und soziale oder ökonomische Faktoren zu wenig berücksichtigt. Um diesem Problem zu begegnen, wurden zwar Methoden wie die Sozialbilanz und die Lebenszykluskostenrechnung eingeführt, dennoch liegt der Fokus in den meisten Fällen ausschließlich auf der Umweltbewertung [127, S. 297]. Zusätzlich erfordert die Ökobilanzierung, dass verschiedene Annahmen getroffen werden, da es oft nicht möglich ist, für alle Inputs oder Outputs exakte Daten zu finden. Dies führt zu einer gewissen Unsicherheit oder Ungenauigkeit in den generierten Ergebnissen. Es ist daher notwendig, diese Annahmen genau zu dokumentieren und zu kennzeichnen, um ihre Robustheit zu überprüfen und gegebenenfalls anzupassen [130].

IPCC Methode

Die IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change) Methode eignet sich zur Abschätzung der Lebenszyklusfolgen eines Produktes (Schritt 3 der LCA). Hierbei wird nur ein Faktor berücksichtigt, was eine schnelle, jedoch sehr grobe Abschätzung eines Produkts ermöglicht. Bei der IPCC-Methode wird jedem Material ein Global Warming Potential (GWP) zugeordnet. Das GWP definiert den über die Zeit integrierten Erwärmungseffekt bei sofortiger Freisetzung einer Masseneinheit (ein Kilogramm) eines bestimmten Treibhausgases in die heutige Atmosphäre im Vergleich zu Kohlendioxid. [109, S. 11] Der Vorteil dieser Methode ist, dass die unterschiedlichen Verweilzeiten der Gase in der Atmosphäre berücksichtigt werden. Gängige Betrachtungszeiträume sind 20 (GWP 20), 100 (GWP 100) und 500 (GWP 500) Jahre. Die Einheit für das GWP ist „kgCO₂eq“, was für Kilogramm CO₂-Äquivalente steht [64, S. 14; 70].

Zur Bestimmung des GWP eines Materials kann auf eine der zahlreichen Datenbanken zurückgegriffen werden, die eine direkte Bestimmung des Wertes für verschiedene Materialien ermöglichen. Dieses Vorgehen vereinfacht die Bewertung erheblich, da bei der Bestimmung des GWP viele Einflussfaktoren (z.B. Rohstoffgewinnung, Transport, Herstellungs- und Verarbeitungsprozesse, Nutzungsphase und Entsorgung [113, S. 46]) berücksichtigt werden müssen, die eine eigene Bewertung sehr aufwendig machen. Eine dieser Datenbanken ist Ecoinvent [136]. Sie wurde speziell für den Zweck der Ökobilanzierung aufgebaut und enthält GWP 100-Werte für über 18.000 Materialien [113, S. 36]. Diese Datenbank wurde für weitere Analysen verwendet, da jeder Eintrag der Ecoinvent Datenbank einen langen Validierungsprozess durchläuft, bevor er in der Datenbank gelistet wird und im Vorhinein u.a. von mehreren Experten bestätigt

werden muss. Allerdings ist zu beachten, dass es sich nicht um eine luftfahrtspezifische Datenbank handelt. Daher können die verwendeten Daten geringfügig von den tatsächlichen Materialdaten für die Luftfahrtindustrie abweichen [35].

2.4.2 Ökonomische Grundlagen

Die Lebenszykluskostenrechnung stellt neben der Ökobilanz eine weitere Methode zur Bewertung von Produkten oder Dienstleistungen im Hinblick auf die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft dar.

Grundlagen

Die Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing, LCC) befasst sich mit den Gesamtkosten, die während des Besitzes und Betriebs eines Produkts, der Durchführung eines Prozesses oder der Erbringung einer Dienstleistung entstehen. Dabei werden nicht nur die Anschaffungskosten berücksichtigt, wie es bei der klassischen Kostenanalyse der Fall ist, sondern sämtliche Kosten, die während des Lebenszyklus entstehen [72, S. 28].

Ziel ist es, die mit den verschiedenen Alternativen verbundenen Kosten zu quantifizieren, um eine fundierte Entscheidung treffen zu können. Durch diesen Ansatz ist es möglich, die Gesamtkosten zu ermitteln, um die kosteneffizienteste Option zu wählen und langfristig wirtschaftliches Handeln zu ermöglichen [27, S. 149ff.].

Vorgehensweise

Die Lebenszykluskostenanalyse umfasst die folgenden sechs Schritte [112, S. 381ff.].

1. Identifizierung der Kosten

Im ersten Schritt der LCC werden die Systemgrenzen festgelegt, sowie alle relevanten Kosten, die mit dem Produktlebenszyklus verbunden sind, identifiziert und kategorisiert. Dazu gehören z.B. Anschaffungs-, Betriebs- und Entsorgungskosten, aber auch Wartungs- und Personalkosten. Hierbei werden nicht nur direkte Kosten berücksichtigt, sondern auch indirekte Kosten. In diesem Schritt geht es explizit darum, festzustellen, welche Kosten entstehen, die Abschätzung der Höhe der Kosten ist hierbei irrelevant.

2. Zeitwert des Geldes

Im Gegensatz zur Ökobilanz ist die Einheit, in der der Output gemessen wird (hier monetär), nicht konstant. Der Wert des Geldes ändert sich im Laufe der Zeit, z.B. durch Inflation. Dies muss bei der LCC, bei Produkten mit langer Lebensdauer, berücksichtigt werden. Aus diesem Grund muss in diesem Schritt der Diskontfaktor der zukünftigen Kosten festgelegt werden.

3. Schätzung der Kosten

Im dritten Schritt werden die Kosten der Kategorien (aus Schritt 1) ermittelt. Hierzu können z.B. Datenbanken, Aufzeichnungen, Expertenschätzungen oder auch Branchendurchschnitte herangezogen werden. Alle Kosten, die auf Schätzungen beruhen, sollten sinnvoll und nachvollziehbar ermittelt und kenntlich gemacht werden.

4. Berechnung der Lebenszykluskosten

Nach der Ermittlung der einzelnen Kosten können die Lebenszykluskosten berechnet werden. Hier muss der Zeitwert des Geldes (Schritt 2) berücksichtigt werden. Als Ergebnis der Berechnung erhält man die Gesamtkosten, die während des Produktlebenszyklus entstehen.

5. Sensitivitätsanalyse

Da der dritte Schritt mit Schätzungen und Annahmen verbunden ist, ist es erforderlich, eine Sensitivitätsanalyse durchzuführen. Dabei wird getestet, wie sich eine Variation der wichtigsten Annahmen auf das Ergebnis auswirkt. Die Variation erlaubt eine Aussage über die Robustheit der Kostenschätzung. Je robuster die Daten sind, desto geringer ist die Wahrscheinlichkeit, dass sich die Kosten im Nachhinein signifikant ändern, wenn sich Inputfaktoren ändern.

6. Entscheidungsfindung und Vergleich

Im letzten Schritt werden die zuvor ermittelten Kosten miteinander verglichen und eine Entscheidung getroffen. In der Regel fällt die Entscheidung auf das Produkt mit den niedrigsten Gesamtkosten oder dem besten Preis-Leistungs-Verhältnis. In diesem Schritt können jedoch auch andere Faktoren (wie z.B. Ergebnisse der Ökobilanz) berücksichtigt werden.

Vorteile und Nachteile

Die Lebenszykluskostenrechnung (Life Cycle Costing, LCC) bietet eine ganzheitliche Analyse aller Kosten, die während des gesamten Lebenszyklus eines Produkts anfallen [60, S. 573]. Dies ermöglicht, versteckte Kosten zu identifizieren und eine umfangreiche Kosten-Nutzen-Analyse durchzuführen, was eine Entscheidung unter Berücksichtigung aller Einflussfaktoren ermöglicht [60, S. 574f.]. Es gibt jedoch auch einige Herausforderungen bei der Durchführung einer LCC. Die Datenverfügbarkeit ist oft begrenzt, was die Genauigkeit beeinträchtigt, und die Berücksichtigung zukünftiger Kosten ist durch Unsicherheiten in der Inflationsentwicklung erschwert [31, S. 569ff.; 60, S. 572]. Außerdem ist der Anwendungsbereich begrenzt und konzentriert sich hauptsächlich auf finanzielle Aspekte, während andere Faktoren wie Umweltauswirkungen vernachlässigt werden [60, S. 572]. Trotzdem kann die LCC, ähnlich wie die Lebenszyklusanalyse (LCA), als Entscheidungshilfe dienen, um langfristig optimale Entscheidungen zu treffen.

2.5 Kreislaufwirtschaftsindex

Der Kreislaufwirtschaftsindex (Material Circularity Indicator, KWI) wurde von der Ellen MacArthur Foundation eingeführt. Dieser dient dazu, die Kreislauffähigkeit von Materialien zu quantifizieren und vergleichbar zu machen. Der MCI nimmt einen Wert zwischen 0 und 1 an, wobei 0 für einen linearen Materialfluss (keine Wiederverwendung) und 1 für eine vollständige Wiederverwendung (oder Recycling) der Materialien steht. Dabei werden zwei Aspekte analysiert. Zum einen wird berücksichtigt, aus welchen Rohstoffen das Produkt hergestellt wird (neu, recycelt, wiederverwendet), zum anderen, was mit den Materialien nach der Nutzung geschieht (Entsorgung, Wiederverwendung, Recycling, etc.). [42, S. 9f.]

Der Materialfluss, der als Grundlage für die Berechnung des MCI dient, ist in Abbildung 2-11 dargestellt.

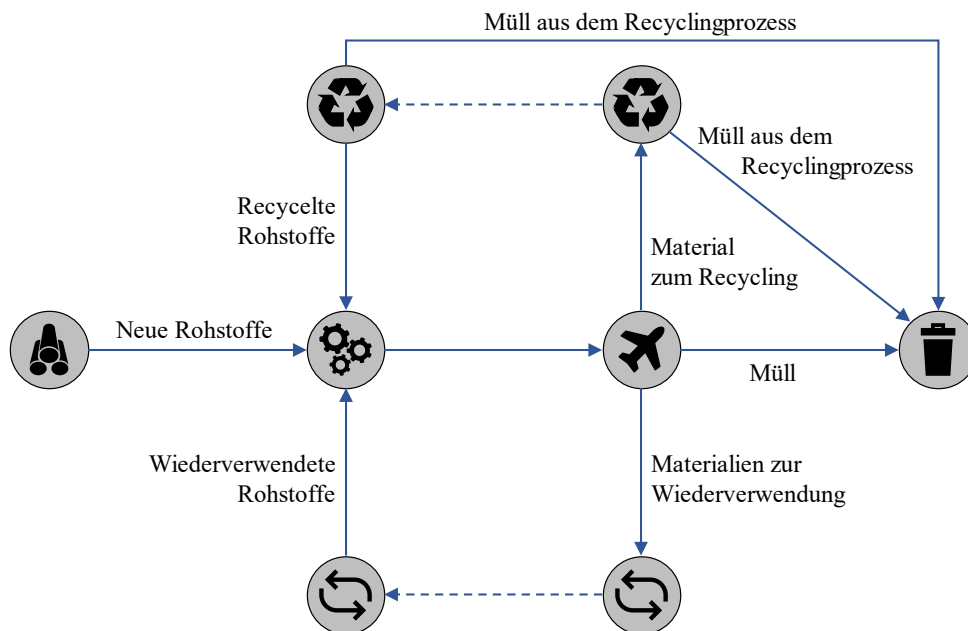


Abbildung 2-11: Darstellung des Materialfluss nach Ellen MacArthur Foundation (2015) [42, S. 8]

3 Butterfly-Diagramm

Im folgenden Kapitel wird das Butterfly-Diagramm diskutiert. Dabei wird in Abschnitt 3.1 der Aufbau und die Anwendungsmöglichkeiten des Diagramms erklärt. In Abschnitt 3.2 wird eine mögliche Adaption für die Luftfahrt vorgestellt und Beispiele für die verschiedenen Kreisläufe im Butterfly-Diagramm erläutert.

3.1 Allgemeine Darstellung

Das Butterfly-Diagramm (vgl. Abbildung 3-1) wurde von der Ellen MacArthur Foundation im Rahmen ihrer Kreislaufwirtschaftskampagne veröffentlicht. Es verdeutlicht die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in der Praxis (einschließlich der Umsetzung des 3R-Prinzips) und stellt den kontinuierlichen Materialfluss dar.

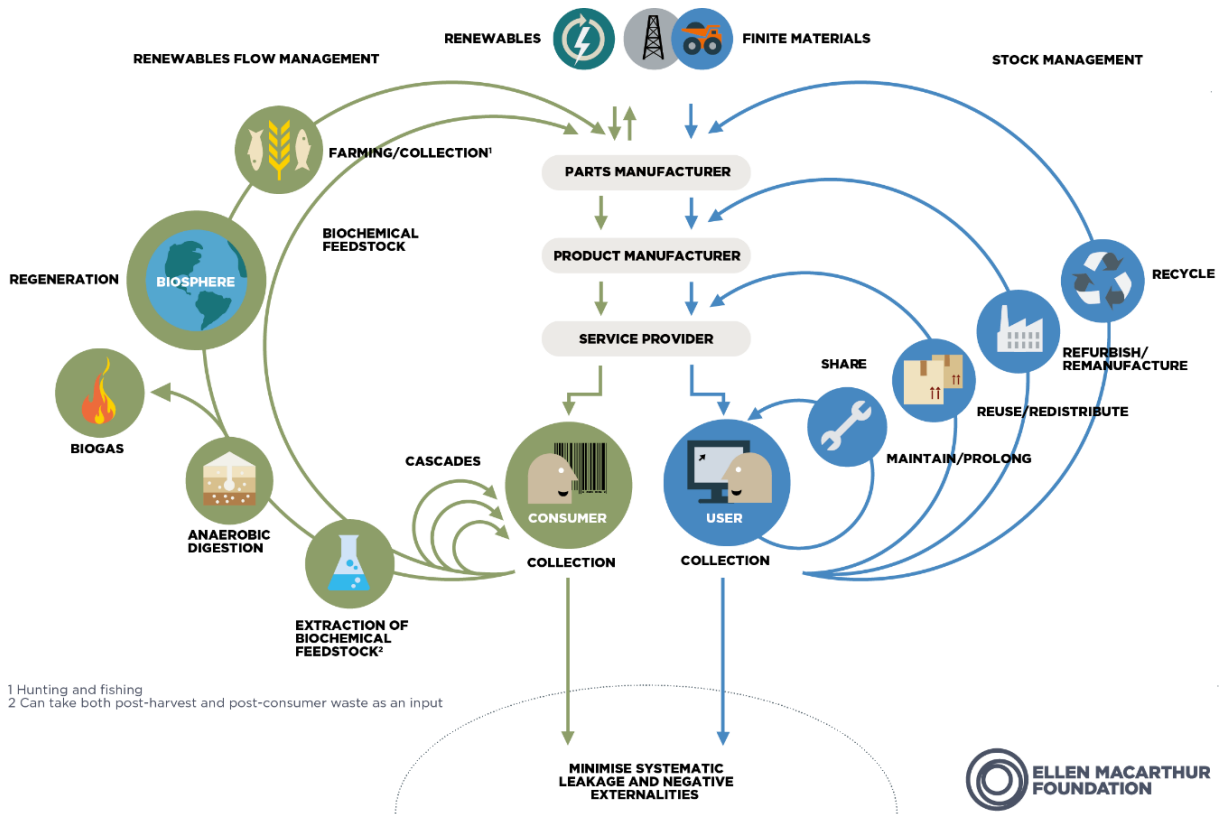


Abbildung 3-1: Das Butterfly-Diagramm der Ellen MacArthur Foundation [40]

Im oberen Teil des Diagramms sind die verschiedenen Rohstoffquellen dargestellt. Auf der linken Seite befinden sich biologische Rohstoffe wie Baumwolle oder Zucker und auf der rechten Seite alle technischen Rohstoffe wie Aluminium, Stahl oder auch Kunststoffe. Der Hauptunterschied besteht darin, dass biologische Rohstoffe in der Natur nachwachsen und zudem biologisch abbaubar sind, weshalb sie oft auch als nachwachsende Rohstoffe bezeichnet werden. Im Gegensatz dazu wachsen technische Rohstoffe weder nach noch sind sie biologisch abbaubar, so dass es sich um endliche Rohstoffe handelt, die nach ihrem Verbrauch nicht mehr zur Verfügung stehen [40].

Diese Unterteilung findet sich auch im weiteren Verlauf des Butterfly-Diagramms wieder. Unterhalb der einzelnen Rohstoffe befinden sich zwei verschiedene Hauptkreisläufe. Der linke Kreislauf ist der biologische Kreislauf. In diesem Kreislauf können Produkte nach ihrer einmaligen Nutzung häufig nicht wiederverwendet werden, sondern gelten als verbraucht [39]. Der rechte Kreislauf stellt den technischen Kreislauf dar. Hier ist das Ziel, die Rohstoffe wiederzuverwenden und somit in der Kreislaufwirtschaft zu halten, um Verschwendung und Abfall zu minimieren. In diesem Kreislauf werden hauptsächlich endliche (technische) Rohstoffe eingesetzt [41]. Generell ist es möglich, dass Rohstoffe nicht eindeutig einem Kreislauf zugeordnet werden können. Dies ist beispielsweise bei Holz der Fall. Holz ist zum einen ein nachwachsender Rohstoff und kann biologisch abgebaut werden, zum anderen ist es möglich, Holz wiederzuverwenden, indem man z.B. aus der Seitenwand eines Schrankes eine Tischplatte herstellt. Für diese Rohstoffe ist keine eindeutige Zuordnung vorgesehen und es wird je nach Verwendungszweck und Zustand des Rohstoffes entschieden, welchem Kreislauf dieser zugeordnet werden soll [39].

3.1.1 Der biologische Kreislauf

Ziel des biologischen Kreislaufes ist es, dem Boden die Nährstoffe zurückzugeben und die Natur bei ihrer Regeneration bestmöglich zu unterstützen, um die Umwelt so wenig wie möglich zu belasten. Wie aus Abbildung 3-1 hervorgeht, besteht der biologische Kreislauf aus verschiedenen Teilen, die unterschiedliche Arten der Rückführung darstellen. [39]

Regeneration

Im Kontext der Kreislaufwirtschaft ist die Regeneration eines der grundlegenden Ziele und bildet das Kernstück des biologischen Kreislaufs. Dieses Ziel wird häufig durch den Begriff „Naturkapital“ repräsentiert. Es bezeichnet die Absicht, mithilfe vielfältiger landwirtschaftlicher Techniken Böden zu regenerieren und die Biodiversität zu steigern, um langfristig einen positiven Einfluss auf die Umwelt zu nehmen und mehr Nutzen als Schaden zu erzeugen. [39]

Farming

Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, geschädigte Ökosysteme zu regenerieren und die biologische Vielfalt und Widerstandsfähigkeit der landwirtschaftlichen Betriebe und der sie umgebenden Landschaften zu stärken. Dazu sollen landwirtschaftliche Betriebe, Wälder und Fischereien so genutzt werden, dass sie die Natur positiv beeinflussen und z.B. Böden gesünder machen, die Luft- und Wasserqualität verbessern oder auch die Artenvielfalt unterstützen. [39]

Composting and anaerobic digestion

Die Kompostierung wird hauptsächlich für Lebensmittel und andere organische Produkte eingesetzt. Dabei werden die verschiedenen Materialien in Verbindung mit Sauerstoff mikrobiell abgebaut und können anschließend als Dünger verwendet werden. Da es sich um einen rein biologischen Prozess handelt, ist das Ergebnis für den Boden gesünder als der Einsatz von chemisch oder synthetischen Düngemitteln. [39]

Anorganische Vergärung ist eine weitere Möglichkeit, biobasierte Stoffe abzubauen. Im Gegensatz zur Kompostierung wird hier jedoch kein Sauerstoff benötigt, sondern die Vergärung erfolgt mit Hilfe von Mikroorganismen unter Ausschluss von Sauerstoff. Wie bei der Kompostierung entsteht ein fester Rückstand (der sogenannte Gärrest), der als Dünger verwendet werden kann und dem Boden wichtige Nährstoffe zuführt. [39]

In beiden Fällen entsteht neben dem „Dünger“ auch Biogas. Dieses Gas besteht hauptsächlich aus Methan und Kohlendioxid und kann als Energiequelle genutzt werden. Somit ist auch die Entstehung von Biogas Teil der Kreislaufwirtschaft. [39]

Cascades

Der biologische Kreislauf besteht noch aus einem weiteren Teil. Bei den Kaskaden können Abfallprodukte direkt als solche für den Menschen wiederverwendet werden. Hierbei ist kein Zwischenschritt notwendig. [39]

Extraction of biochemical feedstock

In dieser Stufe wird biologisches Material nach der Ernte und dem Verbrauch als Ausgangsmaterial für die Herstellung von chemischen Produkten in Bioraffinerien in kleinen Mengen, aber mit hohem Wert, verwendet. Darüber hinaus sind Bioraffinerien in der Lage, zusätzlich eine Reihe anderer wertvoller Produkte auf der Grundlage von organischem Material herzustellen. Beispielsweise könnten in diesen Prozessen nacheinander hochwertige Biochemikalien, Nutrazeutika und anschließend biochemische Massenprodukte hergestellt werden. [39]

3.1.2 Der technische Kreislauf

Auch im technischen Kreislauf stellen die verschiedenen Kreisläufe unterschiedliche Arten der Produktnutzung dar. Hier gilt, je weiter außen der Kreislauf ist, desto weniger Wert des ursprünglichen Produkts bleibt erhalten und desto mehr wird das Produkt in seine einzelnen Bestandteile zerlegt. Ziel der Kreislaufwirtschaft ist es, dass das Produkt möglichst lange in den inneren Kreisläufen verbleibt. Der Grund dafür ist, dass die inneren Kreisläufe häufig mit Kosten- und Rohstoffeinsparungen einhergehen. Wenn ein Produkt als Ganzes wiederverwendet wird und bei der Reparatur nur einzelne Kleinteile ersetzt werden, werden weniger neue Rohstoffe verbraucht als bei der Zerlegung und Herstellung neuer Produkte. Ziel ist es, bereits bei der Entwicklung von Produkten darauf zu achten, dass diese lange im Kreislauf verbleiben und z.B. modular aufgebaut sind, um eine Reparatur oder auch den Austausch einzelner Komponenten zu erleichtern. Dabei kann ein Produkt auch für mehrere Kreisläufe optimiert werden (z.B. modularer Aufbau aus gut recycelbaren Materialien), um die Verweildauer im Kreislauf weiter zu erhöhen. [87, S. 547f.]

Share

Die gemeinsame Nutzung stellt den innersten Kreislauf dar, da sowohl der volle Wert des Produktes erhalten bleibt und keine neuen Rohstoffe eingesetzt werden müssen. Ziel ist es, durch die gemeinsame Nutzung die Nutzungsintensität zu steigern, umso weniger Produkte produzieren zu müssen, da verschiedene Konsumenten dasselbe Produkt verwenden und nicht jeder Konsument ein eigenes Produkt benötigt. [41] Beispiele sind das Carsharing, ein Werkzeugverleih oder auch eine Bibliothek. Share ist jedoch nicht bei allen Produkten möglich.

Maintain/ Prolong

Bei der Wartung geht es darum, den Wert und die Funktionsfähigkeit des Produkts zu erhalten und seine Lebensdauer zu verlängern. Im Gegensatz zum Sharing ist die Wartung bei fast allen Produkten möglich. [41]

Reuse

Die Wiederverwendung von Produkten ist die dritte Möglichkeit, den vollen Wert eines Produktes zu erhalten und seine Form zu bewahren [41]. In einigen Bereichen des täglichen Lebens wird die Wiederverwendung bereits praktiziert. So ist es beispielsweise ab Anfang 2023 Pflicht, dass Restaurants Mehrweg-To-Go-Boxen als Alternative zu Einwegverpackungen anbieten [108]. Dadurch wird nicht nur die Nutzungsdauer der jeweiligen Behältnisse deutlich erhöht, sondern auch die Menge des anfallenden Plastikmülls deutlich reduziert.

Redistribute

Die Umverteilung von Produkten hat zum Ziel, das Produkt zu erhalten und z.B. durch einen Standortwechsel auf einen anderen Markt, mit höherer Nachfrage, zu bringen. Durch dieses Vorgehen bleibt der gesamte Wert des Produktes erhalten und der Lebenszyklus wird durch die Umverteilung deutlich verlängert. [41]

Refurbish

Die Wiederherstellung ermöglicht es, den ursprünglichen Wert des Produktes durch Reparatur oder Austausch defekter Komponenten wiederherzustellen. Zusätzlich ist es möglich, das Aussehen durch kleine Änderungen zu verbessern oder die Spezifikationen zu aktualisieren. Entscheidend ist, dass der alte Zustand nur wiederhergestellt, nicht aber verbessert wird. [41]

Remanufacture

Die Wiederaufbereitung eines Produktes stellt den zweitäußersten Kreislauf im Butterfly-Diagramm dar. Hier befindet sich das Produkt in einem Zustand, in dem es nicht mehr verwendet werden kann und eine Aufarbeitung notwendig ist. Ziel ist es, das Produkt und seine einzelnen Komponenten in einen neuwertigen Zustand zu versetzen, der entweder die gleichen oder sogar verbesserte Spezifikationen, im Vergleich zum ursprünglichen Produkt, aufweist. Dies hat z.B. zur Folge, dass eine Garantie gewährt wird [41].

Recycle

Recycling ist die letzte Möglichkeit, Produkte oder Rohstoffe im Kreislauf zu halten. Es ist auch die Möglichkeit, bei der der Wert des ursprünglichen Produkts am wenigsten erhalten bleibt. Dieser Schritt wird immer dann durchgeführt, wenn die Wiederaufbereitung eines Produktes nicht mehr möglich ist oder das Produkt für diese ungeeignet ist. Beim Recycling wird das Produkt in seine Einzelteile zerlegt und diese werden (meist getrennt voneinander) zu neuen Produkten verarbeitet. Hier kann bereits in der Designphase auf eine gute Recyclingfähigkeit der verwendeten Materialien geachtet werden. [41]

3.2 Luftfahrtspezifische Anpassung

Das Butterfly-Diagramm der Ellen MacArthur Foundation gibt einen allgemeinen Überblick über die Möglichkeiten innerhalb der Kreislaufwirtschaft. Bei genauerer Betrachtung wird deutlich, dass es spezifische und komplexe Industrien wie der Luftfahrt nur ungenügend abbildet. Aus diesem Grund finden sich bereits verschiedene Anpassungen des Diagramms in der Literatur z.B. für die Bauindustrie [10, S. 11]. In diesem Abschnitt wird daher nun eine selbst entwickelte mögliche Anpassung für die Luftfahrt vorgestellt. Dabei wurde versucht, sich auf

die gängigsten Szenarien zu konzentrieren und diese bestmöglich darzustellen, um die Komplexität der Luftfahrt angemessen berücksichtigen zu können. Da heute in der Luftfahrt fast ausschließlich anorganische und nicht erneuerbare Materialien verwendet werden, wurde nur der rechte Teil (technischer Kreislauf) des Butterfly-Diagramms angepasst, da der linke Teil (biologischer Kreislauf) keine Anwendung findet. Zur besseren Übersicht wurde der Kreislauf aufgeteilt, so dass sich links und rechts des Hauptastes Kreisläufe befinden.

Abbildung 3-2 zeigt das angepasste Butterfly-Diagramm aus der Sicht des Produktes, also eines Flugzeugs. Dieses steht im Mittelpunkt und es werden die verschiedenen Kreisläufe im Lebenszyklus eines Flugzeuges veranschaulicht. Auch hier beginnt der Kreislauf mit den verschiedenen Rohstoffen, die zur Herstellung der Produkte benötigt werden. Zusammen mit Recyclingmaterialien wird daraus das fertige Flugzeug hergestellt. In der Luftfahrt geschieht dies indem verschiedene Zulieferer die einzelnen Komponenten des Flugzeugs herstellen, bevor am Ende ein Original Equipment Manufacturer (OEM), wie Airbus, alle Komponenten zu einem flugfähigen Flugzeug zusammenbaut. Bei diesem Prozess gibt es verschiedene Zulieferer, die je nach zeitlichem Abstand zum OEM unterschiedliche Bezeichnungen erhalten [133]. Diese Thematik wird nicht weiter vertieft, sondern die verschiedenen Zulieferer und Lieferketten werden in der Abbildung nur schematisch (durch verschiedenfarbige Kästen) dargestellt.

Nach der Herstellung gelangt das Flugzeug in den Vertrieb. Hier wird es entweder direkt vom Hersteller an die Airline vertrieben oder der Hersteller verkauft das Flugzeug an eine Leasinggesellschaft [51; 96]. In diesem Fall ist es anschließend möglich, dass eine Airline das Flugzeug von der jeweiligen Leasinggesellschaft least. Die Möglichkeit des „Sales and Lease back“ wird aus Gründen der Übersichtlichkeit hier nicht dargestellt. Dieses Verfahren ist eine Mischung aus den zuvor beschriebenen Möglichkeiten, indem die Airline das Flugzeug direkt vom Hersteller kauft und anschließend an ein Leasingunternehmen verkauft, um es dann von diesem zu leasen. Gerade während der Corona-Pandemie wurde dieses Verfahren häufig angewandt, da es den Fluggesellschaften ermöglichte, schnell Liquidität zu generieren [110].

Nach dem Verkauf befindet sich das Flugzeug im Besitz der Fluggesellschaft und ist flugbereit. Dies wird im Diagramm durch den helleren Kasten dargestellt. Alle Aktionen in diesem Kasten finden statt, während das Flugzeug im Einsatz (In-Service) und lufttüchtig ist. Es gibt nun eine Reihe von Möglichkeiten, was mit dem Flugzeug geschehen kann, um sicherzustellen, dass es die maximale Zeit im Kreislauf bleibt.

Die kostengünstigste Möglichkeit stellt die geteilte Nutzung dar. Dabei können sich z.B. verschiedene Fluggesellschaften eine Flugstrecke durch Code-Sharing teilen. Das heißt, der gleiche Flug wird im gleichen Flugzeug von verschiedenen Airlines jeweils unter einer eigenen Flugnummer angeboten [63]. Diese Option bietet sich an, wenn die Nachfrage einer Airline nicht ausreicht, um eine Strecke kostendeckend anbieten zu können. Eine weitere Möglichkeit des Sharing ist das Wet Lease. Bei diesem wird das Flugzeug inklusive Crew (Cockpit- und

Kabinenpersonal) an eine andere Airline vermietet [68]. Eine Möglichkeit, die angewendet werden kann, wenn die Airline selbst keinen Bedarf für das Flugzeug und das dazugehörige Personal hat. Auf diese Weise kann die Auslastung des Flugzeugs erhöht und Ausfälle überbrückt werden. In allen Fällen behält das Flugzeug seine Lufttüchtigkeit und geht nur für eine bestimmte Zeit in den Besitz einer anderen Fluggesellschaft über.

Die Wartung ist eine Notwendigkeit, um den Wert des gesamten Flugzeugs zu erhalten. Diese wird von zertifizierten MRO-Betrieben wie z.B. Lufthansa Technik (als Airline eigener Instandhaltungsbetrieb) oder auch Nayak (als unabhängiger Instandhaltungsbetrieb) durchgeführt. Dabei wird das Flugzeug dem Instandhaltungsbetrieb (meist mit eigenem Hangar auf dem Flughafengelände) übergeben, bevor es nach erfolgreicher Wartung und Freigabe der Airline wieder zur Verfügung gestellt wird. [53]

Im Gegensatz zum ursprünglichen Butterfly-Diagramm der Ellen MacArthur Foundation befindet sich die Wiederherstellung (Refurbish) im angepassten Diagramm deutlich weiter innen. Grund dafür ist, dass in der Luftfahrt die Wiederherstellung in den meisten Fällen von einem zertifizierten Instandhaltungsbetrieb durchgeführt wird und das Flugzeug währenddessen einsatzbereit bleibt. Dabei werden z.B. kleinere Systeme aktualisiert oder nachgerüstet oder die Kabine erhält ein sogenanntes Facelift, also eine kosmetische Überarbeitung.

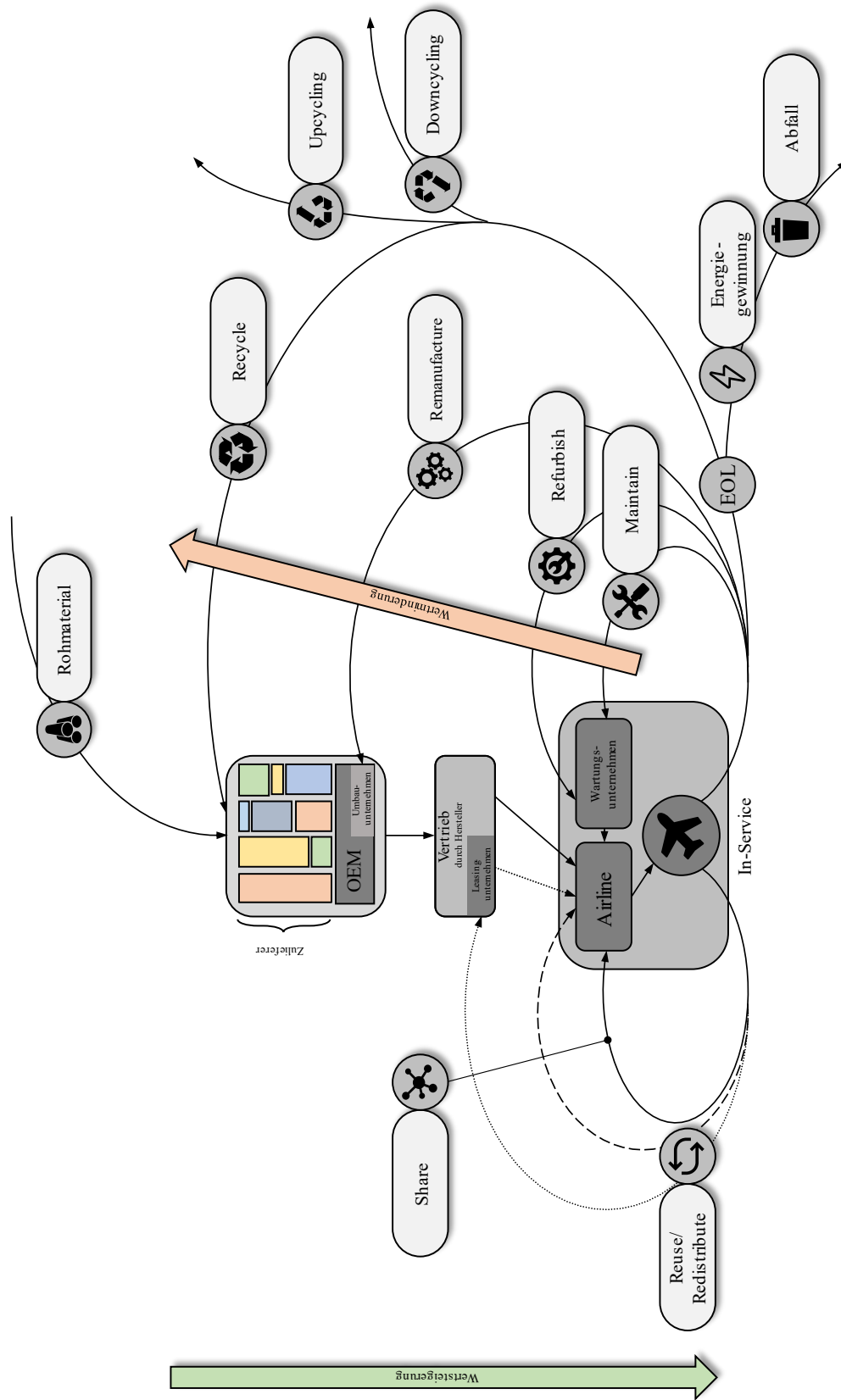
Beim Reuse/Redistribute-Kreislauf gibt es ebenfalls eine Änderung gegenüber dem ursprünglichen Diagramm. Hier muss unterschieden werden, wem das Flugzeug gehört. Dies ist eine Besonderheit in der Luftfahrt, da 47% der Flugzeuge weltweit nicht einer Airline gehören, sondern von verschiedenen Leasinggesellschaften gehalten werden [123]. Infolgedessen kann die Fluggesellschaft nicht selbst über die weitere Verwendung des Flugzeugs entscheiden, sondern gibt dieses nach Ablauf der Leasingdauer an die Leasinggesellschaft zurück. Dieser Vorgang ist durch die gestrichelte Linie dargestellt. Nachdem sich das Flugzeug wieder vollständig im Besitz des Leasingunternehmens befindet, hat diese auch die Verantwortung für die weitere Nutzung. In beiden Fällen kann der Eigentümer entscheiden, ob er das Flugzeug wiederverwendet (Reuse) oder neu zuteilt (Redistribute). Die Wiederverwendung ist sinnvoll, da verschiedene Fluggesellschaften unterschiedliche Anforderungen an das Flugzeug stellen. Auch aufgrund der langen Lebensdauer eines Flugzeugs ist eine Wiederverwendung sinnvoll. Da viele Passagierflugzeuge im Durchschnitt 25 Jahre (Frachtflugzeuge bis zu 32 Jahre) und länger betrieben werden, kann das Flugzeug bei verschiedenen Betreibern eingesetzt werden [44, S. 2ff.]. Ähnlich ist es bei der Umverteilung. Besonders in Schwellenländern oder auch Dritte-Welt-Ländern sind die Anforderungen an die Lufttüchtigkeit eines Flugzeugs weniger hoch. Daraus folgt, dass sich der Weiterbetrieb eines Flugzeuges, das nur innerhalb eines Landes oder innerhalb verschiedener Länder, mit geringeren Anforderungen fliegen soll, länger lohnt [14].

Der Kreislauf des Remanufacturing bleibt im Vergleich zum Ausgangsdiagramm gleich. Ein Beispiel hierfür ist der Umbau von Passagierflugzeugen zu Frachtflugzeugen. Dadurch wird

der Lebenszyklus signifikant verlängert [8, S. 80]. Eine Besonderheit in der Luftfahrt ist, dass die Umbauten meist nicht von OEMs wie Airbus oder Boeing durchgeführt werden, sondern von Drittanbietern wie Lufthansa Technik oder Elbe Flugzeugwerken (zu 45% eine Tochter von Airbus) [37]. Aus diesem Grund wurde die Box der OEMs um die Unterkategorie der Umbauunternehmen erweitert.

Der letzte Kreislauf, der auch im ursprünglichen Kreislaufdiagramm zu finden ist, ist der Recyclingkreislauf. Eine Anpassung dessen ist nicht notwendig. Um dem aufkommenden Trend des Up- bzw. Downcyclings zu berücksichtigen, wurde der Recyclingkreislauf erweitert. Dazu wurden, neben dem Pfeil „Abfall“, zwei weitere Ausgänge aus dem Kreislaufdiagramm ergänzt. Die so abgeführten Materialien werden anschließend nicht mehr für das Flugzeug verwendet, sondern können in anderen Kreisläufen weiterverwendet werden. Ein Beispiele für Up-cycling (Aufwertung von Materialien durch Recycling [147, S. 1]) ist der Bau von Möbeln aus alten Flugzeugteilen [94]. Ein Beispiel für Downcycling (Verringerung des Gesamtwertes des Materials/Produktes durch Recycling [111, S. 49f.]) ist die Nutzung eines alten Flugzeugs als Hotel [101]. Unter dem Begriff Recycling versteht man beispielsweise das Wiedereinschmelzen von gebrauchtem Aluminium im Rahmen der stofflichen Verwertung. Häufig weist das Recyclingmaterialien nicht mehr die gleiche Qualität wie Rohstoffe auf, so dass bei der Herstellung neuer Bauteile neben Recyclingmaterialien auch neue Rohstoffe eingesetzt werden müssen [61, S. 3ff.].

Zusätzlich zu den verschiedenen Kreisläufen wurde der Abfallpfeil angepasst. Im ursprünglichen Diagramm der Ellen MacArthur Foundation ist nur vorgesehen das es durch kleine Lecks im Kreislauf zu Materialverlusten kommt. Dies ist in der Luftfahrt anders, da es aufgrund der hohen Anforderungen nicht möglich ist, alle Materialien zu 100% durch Re-, Up- oder Downcycling am Ende des Flugzeuglebens wiederzuverwenden. Sollte eine stoffliche Verwertung nicht möglich sein, ist eine energetische Verwertung anzustreben, um die im Material enthaltene Energie weiter nutzen zu können. Als letztes gibt es die Möglichkeit der Lagerung des Materials als Abfall, z.B. auf Deponien.



— — Flugzeuge die Airline selber besitzt
 Flugzeuge von Leasingfirma

Abbildung 3-2: Angepasstes Butterfly Diagramm auf die Luftfahrt

3 Butterfly-Diagramm

Nachdem die grundsätzlichen Anpassungen des Kreislaufdiagramms (inkl. Beispiele) an die Luftfahrt ausführlich erläutert wurden, soll im Folgenden ein Sonderfall, kurz dargestellt werden. Zur Veranschaulichung wurde das Kreislaufdiagramm in Abbildung 3-3 schematisch dargestellt und der angepasste Ausschnitt durch einen roten Kasten gekennzeichnet.

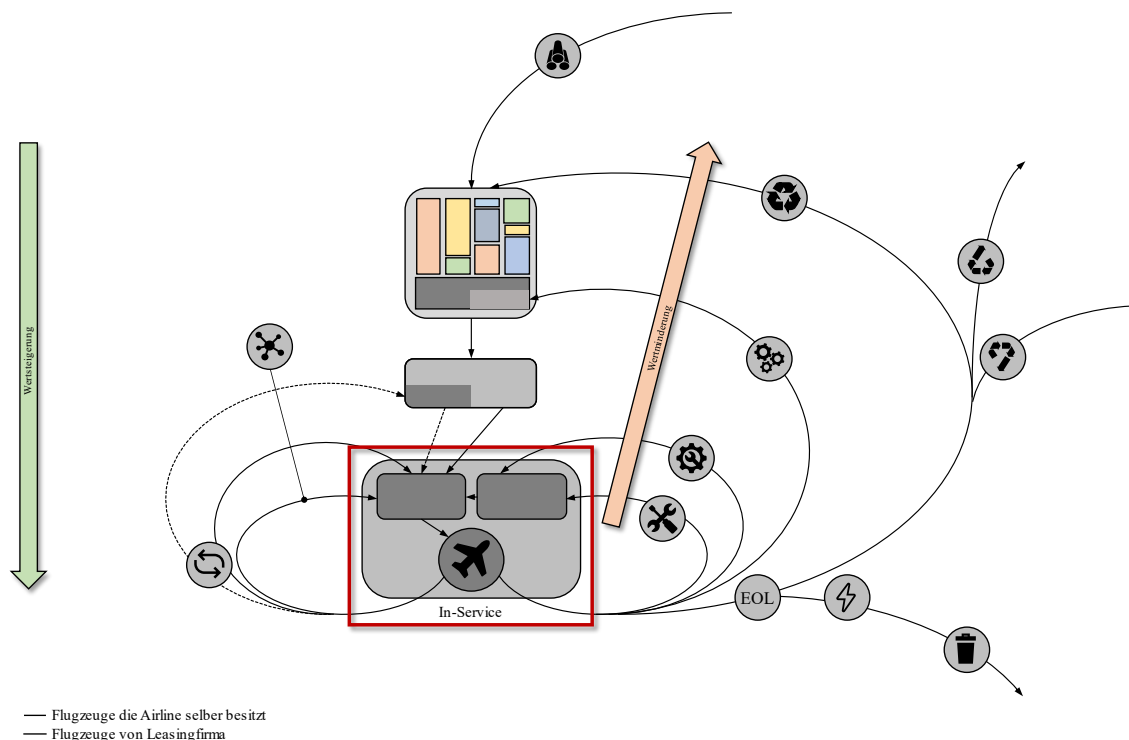


Abbildung 3-3: Schematische Darstellung des angepassten Butterfly-Diagramms

Abbildung 3-4 zeigt, wie sich das Kreislaufdiagramm verändert, wenn die Fluggesellschaft einen eigenen Instandhaltungsbetrieb besitzt. Dies ist beispielsweise bei der Lufthansa der Fall. Sie besitzt mit Lufthansa Technik ein eigenes Wartungsunternehmen [95]. Daraus ergibt sich, dass das Flugzeug nach der Wartung nicht mehr vom Wartungsunternehmen zur Airline zurückkehrt, sondern über die gesamte Lebensdauer bei der Airline verbleibt. Ein weiteres Beispiel ist United Technical Operations. Diese ist eine hundertprozentige Tochter der amerikanischen Fluggesellschaft United und führt die Wartung für diese durch [128].

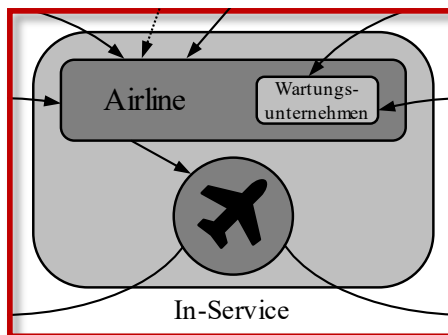


Abbildung 3-4: Detailausschnitt des angepassten Butterfly-Diagramms für Airlines mit eigenem Wartungsunternehmen

In Tabelle 3-1 sind die Anpassungen tabellarisch dargestellt.

Kreislauf	Änderung	Begründung
Wertschöpfungskette	Erweiterung	Berücksichtigung, dass das Flugzeug einer Leasinggesellschaft und nicht der Airline selbst gehört
Share	Keine	Sharing zwischen Airlines hat den gleichen Ablauf wie das Sharing bei Endkonsumenten
Maintain	Keine	Die Wartung wird durch Wartungsbetriebe durchgeführt und erhält den maximalen Wert des Flugzeugs
Refurbish	Verschiebung innerhalb Reuse	Wiederherstellung wird vom Wartungsunternehmen durchgeführt
Reuse/Redistribute	Aufteilung in zwei Kreisläufe	Unterscheidung je nachdem wer das Flugzeug besitzt (Airline oder Leasingfirma)
Remanufacture	Keine	Der Umbau wird durch den Hersteller oder auf den Umbau spezialisierte Firmen durchgeführt
Recycle	Keine	Nach dem Recycling kann der Rohstoff erneut zur Produktion von neuen Bauteilen verwendet werden
Up- bzw. Downcycling	Ergänzung	Weitere Möglichkeit Materialien zu Recyclen
Energiegewinnung/Abfall	Ergänzung	Durch hohe Anforderungen innerhalb der Luftfahrt ist es nicht möglich alle Materialien zu recyceln

Tabelle 3-1: Tabellarische Darstellung der Anpassung des Butterfly-Diagramms

4 Bewertung unterschiedlicher Flugzeugtypen

Wie im Grundlagenteil (Abschnitt 2.3) dargestellt, haben sowohl LCA als auch LCC einige Vorteile. Ein wesentlicher Nachteil ist die einseitige Betrachtungsweise beider Methoden. Um dieser Problematik entgegenzuwirken, war es das Ziel, ein Tool zu entwickeln, das eine ganzheitliche Betrachtung ermöglicht. Im ersten Abschnitt dieses Kapitels wird zunächst die Idee erläutert, die hinter dem Bewertungstool steckt. Im Anschluss wird in Abschnitt 4.2 die Berechnungsmethode vorgestellt, bevor in Abschnitt 4.3 die verwendeten Daten und Annahmen zusammengefasst wurde. Im letzten Abschnitt, Abschnitt 4.4, wird das Tool vorgestellt. Hier wurde Excel als Grundlage gewählt, um die vorher beschriebene Auswertung durchzuführen.

Bei der Durchführung der LCA, LCC und der Berechnung des Kreislaufwirtschaftsindex wurde das Fahrwerk des Airbus A320-200 und des A350-900 verwendet. Die Beschränkung auf das Fahrwerk ergibt sich aus der Komplexität einer ganzheitlichen Analyse des Gesamtsystems Flugzeug. Das Fahrwerk wurde als geeignetes Teilsystem für diese Untersuchung ausgewählt, da es hinsichtlich der Komplexität und der Menge der benötigten Datenmenge begrenzt ist. In dem hier vorliegenden Fall dient das Fahrwerk zu Testzwecken, um das Tool auf seine Funktionalität zu prüfen. Eine detaillierte Betrachtung kann im weiteren Verlauf durchgeführt werden. Bei der Betrachtung wurde der A350-900 als Modell der Langstrecke mit nur ca. einem Flug pro Tag und der Airbus A320-200 als Vertreter der Kurzstrecke mit mehreren Flügen pro Tag ausgewählt. Zudem liegt die Entwicklung des Airbus A320-200 bereits viele Jahre zurück (Erstflug 1987 [124]), während der Airbus A350-900 zu den neueren Flugzeugen gehört (Erstflug 2013 [52]).

4.1 Konzept

Das Ziel dieser Arbeit ist es einen einheitlichen Bewertungsansatz für verschiedene Flugzeugtypen zu entwickeln. Durch dieses Vorgehen soll es ermöglicht werden, verschiedene Komponenten unter dem Gesichtspunkt der Kreislaufwirtschaft zu bewerten. Dabei sollen Materialien miteinander verglichen und eine Gesamtbetrachtung hinsichtlich Ressourcenverbrauch, CO₂-Emissionen und Kosten durchgeführt werden. Zusätzlich ist es das Ziel, die benötigten Eingaben so minimal wie möglich zu halten, um eine schnelle und unkomplizierte Auswertung von Standardbauteilen zu ermöglichen. Dabei soll der Bewertungsansatz nicht nur für Standardbauteile, sondern auch für angepasste Bauteile anwendbar sein.

Die grundlegende Idee hinter diesem Bewertungsansatz ist in Abbildung 4-1 dargestellt.

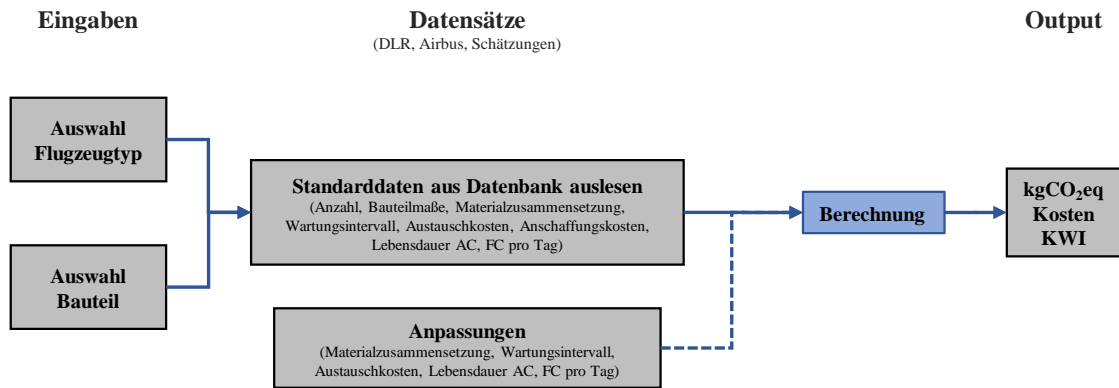


Abbildung 4-1: Schematische Darstellung des Tools

Bei der Entwicklung des Tools ist es das Ziel, nach der Auswahl des Flugzeugtyps (A320-200 oder A350-900) und des spezifischen Bauteils (Komponenten des Fahrwerks) eine erstmalige Auswertung für das Standardbauteil durchzuführen. Es besteht zusätzlich die Möglichkeit, verschiedene Anpassungen vorzunehmen. Dabei können sowohl das Material des Bauteils als auch dessen Materialzusammensetzung angepasst werden. Ebenso sind Variationen in Bezug auf das Wartungsintervall, Austauschkosten, Anschaffungskosten, Lebensdauer des Flugzeugs und Flüge pro Tag möglich. Diese Variablen stellen Werte dar, die aus kreislaufwirtschaftlicher Sicht von Interesse sind (Material und Materialzusammensetzung), im Laufe der Zeit schwanken können (Anschaffungs- und Austauschkosten) oder von der Airline selbst festgelegt werden können (Wartungsintervall, Lebensdauer des Flugzeugs und Flüge pro Tag).

Nachdem sämtliche Eingaben und Anpassungen vorgenommen wurden, soll das entwickelte Tool eigenständig die erforderlichen Berechnungen durchführen und die Ergebnisse ausgeben, um anschließend einen Vergleich zu ermöglichen. Die Methodik variiert je nachdem, welcher Wert ermittelt werden soll. Für das CO₂-Äquivalent ist eine LCA erforderlich, während für die Kosten eine LCC durchgeführt wird und für die Kreislauffähigkeit der Kreislaufwirtschaftsindex berechnet werden muss. Im folgenden Abschnitt 4.2 wird die Methodik der Berechnung detailliert erläutert, wobei die entsprechenden Formeln und Zusammenhänge ausführlich dargestellt werden. Diese dargestellten Berechnungsschritte stellen eine detaillierte Aufgliederung des blauen Kastens dar.

4.2 Methode der Berechnung

In diesem Abschnitt werden die Formeln und Zusammenhänge der drei verschiedenen Methoden (LCA, LCC und Kreislaufwirtschaftsindex) detailliert dargestellt und beschrieben.

4.2.1 LCA

Ziel der Ökobilanz ist die Ermittlung der CO₂-Äquivalente [kgCO₂eq] des Airbus A320-200 und des Airbus A350-900 in Bezug auf das Fahrwerk.

Im hier vorliegenden Fall wurde weitestgehend eine konsistente LCA durchgeführt (die verschiedenen Arten der LCA sind ausführlich in Anhang A erläutert). Dabei wird das Produkt über alle vier Phasen seines Lebenszyklus analysiert (cradle-to-grave), wodurch nicht nur die Umweltauswirkungen während der Produktion, sondern auch die während des Gebrauchs und der Entsorgung, berücksichtigt werden [86, S. 3231f.]. An einigen Stellen war es notwendig eine Screening LCA durchzuführen. Grund dafür ist, dass es z.B. die exakte Dimensionierung von Bauteilen von Seiten der Hersteller unter Verschluss gehalten wird, sodass Annahmen zur Abschätzung getroffen wurden [132]. Durch dieses Vorgehen war es möglich die Menge der notwendigen Daten deutlich zu reduzieren und den Aufwand so wesentlich zu verringern.

Zur Durchführung der LCA sind verschiedene Berechnungsschritte notwendig, die in Abbildung 4-2 dargestellt sind. In diesem Zusammenhang wurden Formeln entwickelt, die die Berechnung des CO₂-Äquivalens ermöglichen.

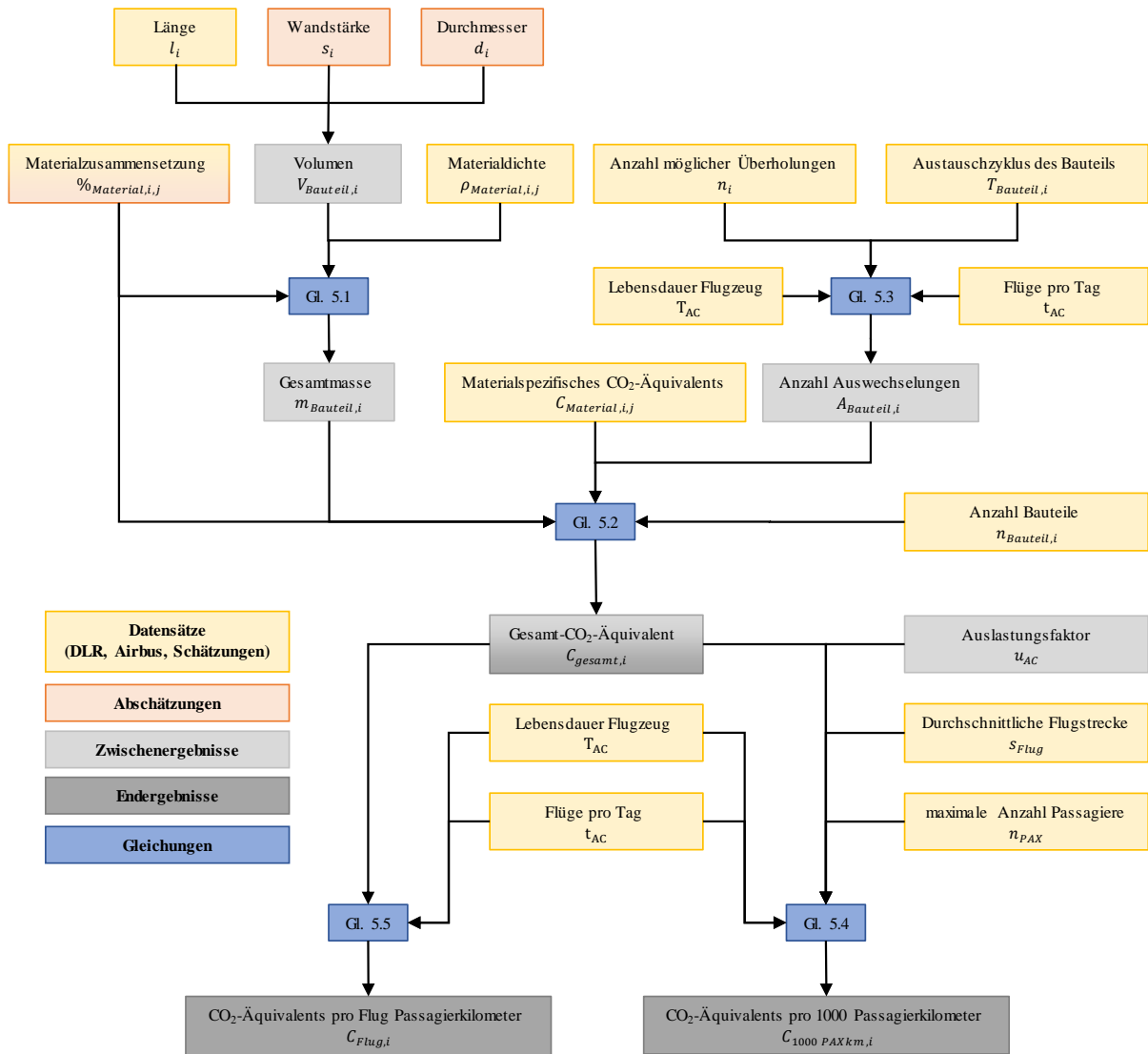


Abbildung 4-2: Vorgehen Berechnung CO₂-Äquivalent

Um die LCA durchzuführen und das CO₂-Äquivalent zu bestimmen, musste im ersten Schritt das Gewicht des Bauteils ($m_{Bauteil,i}$) bestimmt werden.

$$m_{Bauteil,i} = V_{Bauteil,i} \cdot \sum_{Material} \%_{Material,i,j} \cdot \rho_{Material,i,j} \quad (5.1)$$

Dieses setzt sich aus dem Volumen des Bauteils ($V_{Bauteil,i}$), dem Anteil des Werkstoffs j am Gesamtvolumen des Bauteils i ($\%_{Material,i,j}$) und der Dichte des Werkstoffs j ($\rho_{Material,i,j}$) zusammen.

Anschließend kann das CO₂-Äquivalent für die gesamte Lebensdauer ermittelt werden.

$$C_{gesamt,i} = m_{Bauteil,i} \cdot \left(\sum_{Material} \%_{Material,i,j} \cdot C_{Material,i,j} \right) \cdot (A_{Bauteil} + 1) \cdot n_{Bauteil,i} \quad (5.2)$$

Dieses berechnet sich aus dem Gewicht des Bauteils ($m_{Bauteil,i}$), dem Anteil des Materials j am Gesamtvolumen des Bauteils ($\%_{Material,i,j}$), dem CO₂ Äquivalent von Material j ($C_{Material,i,j}$), der Anzahl wie häufig ein Bauteil während des Lebenszyklus komplett ausgetauscht werden muss ($A_{Bauteil,i}$) und der Anzahl der Bauteile ist ($n_{Bauteil,i}$).

Jetzt kann die Anzahl der vollständigen Austauschvorgänge ermittelt werden.

$$A_{Bauteil,i} = \frac{365,25 \cdot T_{AC} \cdot t_{AC}}{T_{Bauteil,i} \cdot (n_i + 1)} \quad (5.3)$$

Sie setzt sich zusammen aus der Lebensdauer des Flugzeugs T_{AC} () in Jahren, der Anzahl der Flüge pro Tag (t_{AC}), dem Austauschzyklus der Komponente i ($T_{Bauteil,i}$) in FC und der Anzahl der Überholungen einer Komponente, bevor sie komplett ausgetauscht werden muss (n_i).

Diese Daten ermöglichen die Berechnung des CO₂-Äquivalents pro 1000 Passagierkilometer und Flug.

$$C_{1000 PAXkm,i} = 1000 \cdot \frac{C_{gesamt,i}}{s_{Flug} \cdot n_{PAX} \cdot u_{AC} \cdot 365,25 \cdot T_{AC} \cdot t_{AC}} \quad (5.4)$$

$$C_{Flug,i} = \frac{C_{gesamt,i}}{365,25 \cdot T_{AC} \cdot t_{AC}} \quad (5.5)$$

Dabei ist s_{Flug} die von einem Flugzeug pro Flug zurückgelegte Strecke in km, n_{PAX} die Anzahl der maximal beförderten Passagiere und u_{AC} die durchschnittliche Auslastung des Flugzeugs pro Flug.

4.2.2 LCC

Das Ziel der Lebenszykluskostenanalyse (LCC) bestand darin, unter Verwendung der verfügbaren Daten eine schnelle und unkomplizierte LCC durchzuführen. In diesem Zusammenhang erwies sich die traditionelle LCC als geeignet (die verschiedenen Arten der LCC sind ausführlich im Anhang B erläutert). Diese Methode eignet sich besonders, wenn, wie in diesem Fall, nur begrenzte Daten verfügbar sind. Zudem ermöglicht sie eine erste Abschätzung und eignet sich gut zum Vergleich der verschiedenen Komponenten. Hierbei werden nur die direkten Kosten berücksichtigt, wie Anschaffungs- oder Austauschkosten [112, S. 378ff.] Zu Beginn wurde bewusst darauf verzichtet, eine Total Cost of Ownership LCC oder sogar eine dynamische LCC durchzuführen, da diese aufgrund ihrer umfassenden Berücksichtigung von neben direkten Kosten auch indirekten Kosten, wie beispielsweise Schulungskosten, deutlich aufwändiger gewesen wären [27, S. 151ff.]..

Zur Berechnung der Lebenszykluskosten waren verschiedene Berechnungsschritte notwendig, die in Abbildung 4-3 dargestellt sind. Dabei wurden die Ergebnisse mithilfe verschiedener Inputdaten (siehe Abschnitt 4.3) sowie selbst entwickelter Formeln berechnet.

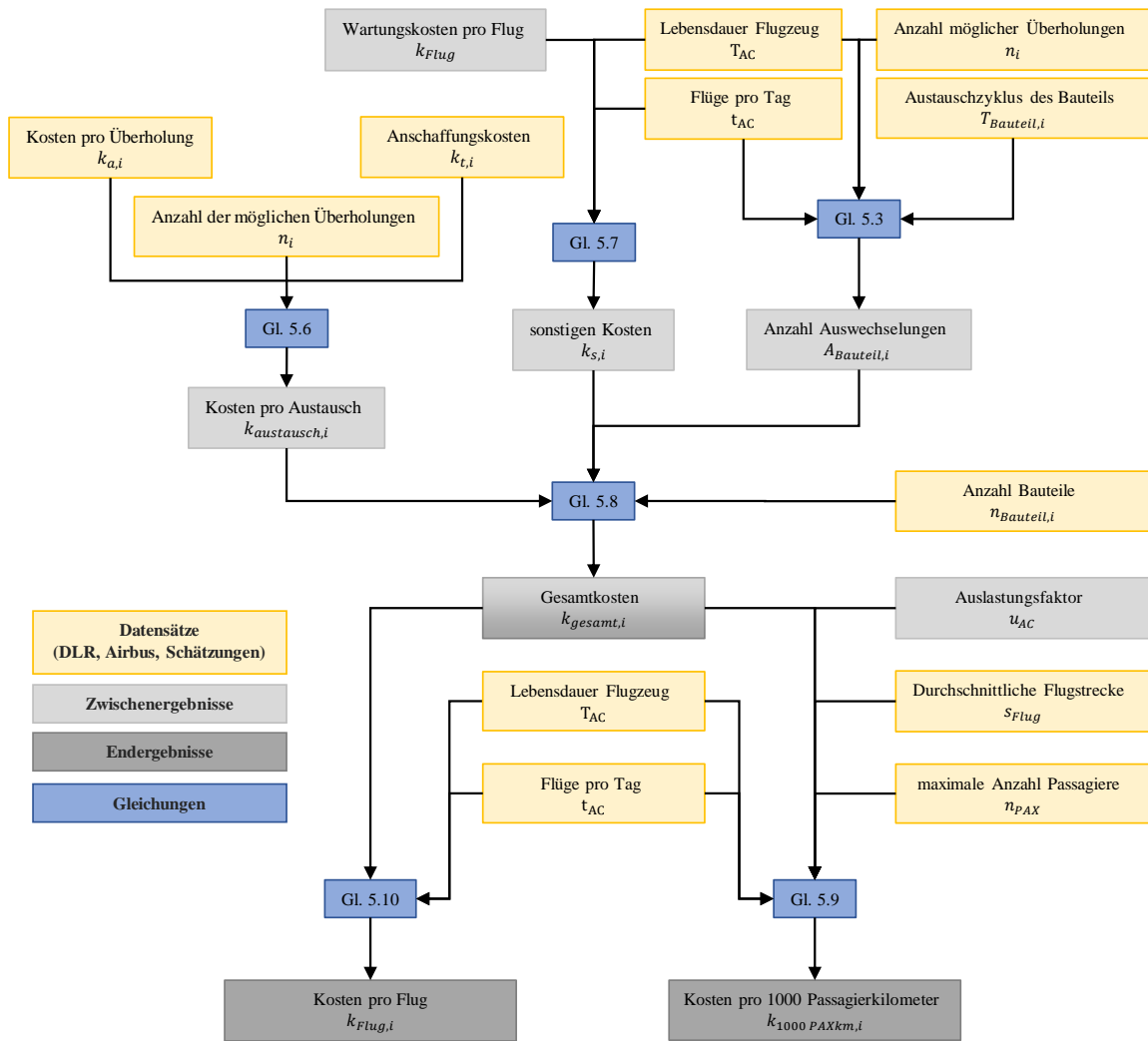


Abbildung 4-3: Vorgehen Berechnung Gesamtkosten

Um die Gesamtkosten einer Komponente über den Lebenszyklus eines Flugzeugs zu ermitteln, wurden zunächst die Kosten pro Austausch bestimmt.

$$k_{austausch,i} = k_{a,i} \cdot n_i + k_t \quad (5.6)$$

Dazu wird die Anzahl der möglichen Überholungen (bevor das Bauteil komplett ausgetauscht wird) (n_i), die Kosten pro Überholung ($k_{a,i}$) und die Anschaffungskosten für ein neues Bauteil ($k_{t,i}$) verwendet.

Als nächstes wurden die weiteren Kosten bestimmt, die mit der Nutzung der Komponente verbunden sind. In dieser LCC werden nur die Kosten berücksichtigt, die durch die Instandhaltung entstehen, d.h. die fixen Kosten plus die Kosten, die durch die Arbeitsstunden entstehen.

$$k_{s,i} = k_{Flug} \cdot t_{AC} \cdot 365,25 \cdot T_{AC} \quad (5.7)$$

Die sonstigen Kosten ($k_{s,i}$) setzen sich aus den Wartungskosten pro Flug (k_{Flug}), der Anzahl der Flüge pro Tag und Flugzeug (t_{AC}) und der Lebensdauer eines Flugzeugs (T_{AC}) zusammen.

Nachdem alle Kosten berechnet wurden, können die Gesamtkosten ermittelt werden.

$$k_{gesamt,i} = A_{Bauteil,i} \cdot n_{Bauteil,i} \cdot k_{austausch,i} + k_{s,i} \quad (5.8)$$

Die Gesamtkosten ($k_{gesamt,i}$) setzen sich zusammen aus der Anzahl der Bauteilwechsel pro Flugzeublebenszyklus ($A_{Bauteil,i}$), der Häufigkeit des Vorhandenseins eines Bauteils ($n_{Bauteil,i}$), den Kosten pro Austausch ($k_{austausch,i}$) und den sonstigen Kosten ($k_{s,i}$).

Neben den Gesamtkosten werden auch die Kosten pro 1000 Passagierkilometer und die Kosten pro Flug ermittelt.

$$k_{1000 PAXkm,i} = 1000 \cdot \frac{k_{gesamt,i}}{s_{Flug} \cdot n_{PAX} \cdot u_{AC} \cdot 365,25 \cdot T_{AC} \cdot t_{AC}} \quad (5.9)$$

$$k_{Flug,i} = \frac{k_{gesamt,i}}{365,25 \cdot T_{AC} \cdot t_{AC}} \quad (5.10)$$

Dabei ist s_{Flug} die mittlere Flugstrecke, n_{PAX} die Anzahl der Passagiere, die maximal pro Flugzeug befördert werden können, u_{AC} die mittlere Auslastung des Flugzeugs, T_{AC} die Lebensdauer des Flugzeugs und t_{AC} die mittlere Anzahl der Flüge pro Tag.

4.2.3 Kreislaufwirtschaftsindex

In Abbildung 4-4 ist schematisch die Berechnung des KWI dargestellt, hierbei wurden die vorhandenen Daten, die Annahmen, sowie die Zwischen- und Endergebnisse kenntlich gemacht.

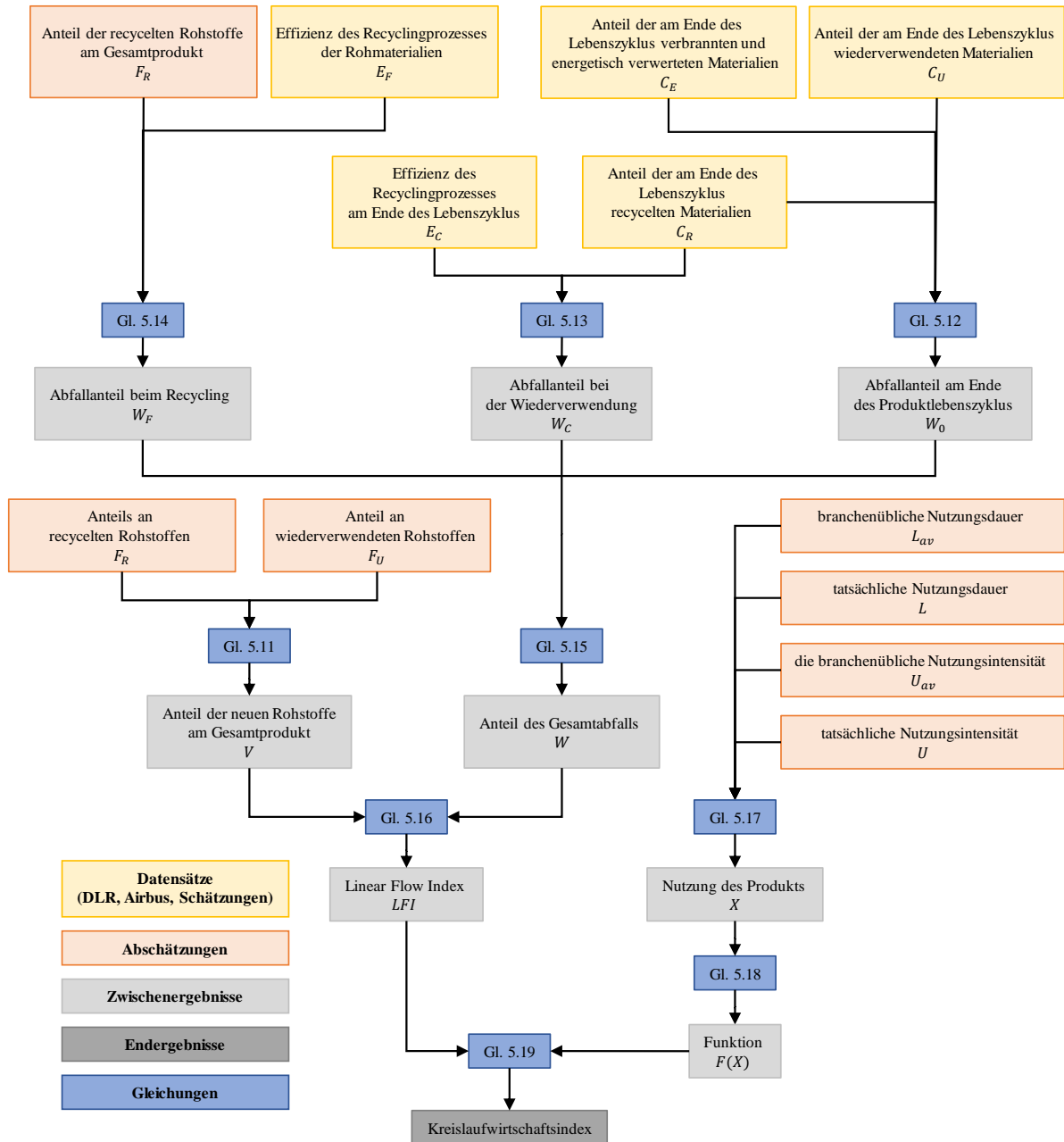


Abbildung 4-4: Vorgehen Berechnung Kreislaufwirtschaftsindex

Die Formeln, die verwendet werden, um den KWI zu berechnen, wurden modifiziert und der vorliegenden Situation angepasst. [42, S. 24ff.]

Der erste Schritt zur Berechnung des KWI beinhaltet die Bestimmung des Anteils der neuen Rohstoffe (V).

$$V = 1 - F_R - F_U \quad (5.11)$$

Dieser kann mithilfe des Anteils an recycelten Rohstoffen (F_R) und wiederverwendeten Rohstoffen (F_U) ermittelt werden

Zusätzlich muss der Anteil des Abfalls, der am Ende des Produktlebenszyklus entsteht (W_0), berechnet werden.

$$W_0 = 1 - C_R - C_U - C_E \quad (5.12)$$

Dazu wird der Anteil der am Ende des Lebenszyklus recycelten Materialien (C_R), der am Ende des Lebenszyklus wiederverwendeten Materialien (C_U) und der am Ende des Lebenszyklus verbrannten und energetisch verwerteten Materialien (C_E) benötigt.

Neben den Abfällen, die am Ende des Produktlebenszyklus entstehen, müssen auch die Abfälle bestimmt werden, die während des Recyclings der Materialien am Ende des Lebenszyklus (W_C) und während des Recyclings zum recycelten Rohstoff (W_F) entstehen.

$$W_C = (1 - E_C)C_R \quad (5.13)$$

$$W_F = \frac{(1 - E_F)F_R}{E_F} \quad (5.14)$$

Dazu werden die Effizienz des Recyclingprozesses am Ende des Lebenszyklus (E_C) bzw. der Rohmaterialien (E_F) und der Anteil des recycelten Materials am Ende des Lebenszyklus (C_R) bzw. der recycelten Rohstoffe am Gesamtprodukt (F_R) benötigt.

Aus diesen Werten lässt sich der gesamte erzeugte Abfallanteil (W) berechnen.

$$W = W_0 + \frac{W_F + W_C}{2} \quad (5.15)$$

Dieser setzt sich zusammen aus dem Abfallanteil am Ende des Produktlebenszyklus (W_0), dem Abfallanteil beim Recycling (W_F) und dem Abfallanteil bei der Wiederverwendung (W_C).

Anschließend kann der Linear Flow Index (LFI) berechnet werden. Dieser gibt an, wie groß der Anteil des Materials ist, der linear durch das System fließt (d.h. es werden Rohstoffe in das System eingebracht und am Ende entsteht Abfall).

$$LFI = \frac{V + W}{2} \quad (5.16)$$

Dabei wird der Anteil der neuen Rohstoffe am Gesamtprodukt (V) und der Anteil des Gesamtabfalls (W), der während des Lebenszyklus anfällt, verwendet.

Darüber hinaus muss die Nutzung des Produkts (X) bestimmt werden. Diese gibt an, in welchem Umfang die maximale Nutzungsdauer des Produktes ausgenutzt wird oder ob das Produkt bereits vor der maximalen Nutzungsdauer aus dem System herausgenommen wird.

$$X = \left(\frac{L}{L_{av}}\right) \cdot \left(\frac{U}{U_{av}}\right) \quad (5.17)$$

Zur Berechnung werden die tatsächliche Nutzungsdauer (L) und die branchenübliche Nutzungsdauer (L_{av}) des Produkts sowie die tatsächliche Nutzungsintensität (U) und die branchenübliche Nutzungsintensität (U_{av}) des Produkts benötigt.

Die Funktion $F(X)$ wird derart gewählt, dass eine Verbesserung des Produktnutzens (z. B. durch längere Nutzung) die gleiche Wirkung auf den KWI hat wie die Wiederverwendung von Bauteilen, die in einem bestimmten Zeitraum zu einer gleich großen Verringerung des Verbrauchs an Rohstoffen und nicht verwertbaren Abfällen führt. Das bedeutet, dass eine Verringerung des linearen Flusses um einen konstanten Faktor c die gleiche Wirkung haben sollte wie eine Erhöhung des Nutzens um den Faktor c .

$$F(X) = \frac{0,9}{X} \quad (5.18)$$

X steht auch hier für die Verwendung des Produkts.

Abschließend kann der Wert für den Kreislaufwirtschaftsindex (KWI) berechnet werden.

$$KWI = 1 - LFI \cdot F(X) \quad (5.19)$$

Er setzt sich aus dem Linear Flow Index LFI und der Funktion $F(X)$ zusammen.

Um den KWI der gesamten Komponente zu bestimmen, müssen die Werte der jeweiligen Materialien noch mit dem Gewicht des jeweiligen Bauteils gewichtet werden

$$KWI_{ges} = \frac{\sum_{i=1}^n KWI_i \cdot m_{Bauteil,i}}{\sum_{i=1}^n m_{Bauteil,i}} \quad (5.19)$$

4.3 Daten und Annahmen

In diesem Abschnitt werden die verschiedenen Inputdaten dargelegt und die getroffenen Annahmen erläutert.

4.3.1 Allgemeine Flugzeugdaten

Da es sich bei dem Airbus A320-200 und dem Airbus A350-900 jeweils um ein Kurz- und ein Langstreckenflugzeug handelt, unterscheiden sich nicht nur die Sitzplatzkapazitäten, sondern auch die durchschnittliche Flugdauer und -strecke sowie die Anzahl der Flüge pro Tag. In Tabelle 4-1 sind die aus der Literatur entnommenen Daten übersichtlich zusammengefasst.

	A320-200	A350-900
Lebensdauer T_{AC} [Jahren]	34	34
Ø Flugdauer [min]	112 [29]	-
Ø Flugstrecke s_i [km]	702 [49]	4.466 [50]
Anzahl an Flüge t_{AC} [pro Tag]	8,05 [49]	0,95 [50]
Anzahl Passagiere n_{PAX}	168 [49]	293 [50]
Auslastungsfaktor u_i [%]	80,17%	83,60%

Tabelle 4-1: Gegenüberstellung verschiedener Daten des Airbus A320-200 und Airbus A350-900 hinsichtlich der durchgeführten Flüge

Seit den 1980er Jahren hat sich das durchschnittliche Alter von Flugzeugen (Passagier- und Frachtflugzeuge) zum Zeitpunkt der Ausmusterung von 15 auf 26,5 Jahre erhöht [134, S. 379ff.]. Dies ist auf verschiedene Faktoren zurückzuführen, wie z.B. die zunehmende Umrüstung alter Passagierflugzeuge zu Frachtflugzeugen, wodurch sich die Lebensdauer von 25 Jahren auf bis zu 32 Jahre verlängern kann [142, S. 1305]. Im Extremfall ist es auf diese Weise sogar möglich, dass Frachtflugzeuge erst nach 40 Jahren ausgemustert werden [140, S. 1292]. In dem hier vorliegenden Fall wurde ein Durchschnittsalter von 34 Jahren angenommen. Dies ist das Alter des ältesten A320 der noch heute von der Lufthansa betrieben wird [49]. Da der Airbus 350-900 erst im Jahr 2013 auf den Markt kam, gibt es hierzu noch keine zuverlässigen Daten zur Lebensdauer. Aus diesem Grund wird auch für den A350 ein Maximalalter von 34 Jahren angenommen.

Zur Ermittlung des Auslastungsfaktors der beiden Flugzeugtypen wurden die Verkehrszahlen (Anzahl angebotene Sitzkilometer, Auslastung pro Flug) der Lufthansa vom Quartal 2/2022 bis zum Quartal 1/2023 herangezogen (Anhang C). Dabei wurde zwischen Kurz- und Langstrecke unterschieden. Da der Airbus A320-200 im vorliegenden Fall fast ausschließlich auf der Kurzstrecke innerhalb Europas eingesetzt wird, wurden hier die Verkehrszahlen für Europa verwendet. Für den Airbus A350-900 wurden die Verkehrszahlen der anderen Kontinente verwendet, da dieser fast ausschließlich auf Langstrecken eingesetzt wird. Die Gesamtauslastung wurde wie folgt ermittelt:

$$u_{Flugzeug} = \frac{\sum_{i=1}^4 u_i \cdot b_i}{\sum_{i=1}^4 b_i} \quad (2.1)$$

Daraus ergeben sich die beiden angenäherten Auslastungsfaktoren von $u_{A320-200} = 80,17\%$ für den A320-200 und $u_{A350-900} = 83,60\%$ für den A350-900.

Im Hinblick auf das Gewicht gibt es ebenfalls einen erheblichen Unterschied. Tabelle 4-2 stellt sowohl das Leergewicht als auch das maximale Startgewicht dieser beiden Flugzeugtypen gegenüber.

	A320-200 [6]	A350-900 [5]
OEW [kg]	41.000	140.000
MTOW [kg]	78.000	245.000

Tabelle 4-2: Leergewicht (OEW) und maximales Startgewicht (MTOW) des Airbus A320-200 und des Airbus A350-900 [4, S. 26ff.; 7, S. 4ff.]

Ein Anteil aller Flugzeugsysteme von 10% am Leergewicht (OEW) kann in guter Näherung angenommen werden [71, S. 35].

4.3.2 Das Fahrwerk

Bei der Betrachtung des Fahrwerks wurden einige Vereinfachungen angenommen und es wurde sich auf die Hauptkomponenten beschränkt (siehe Abbildung 4-5 und 4-6). Nicht berücksichtigt wurde die Aktuatoren zum Ein- und Ausfahren, die Fahrwerkstüren, die den Fahrwerksschacht verschließen und der Fahrwerksschacht, der das Fahrwerk während des Fluges aufnimmt und in dem das Fahrwerk aufgehängt ist. Hierdurch wurde die Menge der benötigten Daten stark begrenzt und eine zuverlässige Auswertung ermöglicht.

Airbus A320-200

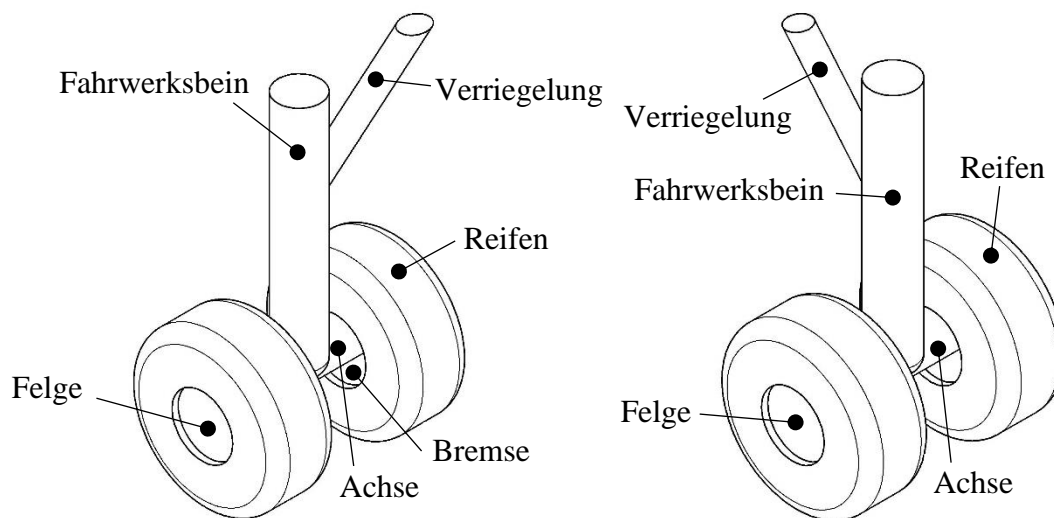


Abbildung 4-5: Vereinfachte Darstellung A320-200 Hauptfahrwerk (links) und Bugfahrwerk (rechts)

Airbus A350-900

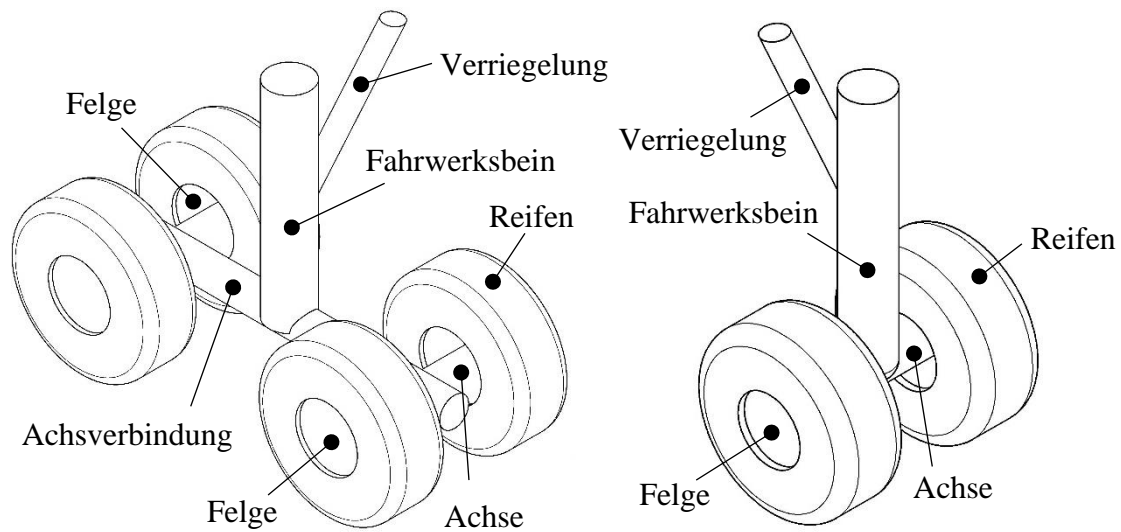


Abbildung 4-6: Vereinfachte Darstellung A350-900 Hauptfahrwerk (links) und Bugfahrwerk (rechts)

Das Hauptziel des Tools ist es, Komponenten miteinander vergleichen zu können. Dies bezieht sich sowohl auf Bauteile verschiedener Flugzeugtypen als auch auf Standardbauteile im Vergleich zu modifizierten Bauteilen. Da in beiden Fällen einige Schritte identisch sind oder sich durch eine Modifikation nicht ändern (wie z.B. der Transport des Bauteils von der Montage zum Einbau ins Flugzeug), wurden diese bei der Analyse nicht berücksichtigt. Hierdurch ändert sich das absolute Ergebnis, nicht aber der Unterschied zwischen den Bauteilen, da beide Größen lediglich um den gleichen Faktor erhöht werden. Es werden nur Situationen oder Aktivitäten berücksichtigt, bei denen Unterschiede zwischen den Komponenten bestehen oder die sich ändern, wenn sich z.B. das Material der Komponente ändert.

Maße

Die Abmessungen der Fahrwerke des Airbus A320-200 und des Airbus A350-900 wurden aus dem „Aircraft characteristics Airport and Maintenance planning“ (AMP) übernommen, teilweise mussten zusätzlich geeignete Annahmen getroffen werden, wie z.B. bei den Durchmessern der verschiedenen Bauteile oder auch bei den Wandstärken [5; 6]. Hierbei wurden die Zeichnungen aus dem AMP zu Hilfe genommen, um anhand der Verhältnisse die Durchmesser der verschiedenen Bauteile abzuschätzen. Bei den Felgen wurde angenommen, dass das Material ca. 25% des zur Verfügung stehenden Bauraums ausmacht. Für die Bremsen wurde angenommen, dass sie ca. 30% des zur Verfügung stehenden Felgenbauraums einnehmen. Die angenommenen Maße und Volumina sind Anhang D zu entnehmen.

Die Berechnungen ergaben, dass das Gesamtvolumen des Bugfahrwerks des Airbus A320-200 ca. 95.760 cm³ beträgt, wobei 10,3% auf die Struktur, 76,4% auf die Reifen und 13,3% auf die

Felgen entfallen. Im Vergleich dazu ist das Volumen des Bugfahrwerks des Airbus A350-900 mit ca. 212.742 cm³ ungefähr 2,2-mal größer als das des A320-200. Trotz dieser Größenunterschiede bleibt die Verteilung der Volumenanteile auf die einzelnen Bauteile ähnlich (9,7% für die Struktur, 78,3% für die Reifen und 12% für die Felgen).

Im Fall des Airbus A320-200 beträgt das Gesamtvolumen des Hauptfahrwerks ca. 283.973 cm³, bestehend zu 9,7% aus der Struktur, zu 70,3% aus den Reifen und zu 15,4% aus den Felgen. Im Vergleich dazu ist das Volumen des Bugfahrwerks des Airbus A350-900 mit ca. 212.742 cm³ etwa 3-mal größer. Die Verteilung der Bauteile bleibt auch hier ähnlich, mit 8,1% für die Struktur, 70,0% für die Reifen und 5,0% für die Felgen. Zusätzlich zeigt sich, dass das Hauptfahrwerk des A320-200 einen Anteil von 31,0% am Gesamtvolumen des Flugzeugs hat, während das des Airbus A350-900 nur 25,3% ausmacht. Weitere detaillierte Maße finden sich im Anhang D.

Materialien

Die Materialzusammensetzung der Fahrwerke für die Modelle Airbus A320-200 und A350-900 basiert auf den Erkenntnissen von Mouritz (2012) [99]. Es wurde festgestellt, dass es signifikante Materialunterschiede in der Struktur der Fahrwerke gibt. Die Struktur des Airbus A320-200 Fahrwerks besteht zu 80% aus Stahl, 10% aus Aluminium und 10% aus Titan, während das Fahrwerk des Airbus A350-900 zu 80% aus Titan, 10% aus Aluminium und 10% aus Stahl besteht. Für die Flugzeugreifen wurde angenommen, dass sie ähnlich den PKW-Reifen sind und daher die gleiche Materialzusammensetzung aufweisen. Hier wurde eine Materialmischung bestehend aus Kautschuk (42%), Kohlenstoffverbund (30%), Stahl (14%) und Polyester (14%) angenommen. Für die Felgen wurde ebenfalls die Ähnlichkeit zum Auto herangezogen. Daher wurde angenommen, dass diese zu 100% aus Stahl bestehen. Bei den Bremsen ist dies anders. Hier ist die Annahme, dass das Gehäuse aus Stahl besteht (60%) und die Bremsscheiben aus einem Kohlenstoffverbund (40%). Insgesamt wurden keine Unterschiede in den Materialzusammensetzungen zwischen Haupt- und Bugfahrwerk angenommen. Eine detaillierte Aufschlüsselung der Materialien für die verschiedenen Bauteile ist im Anhang E zu finden.

Herstellung und Wartung

Auch bei der Wartung und Herstellung des Fahrwerks Vereinfachungen angenommen. Für den Austausch eines Bauteils wurde nur der Werkstoff des Bauteils berücksichtigt, nicht die für den Austausch verwendeten Hilfsstoffe. Weiterhin wurde nur der mit dem jeweiligen Material verbundene CO₂-Ausstoß berücksichtigt, nicht der CO₂-Ausstoß, der durch Transport, Herstellung (Montage) oder Entsorgung der einzelnen Komponenten entsteht. Hierzu konnten keine gesicherten Daten gefunden werden. Die Tabellen 4-3 und 4-4 enthalten die verwendeten Daten.

Hauptfahrwerk

Bauteil	Anzahl $n_{Bauteil,i}$		Wechselzyklus $T_{Bauteil,i}$ [FC]		Anzahl möglicher Wiederverwendungen n_i	
	A320-200	A350-900	A320-200	A350-900	A320-200	A350-900
Struktur	2	2	20.000	20.000	1	1
Reifen	4	8	400	300	4	4
Felge	4	8	400	300	4	4
Bremsen	4	8	2.100	2.000	0	0

Tabelle 4-3: Austauschzyklen des Airbus A320-200 und A350-900 Hauptfahrwerks [9, S. 64ff.]

Bugfahrwerk

Bauteil	Anzahl $n_{Bauteil,i}$		Wechselzyklus $T_{Bauteil,i}$ [FC]		Anzahl möglicher Wiederverwendungen n_i	
	A320-200	A350-900	A320-200	A350-900	A320-200	A350-900
Struktur	1	1	20.000	20.000	1	1
Reifen	2	2	350	300	4	4
Felge	2	2	350	300	4	4

Tabelle 4-4: Austauschzyklen des Airbus A320-200 und A350-900 Bugfahrwerks [9, S. 64ff.]

Für die Dauer (MH) und Häufigkeit der verschiedenen Wartungsarbeiten wurde das MPD des jeweiligen Flugzeuges verwendet [4; 7]. Darüber hinaus wurde ein Mannstundensatz von 130 € verwendet. Dieser liegt deutlich über dem Mannstundensatz, der z.B. von Lopes (2010) verwendet wurde [93]. Grund hierfür ist die in der Zwischenzeit deutlich gestiegene Inflation. Der Mannstundensatz wurde verwendet, um den verschiedenen Instandhaltungsaufgaben Kosten zuzuordnen. Neben den Kosten für die Mannstunden ergeben sich auch Fixkosten, die bei der Instandhaltung der verschiedenen Komponenten anfallen. Tabelle 4-5 und 4-6 zeigt die durchschnittlichen Kosten, die pro Flug für die Wartung der Komponenten entstehen. Für eine vollständige Aufschlüsselung der Mannstunden und fixen Kosten siehe Anhang F. Ungeplante Wartungsarbeiten wurden nicht berücksichtigt, da diese schwer vorhersehbar sind und keine geeigneten Daten zur Verfügung standen. Des Weiteren wurden keine indirekten Kosten (die z.B. durch Mitarbeiterschulungen entstehen) berücksichtigt.

Airbus A320-200

	Hauptfahrwerk [€/FC]	Bugfahrwerk [€/FC]
Struktur	7,80	2,95
Reifen	1,30	1,81
Felgen	0,00	0,00
Bremsen	0,32	-

Tabelle 4-5: Kosten pro Flug k_{Flug} für das Fahrwerk des Airbus A320-200

Airbus A350-900

	Hauptfahrwerk [€/FC]	Bugfahrwerk [€/FC]
Struktur	20,68	8,13
Reifen	13,50	14,20
Felgen	0,00	0,00
Bremsen	0,67	-

Tabelle 4-6: Kosten pro Flug k_{Flug} für das Fahrwerk des Airbus A350-900

Zusätzlich werden für die Berechnung der Lebenszykluskosten die Kosten für den Austausch/die Instandsetzung und die Neuanschaffung eines Bauteils benötigt. Diese sind in den Tabellen 4-7 und 4-8 aufgeführt.

Hauptfahrwerk

Bauteil	Anzahl		Austauschkosten k_a [€]		Anschaffungskosten k_t [€]	
	A320-200	A350-900	A320-200	A350-900	A320-200	A350-900
Struktur	2	2	240.000	250.000	240.000	250.000
Reifen	4	8	750	950	1.800	3.000
Felge	4	8	450	450	13.000	14.000
Bremsen	4	8	-	-	40.000	60.000

Tabelle 4-7: Bauteilkosten des Airbus A320-200 und A350-900 Hauptfahrwerks [9, S. 64ff.]

Bugfahrwerk

Bauteil	Anzahl		Austauschkosten k_a [€]		Anschaffungskosten k_t [€]	
	A320-200	A350-900	A320-200	A350-900	A320-200	A350-900
Struktur	1	1	100.000	150.000	100.000	150.000
Reifen	2	2	450	550	730	1.700
Felge	2	2	300	300	11.000	12.000

Tabelle 4-8: Bauteilkosten des Airbus A320-200 und A350-900 Bugfahrwerks [9, S. 64ff.]

4.3.3 Sonstige Daten

CO₂-Äquivalent

Zur Bewertung der Materialien hinsichtlich ihrer Umweltschädlichkeit wurde das CO₂-Äquivalent (GWP 100) gewählt. Die entsprechenden Werte sind in Tabelle 4-9 dargestellt.

Material	CO ₂ -Äquivalent $C_{Material,i}$ [kgCO ₂ eq/kg]
Aluminium	22,10
Kautschuk	3,97
Kohlenstoffverbund	2,37
Polyester	4,27
Stahl	2,24
Titan	48,30

Tabelle 4-9: Materialien mit dazugehörigem GWP 100 [35]

Der Nachteil des CO₂-Äquivalents ist, dass es die verschiedenen Herstellungsverfahren nicht angemessen berücksichtigt, da diese oft luftfahrtspezifisch sind und sich kontinuierlich weiterentwickeln. Dennoch stellt dieser einen guten Anhaltspunkt dar, um verschiedene Materialien einheitlich bewerten zu können [35].

Zeitwert des Geldes

Da es sich bei der hier durchgeführten LCC um eine Abschätzung im Rahmen einer traditionellen LCC handelt, wurde der Zeitwert des Geldes bzw. die Inflation nicht berücksichtigt. Es ist möglich, dies in zukünftigen Betrachtungen zu ergänzen und beispielsweise eine Inflationsrate von 6,2 anzunehmen. Diese ist laut Handelsblatt für das Jahr 2023 realistisch [76]. Zu beachten ist, dass sich die Inflation ständig ändert und gerade in den letzten Jahren sehr stark schwankt. Das hat zur Folge, dass für eine exakte Berechnung die Inflationsrate laufend angepasst werden muss und die berechneten Ergebnisse immer unter dem Gesichtspunkt zu bewerten sind, dass sich diese zum Zeitpunkt der Kosten bereits wieder geändert haben könnten. Dadurch sind Daten, die die Inflationsrate berücksichtigen immer mit einer zusätzlichen Unsicherheit behaftet.

4.4 Darstellung Tool

Zur Auswertung der Daten und Berechnung der Werte wurde Microsoft Excel verwendet. Dieses Programm ermöglicht eine zügige und unkomplizierte Auswertung der erhobenen Daten. Darüber hinaus erlaubt es, das Tool mit wenig Aufwand um weitere Komponenten zu erweitern. Ein wesentlicher Vorteil von Excel besteht darin, dass die Berechnungen leicht nachvollziehbar

sind und keine komplexe Programmiersprache erforderlich ist. Zudem ermöglicht es die einfache Erstellung einer übersichtlichen Benutzeroberfläche, die alle benötigten Werte klar darstellt. In den Abbildungen 4-7 bis 4-9 sind die entsprechenden Schnittstellen des Tools abgebildet. Abbildung 4-7 zeigt die Eingabeschnittstelle mit den notwendigen Auswahlmöglichkeiten für den Flugzeugtyp und das Bauteil. In Abbildung 4-8 sind die Anpassungsoptionen dargestellt. Falls keine spezifischen Anpassungen vorgenommen werden, erfolgt die Berechnung anhand der in der linken Spalte angezeigten Standardwerte. Abbildung 4-9 präsentiert die Ausgabeschnittstelle. Nach Eingabe aller erforderlichen Daten werden das Gewicht, das Gesamt-CO₂-Äquivalent sowie das CO₂-Äquivalent pro Flug und pro 1000 Passagierkilometer angezeigt. Ebenso werden die Gesamtkosten, die Kosten pro Flug und die Kosten pro 1000 Passagierkilometer sowie der Kreislaufwirtschaftsindex ausgegeben.

Flugzeugtyp: **Bauteil:**

Abbildung 4-7: Auswahlmöglichkeiten in der Eingabeschnittstelle des Tools

Zusammensetzung

Standard

Material	Anteil
Kohlenstoffverbund	40%
Stahl, niedrig legiert	60%
0	0%
0	0%
0	0%
0	0%
0	0%
0	0%
0	0%
0	0%
0	0%

Angepasst

Material	Anteil

Wartungsintervall FC
 Kosten für Austausch €
 Lebensdauer AC Jahre
 FC pro Tag:

Wartungsintervall FC
 Kosten für Austausch €
 Lebensdauer AC Jahre
 FC pro Tag:

Abbildung 4-8: Standardwerte (links) und Möglichkeiten der Anpassung (rechts) in der Eingabeschnittstelle des Tools

4 Bewertung unterschiedlicher Flugzeugtypen

Gewicht		Kreislaufwirtschaftswert [0-1]	
standard Bauteil	59,77 kg	standard Bauteil	0,4044
angepasst Bauteil	59,77 kg	angepasst Bauteil	0,4044
CO2 Äquivalent (gesamte Leben:		Kosten (gesamte Lebensdauer)	
standard Bauteil	7.561,19 kg CO2	standard Bauteil	2.839.618,55 €
angepasstes Bauteil	7.561,19 kg CO2	angepasstes Bauteil	2.839.618,55 €
CO2 Äquivalent (pro PAX km)		Kosten (pro PAX km)	
standard Bauteil	0,00000059 kg CO2 pro PAX km	standard Bauteil	0,000220 € pro PAX km
angepasstes Bauteil	0,00000059 kg CO2 pro PAX km	angepasstes Bauteil	0,000220 € pro PAX km
CO2 Äquivalent (pro Flug)		Kosten (pro Flug)	
standard Bauteil	0,64094206 kg CO2 pro Flug	standard Bauteil	240,706837 € pro Flug
angepasstes Bauteil	0,64094206 kg CO2 pro Flug	angepasstes Bauteil	240,706837 € pro Flug

Abbildung 4-9: Ausgabeschnittstelle des Tools

5 Auswertung

Im vorliegenden Kapitel werden die Ergebnisse der Berechnungen aus Kapitel 4 ausführlich dargestellt und diskutiert. Dabei wird in den Abschnitten 5.1 bis 5.3 auf die Resultate der verschiedenen angewandten Methoden (LCA, LCC und Kreislaufwirtschaftsindex) eingegangen. Im Abschnitt 5.4 erfolgt eine zusammenfassende Bewertung, in der die Ergebnisse der verschiedenen Methoden miteinander verglichen werden.

5.1 LCA

Die Ergebnisse der LCA sind tabellarisch in Tabelle 5-1 bis 5-4 dargestellt.

Airbus A320-200 - Hauptfahrwerk

	Gewicht [kg]	CO ₂ Äquivalent [kgCO ₂ eq]		
		gesamte Lebensdauer	pro 1000 PAX km	pro Flug
Struktur	193,52	9.113,99	0,0010	0,0912
Reifen	197,61	123.564,70	0,0131	1,2360
Felge	171,76	78.461,29	0,0083	0,7849
Bremsen	36,82	16.408,65	0,0017	0,1641
Gesamt	599,72	227.548,63	0,0241	2,2762

Tabelle 5-1: LCA Daten für Airbus A320-200 Hauptfahrwerk

Airbus A320-200 - Bugfahrwerk

	Gewicht [kg]	CO ₂ Äquivalent [kgCO ₂ eq]		
		gesamte Lebensdauer	pro 1000 PAX km	pro Flug
Struktur	69,09	1.626,91	0,0002	0,0163
Reifen	72,48	25.833,43	0,0027	0,2584
Felge	50,01	13.022,90	0,0014	0,1303
Gesamt	191,58	40.483,24	0,0043	0,4050

Tabelle 5-2: LCA Daten für Airbus A320-200 Bugfahrwerk

Airbus A350-900 - Hauptfahrwerk

	Gewicht [kg]	CO ₂ Äquivalent [kgCO ₂ eq]		
		gesamte Lebensdauer	pro 1000 PAX km	pro Flug
Struktur	315,88	31.051,23	0,0024	2,6323
Reifen	289,74	63.003,94	0,0049	5,3409
Felge	278,80	44.291,23	0,0034	3,7546
Bremsen	59,77	7.561,19	0,0006	0,6410
Gesamt	944,20	145.907,59	0,0113	12,3688

Tabelle 5-3: LCA Daten für Airbus A350-900 HauptfahrwerkAirbus A350-900 - Bugfahrwerk

	Gewicht [kg]	CO ₂ Äquivalent [kgCO ₂ eq]		
		gesamte Lebensdauer	pro 1000 PAX km	pro Flug
Struktur	95,90	4.713,75	0,0004	0,3996
Reifen	165,00	8.969,40	0,0007	0,7604
Felge	100,56	3.993,59	0,0003	0,3385
Gesamt	361,46	17.676,74	0,0014	1,4985

Tabelle 5-4: LCA Daten für Airbus A350-900 Bugfahrwerk

Aus den Daten der Tabellen 5-1 bis 5-4 geht hervor, dass das CO₂-Äquivalent für das Fahrwerk des Airbus A320-200 268.031,87 kgCO₂eq und für das Fahrwerk des Airbus A350-900 bei 163.584,33 kgCO₂eq beträgt. Daraus lässt sich schließen, dass das Fahrwerk des A320-200 während des gesamten Lebenszyklus mehr kgCO₂eq erzeugt als das des A350-900. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Fahrwerk des A320-200 deutlich häufiger gewechselt werden muss als das des A350-900. Der Wechselzyklus hängt nur von der Anzahl der durchgeführten Flüge (FC) und nicht von den Flugstunden ab. Dies stellt eine Besonderheit dar. Da der A350-900 im Durchschnitt nur 0,95 Flüge pro Tag absolviert, der A320-200 hingegen 8,05 Flüge pro Tag, ist beim A320-200 bei gleicher Lebensdauer ein häufigerer Austausch erforderlich. Dies gilt unter der aus dem MPD entnommenen Annahme, dass die Anzahl der Flüge bis zum Austausch bei beiden Flugzeugen gleich ist. [9, S. 64ff.]

In einem weiteren Schritt wurde das kgCO₂eq pro Flug berechnet. Hier zeigt sich deutlich, dass das Fahrwerk des A320-200 mit 2,69 kgCO₂eq deutlich weniger Emissionen verursacht als das Fahrwerk des A350-900 mit 13,87 kgCO₂eq. Dies entspricht der ursprünglichen Intuition, dass ein größeres Fahrwerk mit höherem Materialverbrauch im Durchschnitt auch eine höhere Umweltbelastung darstellt.

Die Betrachtung der kgCO₂eq pro 1000 Passagierkilometer führt zum gleichen Ergebnis wie die Betrachtung der gesamten kgCO₂eq. Dies liegt daran, dass ein durchschnittlicher Flug eines A320-200 702 km beträgt, ein durchschnittlicher Flug eines A350-900 4.466 km.

In Abbildung 5-1 und 5-2 ist die Verteilung des Gewichts und des CO₂-Äquivalents graphisch dargestellt.

Gewicht

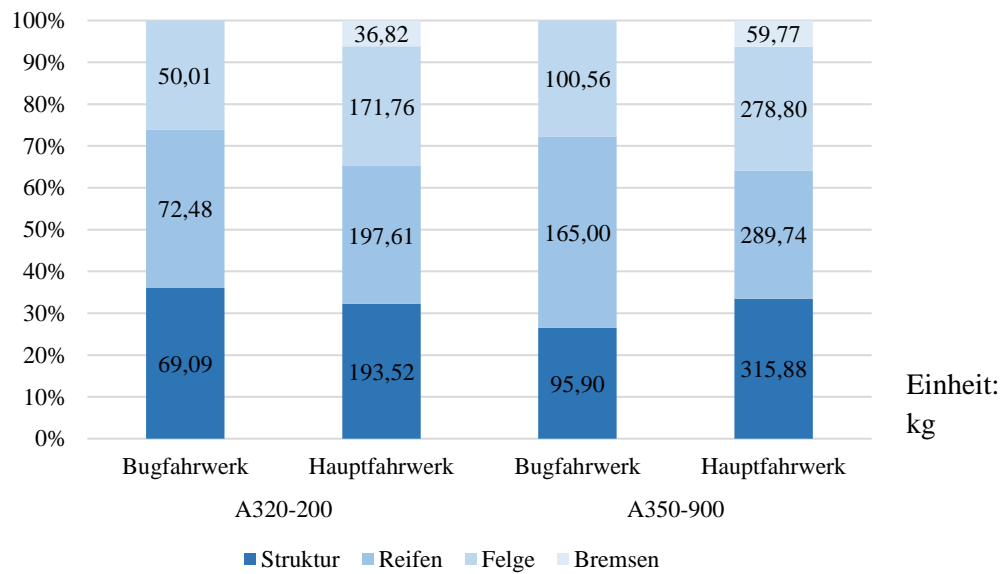


Abbildung 5-1: Darstellung der Gewichtsaufteilung [kg] des Airbus A320-200 und Airbus A350-900

CO₂-Äquivalent

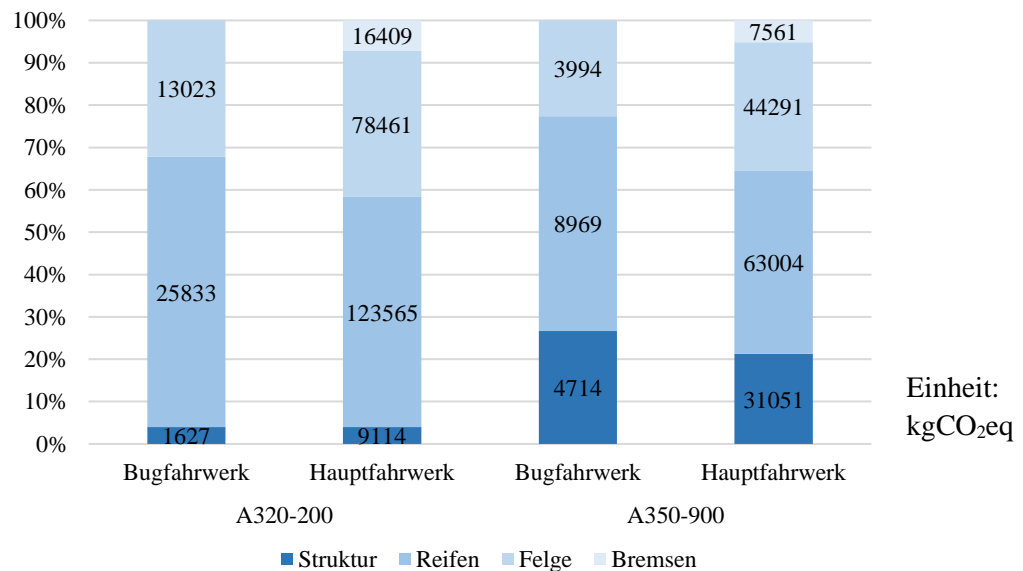


Abbildung 5-2: Darstellung der CO₂-Äquivalentsaufteilung [kgCO₂eq] des Airbus A320-200 und Airbus A350-900

In Abbildung 5-1 wird die Gewichtsufteilung des Bug- und Hauptfahrwerks des Airbus A320-200 und Airbus A350-900 dargestellt. Die Verteilung der Anteile zeigt eine relative Gleichmäßigkeit, wobei beim Bugfahrwerk jedes Bauteil einen Anteil zwischen 25 und 35% der Gesamtmasse ausmacht. Eine ähnliche Verteilung ist beim Hauptfahrwerk zu beobachten, wobei die Struktur, die Reifen und Felgen jeweils zwischen 30 und 35% der Gesamtmasse repräsentieren.

Im Gegensatz dazu ist der Anteil der Bremsen mit weniger als 10% der Gesamtmasse deutlich geringer. Dies lässt sich auf die geringere Größe der Bremsen zurückführen, die im Vergleich zu den anderen Bauteilen ein deutlich kleineres Volumen aufweisen. Zusätzlich bestehen die Bremsen zu 40% aus Kohlenstoffverbund. Aufgrund der geringeren Dichte dieses Materials im Vergleich zu Stahl resultiert in Kombination mit dem reduzierten Volumen in einem geringeren Gewicht und somit einem kleineren Anteil am Gesamtgewicht.

In Abbildung 5-2 ist ersichtlich, dass die Struktur lediglich einen geringen Anteil am gesamten CO₂-Äquivalent ausmacht. Dies lässt sich darauf zurückführen, dass die Struktur seltener ausgetauscht werden muss. Basierend auf den angenommenen Daten beträgt die Anzahl der Flugzyklen (FC) etwa 100.000 für ein Flugzeugleben des A320-200 und etwa 12.000 für den A350-900. In beiden Fällen wird die Struktur nach 20.000 FC ausgetauscht. Folglich muss die Struktur beim A350-900 überhaupt nicht ausgewechselt werden und beim A320-200 lediglich 5-mal während seiner Lebensdauer.

Im Gegensatz dazu müssen die Reifen deutlich häufiger ausgetauscht werden. Beim A320-200 erfolgt ein kompletter Austausch alle 1400 FC (bzw. 1600 FC für das Hauptfahrwerk) und beim A350-900 alle 1200 FC. Darüber hinaus sind beim A320-200 insgesamt 6 Reifen und beim A350-900 insgesamt 10 Reifen im Einsatz. Dies führt dazu, dass während des Lebenszyklus des A320-200 insgesamt etwa 392 Reifen und beim A350-900 etwa 100 Reifen verbraucht werden. Dies gilt äquivalent für die Felgen. Obwohl das CO₂-Äquivalent pro Kilogramm Material für Reifen und Felgen geringer ist, machen sie einen deutlich größeren Anteil am gesamten CO₂-Äquivalent aus als die Struktur. Es fällt auf, dass die Reifen jeweils etwa 50% des gesamten CO₂-Äquivalents ausmachen.

Zusätzlich sind in Abbildung 5-3 und 5-4 die CO₂-Äquivalente für jedes einzelne Bauteil dargestellt. Hierbei wird deutlich, welche Bauteile den größten Anteil am CO₂-Äquivalent haben.

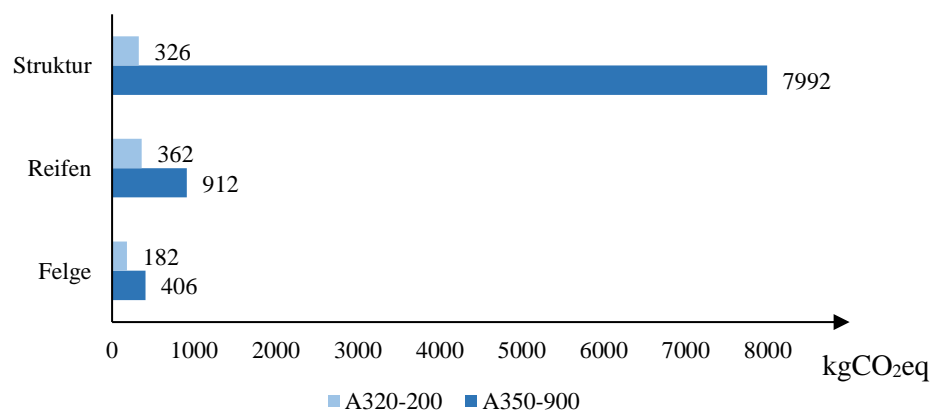


Abbildung 5-3: Vergleich der CO₂-Äquivalente der Bauteile des Bugfahrwerks

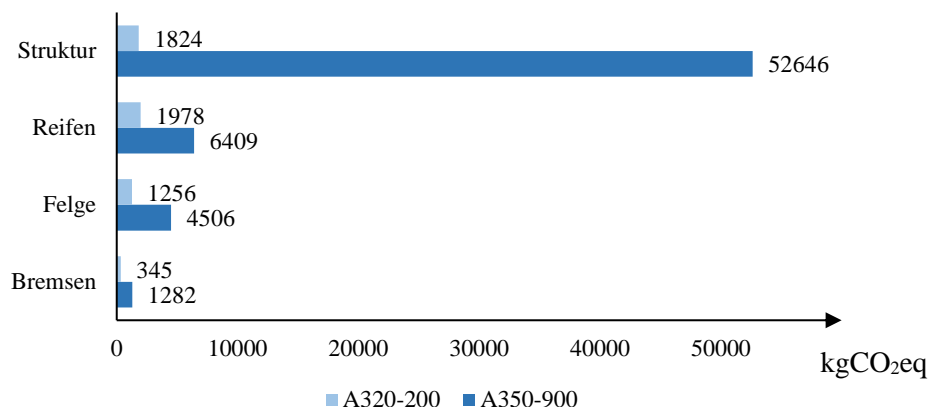


Abbildung 5-4: Vergleich der CO₂-Äquivalente der Bauteile des Hauptfahrwerks

Die grafische Darstellung der CO₂-Äquivalente verdeutlicht, dass die Struktur des Airbus A350-900 Fahrwerks ein signifikant höheres CO₂-Äquivalent aufweist im Vergleich zur Struktur des Airbus A320-200 Fahrwerks. Dies ist hauptsächlich darauf zurückzuführen, dass die Struktur des A350-900 deutlich schwerer ist, mit einem Gewicht von 95,9 kg im Vergleich zu 69,1 kg beim A320-200 für das Hauptfahrwerk und 193,5 kg im Vergleich zu 315,9 kg für das Bugfahrwerk. Zudem besitzt Titan, das im Fahrwerk des A350-900 verwendet wird, ein bedeutend höheres CO₂-Äquivalent als Stahl, das im Fahrwerk des A320-200 überwiegt, mit Werten von 48,3 im Vergleich zu 2,2.

Diese Unterschiede in Materialzusammensetzung und Gewicht führen zu den beobachteten Diskrepanzen im CO₂-Äquivalent. Die Annahme in Kapitel 4.3.2, dass das Fahrwerk des A320-200 zu 80% aus Stahl, 10% aus Aluminium und 10% aus Titan besteht, während das Fahrwerk des Airbus A350-900 zu 80% aus Titan, 10% aus Aluminium und 10% aus Stahl besteht, führt zu einem klaren Anstieg des CO₂-Äquivalents für die Struktur des A350-900 im Vergleich zum A320-200.

5.2 LCC

Die Ergebnisse der LCC sind tabellarisch in Tabelle 5-5 bis 5-8 dargestellt.

Airbus A320-200 - Hauptfahrwerk

	Gewicht	gesamte Lebensdauer	Kosten [€]	
	[kg]		pro 1000 PAX km	pro Flug
Struktur	193,52	3.178.524	0,3363	31,79
Reifen	197,61	1.089.575	0,1153	10,90
Felge	171,76	2.959.080	0,3131	29,60
Bremsen	36,82	7.648.874	0,8092	76,51
Gesamt	599,72	14.876.054	1,5738	148,81

Tabelle 5-5: LCC Daten für Airbus A320-200 Hauptfahrwerk

Airbus A320-200 - Bugfahrwerk

	Gewicht	gesamte Lebensdauer	Kosten [€]	
	[kg]		pro 1000 PAX km	pro Flug
Struktur	69,09	795.226	0,0841	7,95
Reifen	72,48	470.361	0,0498	4,71
Felge	50,01	1.393.852	0,1475	13,94
Gesamt	191,58	2.659.439	0,2814	26,60

Tabelle 5-6: LCC Daten für Airbus A320-200 Bugfahrwerk

Airbus A350-900 - Hauptfahrwerk

	Gewicht	gesamte Lebensdauer	Kosten [€]	
	[kg]		pro 1000 PAX km	pro Flug
Struktur	315,88	538.946	0,0418	45,69
Reifen	289,74	587.118	0,0455	49,77
Felge	278,80	994.142	0,0770	84,27
Bremsen	59,77	2.839.619	0,2200	240,72
Gesamt	944,20	4.959.825	0,3843	420,45

Tabelle 5-7: LCC Daten für Airbus A350-900 Hauptfahrwerk

Airbus A350-900 - Bugfahrwerk

	Gewicht	gesamte Lebensdauer	Kosten [€]	
	[kg]		pro 1000 PAX km	pro Flug
Struktur	95,90	157.878	0,0122	13,38
Reifen	165,00	228.901	0,0177	19,40
Felge	100,56	207.637	0,0161	17,60
Gesamt	361,46	594.416	0,0461	50,39

Tabelle 5-8: LCC Daten für Airbus A350-900 Bugfahrwerk

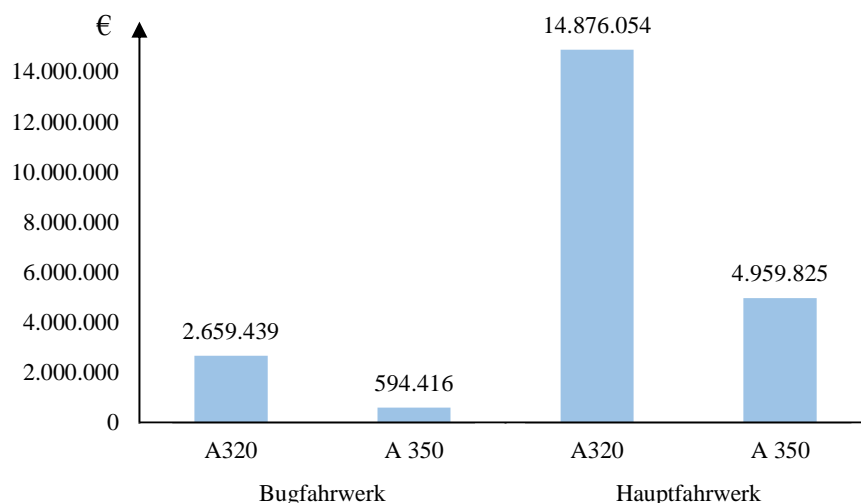


Abbildung 5-5: Gesamtkosten für Bug- und Hauptfahrwerk des Airbus A320-200 und Airbus A350-900

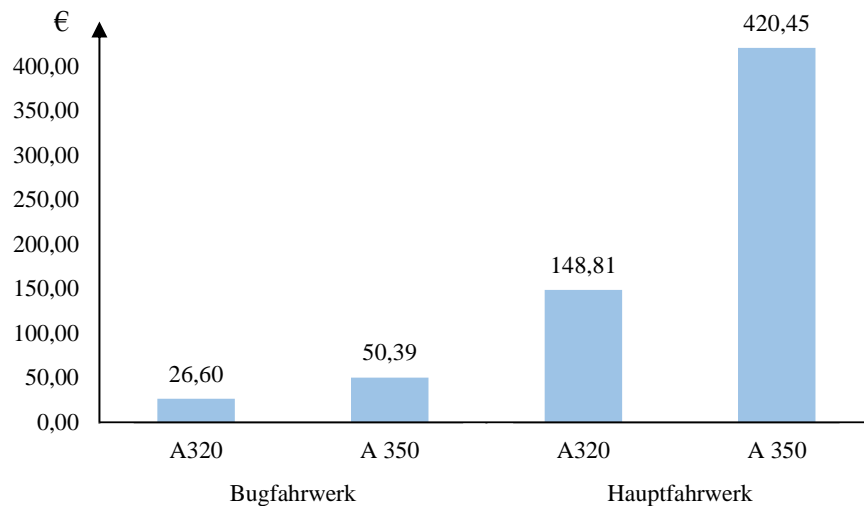


Abbildung 5-6: Kosten pro Flug für Bug- und Hauptfahrwerk des Airbus A320-200 und Airbus A350-900

Bei den unterschiedlichen Werten für das Fahrwerk des A320-200 und des A350-900 (Abbildung 5-5 und 5-6) fällt auf, dass die Gesamtkosten des A320-200 (17.535.493 €) deutlich höher sind als die des A350-900 (5.554.241 €). Daher wurden zusätzlich die Kosten pro Flug berechnet. Diese betragen für den A320-200 175,41 € und für den A350-900 470,84 €. Hier bestätigt sich das Gegenteil, denn die Kosten für den A350-900 sind höher als für den A320-200. Der Grund hierfür ist derselbe wie bei der LCA.

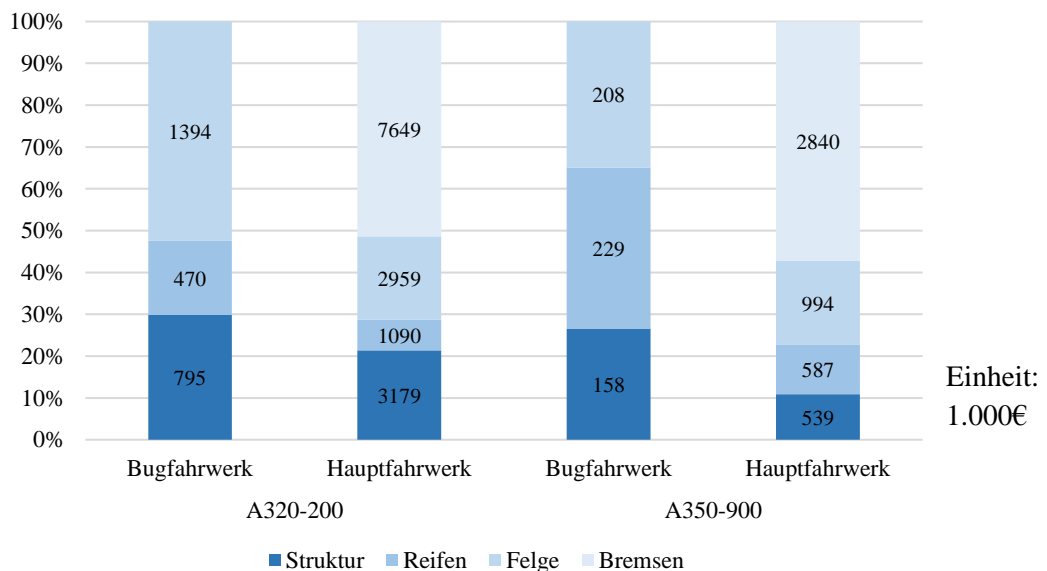


Abbildung 5-7: Darstellung der Gesamtkostenaufteilung (in 1.000€) des Airbus A320-200 und Airbus A350-900

Bei der Analyse der Gesamtkostenzusammensetzung wird deutlich, dass der Austausch von Reifen und Felgen (diese werden immer gemeinsam ausgetauscht), sowohl beim Bugfahrwerk des A320-200 als auch des A350-900 über 70% der Gesamtkosten ausmacht. Dieser hohe Kostenanteil lässt sich, wie bereits in Abschnitt 5.1 ausführlich erörtert, auf die hohe Austauschfrequenz zurückführen. Im Falle des Hauptfahrwerks präsentiert sich eine andere Kostenstruktur. Hier sind die Bremsen für über 50% der Gesamtkosten verantwortlich. Dies ist darauf zurückzuführen, dass die Bremsen in regelmäßigen Abständen von etwa 2.000 Flugzyklen (bzw. 2.100 Flugzyklen beim A350-900) ausgetauscht werden müssen. Der Austausch einer Bremse verursacht Kosten von ungefähr 40.000 € beim A320-200 und etwa 60.000 € beim A350-900 (siehe Abschnitt 4.3.2). Da pro Austauschvorgang 4 (A320-200) bzw. 8 (A350-900) Bremsen benötigt werden, ergibt sich während des gesamten Lebenszyklus des A320-200 ein Bedarf von etwa 200 Bremsen und beim A350-900 von etwa 48 Bremsen. Die hohen Anschaffungskosten pro Bremse tragen wesentlich zu den Gesamtkosten bei. Auffällig ist zudem, dass bei den Hauptfahrwerken der Großteil der verbleibenden Kosten erneut auf die Reifen und Felgen entfällt (60% beim A320-200 und 75% beim A350-900). Hier zeigt sich indirekt die gleiche Kostenverteilung wie beim Bugfahrwerk. Die restlichen Kosten (Felgen, Reifen und Struktur) sind aufgrund der hohen Bremsenkosten stark komprimiert.

Eine Analyse der Einflussfaktoren verdeutlicht, dass selbst geringfügige Änderungen bei den Wartungsaufgaben erhebliche Auswirkungen auf das Gesamtergebnis haben können. Dies resultiert aus der häufigen Durchführung vieler Wartungsaufgaben, wodurch sie erheblich zum Gesamtaufwand beitragen.

5.3 Kreislaufwirtschaftsindex

In diesem Abschnitt werden die Kreislaufwirtschaftswerte für die ausgewählten Bauteile diskutiert. Dazu wurden zunächst die Kreislaufwirtschaftswerte für die verschiedenen Materialien bestimmt (vgl. Tabelle 5-9). Dabei wurde angenommen, dass die Rohstoffe nur aus neuen Rohstoffen bestehen und nicht aus wiederverwendeten oder recycelten Materialien. Dies wäre durch die hohen Anforderungen in der Luftfahrt kaum oder nur mit sehr hohem Aufwand möglich. Zusätzlich wurden die Werte aus Lopez (2010) verwendet, um die Recyclinganteile der verschiedenen Materialien zu bestimmen [93, S. 59]. Die verwendeten Werte sind in Anhang G tabellarisch dargestellt. Darüber hinaus wurde eine Recyclingeffizienz von 0,95 sowohl für die Rohstoffe als auch für die Materialien am EoL angenommen. [104, S. 19]. Die Recyclingeffizienz gibt dabei den prozentualen Anteil der Rohstoffe an, die nach dem Recycling wiederverwendet werden können. Eine Recyclingeffizienz von 0,95 bedeutet dabei das 95% der Rohstoffe wiederverwendet werden können und 5% der Rohstoffe als Abfall entstehen und nicht weiterverwendet werden können.

Material	Kreislaufindex [0-1]
Aluminium	0,4572
Kautschuk	0,3250
Kohlenstoffverbund	0,3250
Polyester	0,3250
Stahl	0,4573
Titan	0,4557

Tabelle 5-9: Materialien mit dazugehörigem Kreislaufindexwert

Bei den Daten der Materialien fällt auf dass diese teilweise sehr ähnlich sind. So haben alle Metalle sehr ähnliche Werte und auch die Materialien Kautschuk, Kohlenstoffverbund und Polyester haben den gleichen Kreislaufwirtschaftsindex.

Mithilfe der Daten der unterschiedlichen Materialien ist es möglich, die Kreislaufwirtschaftswerte für die einzelnen Komponenten und auch für das gesamte Bauteil zu bestimmen. Die Ergebnisse sind in Tabelle 5-10 dargestellt und in Abbildung 5-8 und 5-9 graphisch aufbereitet.

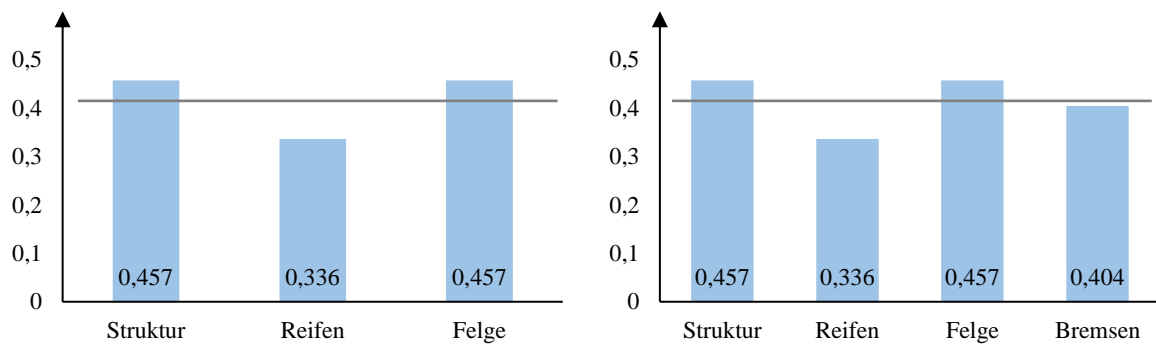


Abbildung 5-8: Kreislaufwirtschaftsindex für das A320-200 Bug- (links) und Hauptfahrwerk (rechts) sowie das gesamte Bauteil (graue Linie)

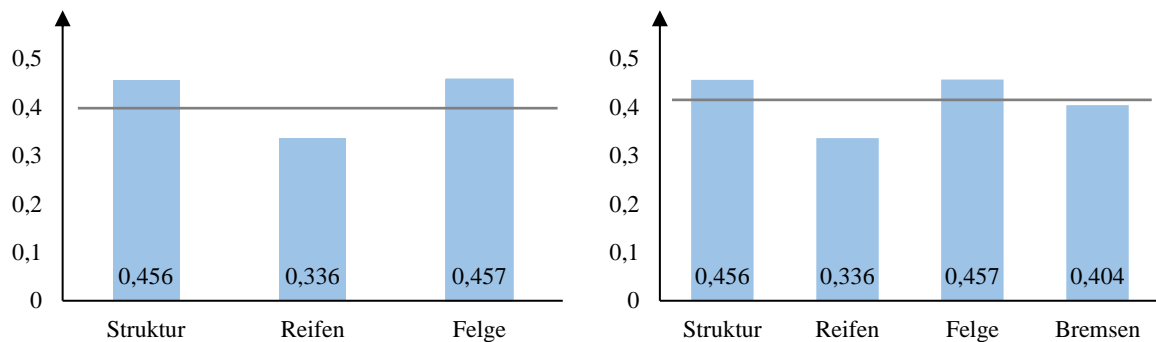


Abbildung 5-9: Kreislaufwirtschaftsindex für das A350-900 Bug- (links) und Hauptfahrwerk (rechts) sowie das gesamte Bauteil (graue Linie)

Bei der detaillierten Analyse der einzelnen Abbildungen wird deutlich, dass die Reifen einen signifikant niedrigeren Kreislaufwirtschaftsindex im Vergleich zur Gesamtkomponente aufweisen. Dies ist hauptsächlich auf die Zusammensetzung der Reifen zurückzuführen, die überwiegend aus Kautschuk und Kohlenstoffverbund bestehen. Beide Materialien weisen einen vergleichsweise niedrigen Kreislaufwirtschaftsindex auf, was dazu führt, dass auch der Kreislaufwirtschaftsindex der gesamten Komponente entsprechend gering ausfällt. Diese Beobachtung gewinnt an Bedeutung im Kontext der Optimierung von Komponenten hinsichtlich ihrer Kreislaufwirtschaftlichkeit.

Um die Kreislaufwirtschaftlichkeit zu verbessern, ist es besonders sinnvoll, Bauteile anzupassen, die gegenwärtig einen niedrigen Kreislaufwirtschaftsindex aufweisen. Dies kann durch verschiedene Ansätze erreicht werden, beispielsweise indem das verwendete Material durch ein Material mit einem höheren Kreislaufwirtschaftsindex ersetzt wird. Alternativ können auch die Einflussfaktoren des Kreislaufwirtschaftsindex verbessert werden, um den Gesamtwert des Materials zu steigern. Möglichkeiten hierfür sind die Steigerung der Recyclingeffektivität oder verstärkter Einsatz von recycelten Materialien in der Herstellung neuer Produkte.

Zu beachten ist, dass bereits zu Beginn dieses Abschnitts aufgezeigt wurde, dass es in der Luftfahrtbranche aufgrund der hohen Qualitätsanforderungen schwierig ist, recycelte Materialien mit reduzierter Qualität einzusetzen. Eine sinnvolle Alternative besteht darin, die Materialien nach ihrem Einsatz in der Luftfahrt in anderen Industriezweigen zu verwenden, die weniger anspruchsvolle Anforderungen haben. Auf diese Weise kann der Kreislaufwirtschaftsindex weiter gesteigert werden.

Wichtig ist, dass der Kreislaufwirtschaftsindex nicht nur durch die Verwendung von Materialien nach ihrem Einsatz beeinflusst wird, sondern auch maßgeblich davon abhängt, aus welchen Materialien das Produkt selbst hergestellt wird. Unter Berücksichtigung der hohen Qualitätsanforderungen in der Luftfahrtindustrie, die den Einsatz von recycelten Materialien einschränken, ist es unter diesen Umständen nicht möglich, einen Kreislaufwirtschaftsindex von über 0,5 zu erreichen.

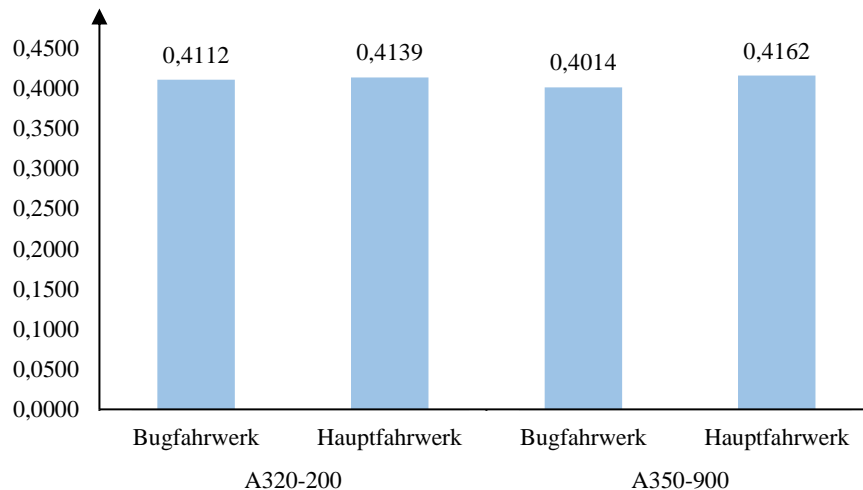


Abbildung 5-10: Kreislaufwirtschaftsindex für das Bug- und Hauptfahrwerk des Airbus A320-200 und des Airbus A350-900

Auffallend ist, dass die Werte für den A320-200 und den A350-900 sehr ähnlich sind (siehe Abbildung 5-10). Generell sind nur sehr geringe Unterschiede zu erkennen. Durch die getroffene Annahme (keine Verwendung von recycelten oder wiederverwendeten Materialien zur Herstellung neuer Materialien) weisen alle Werte deutlich in Richtung einer linearen Wirtschaft. Obwohl das Strukturmaterial des Fahrwerks zwischen dem A320-200 (hauptsächlich Aluminium) und dem A350-900 (hauptsächlich Titan) unterschiedlich ist, ist der Kreislaufwirtschaftsindex nahezu identisch. Dies begründet sich darin, dass zur Ermittlung des Wertes nur die Massenströme am EoL berücksichtigt werden. Diese sind für beide Werkstoffe weitgehend gleich, so dass sich ein ähnlicher Kreislaufwirtschaftsindex ergibt.

Durch die Methode der Ellen MacArthur Foundation zur Bestimmung des Kreislaufwirtschaftswerts ist es möglich, den verschiedenen Materialien einen Kreislaufwirtschaftsindex zuzuordnen. Dieser basiert jedoch ausschließlich auf der Menge des wiederverwendeten/recycelten Materials. Er berücksichtigt nicht die Schwierigkeit des Recyclings und die damit verbundenen Kosten oder Emissionen.

5.4 Vergleich der verschiedenen Bewertungsmethoden

Alle drei durchgeführten Bewertungsmethoden haben ihre Vor- und Nachteile und helfen dem Entscheidungsträger, eine sinnvolle Entscheidung zu treffen. Darüber hinaus haben sie gezeigt, dass es möglich ist, Flugzeugkomponenten aus verschiedenen Perspektiven zu betrachten und differenziert zu bewerten. So ist es z.B. aus Sicht des Klimaschutzes sinnvoll eine LCA durchzuführen, aus Sicht einer Airline ist eine LCC besonders interessant und im Zuge der Rohstoffverknappung und Kreislaufwirtschaft ist der Kreislaufwirtschaftswerte besonders interessant. Durch die schwierige Datenlage war es nicht möglich die absoluten Werte zutreffend zu

bestimmen. Dies ist jedoch nur von geringem Nachteil da es im ersten Schritt darum ging das Tool zu validieren und zu prüfen, ob die Ergebnisse in einem sinnvollen Verhältnis zueinanderstehen. In einem späteren Schritt können mithilfe der exakten Daten auch die absoluten Ergebnisse zutreffend berechnet werden.

Die Berechnung des CO₂-Äquivalents, der Kosten und des Kreislaufwirtschaftsindex hat gezeigt, dass es sinnvoll ist, ein Produkt mit unterschiedlichen Methoden zu bewerten. Häufig wird nur eine Dimension berücksichtigt. Jede Methode für sich hat ihre individuellen Schwächen, gerade weil sie das Produkt oft sehr einseitig analysiert und viele andere Faktoren nicht berücksichtigt. Durch die Erstellung des Tools ist es nun möglich, ein Produkt aus verschiedenen Blickwinkeln zu betrachten und z.B. verschiedene Materialien hinsichtlich ökologischer und ökonomischer Faktoren gegeneinander abzuwägen. So kann es beispielsweise sein, dass durch den Einsatz eines Materials Kosten gespart werden können, das gleiche Material aber mit einem deutlich höheren CO₂-Äquivalent verbunden ist oder sich deutlich schlechter im Kreislauf halten lässt. Nur durch eine ganzheitliche Betrachtung der verschiedenen Faktoren ist es möglich, alle Interessen der verschiedenen Stakeholder (Airline, Hersteller, Umweltschutz etc.) gleichzeitig zu berücksichtigen.

In Anbetracht der zunehmenden Größe der Flugzeugflotten ist es von Bedeutung, nicht nur die Flugzeuge im Hinblick auf finanzielle Aspekte zu optimieren, sondern auch ökologische Faktoren zu berücksichtigen, insbesondere mit Blick auf die im Flightpath 2050 definierten Ziele. Dieser Zukunftsplan enthält nicht nur Emissionsziele, sondern betont auch das Bestreben, sich verstärkt auf nachhaltiges Design zu konzentrieren und dieses konsequent zu implementieren. In diesem Zusammenhang bieten die zuvor gewonnenen Erkenntnisse eine wertvolle Grundlage. Sie ermöglichen es, Bauteile mit besonders hohem CO₂-Äquivalent oder besonders niedrigem Kreislaufwirtschaftsindex zu identifizieren und zu optimieren.

Darüber hinaus eröffnet das entwickelte Tool die Möglichkeit, diese modifizierten Bauteile im Hinblick auf die damit verbundenen Kosten zu bewerten. Die Erfahrung hat gezeigt, dass Innovationen nur dann erfolgreich sind, wenn sie auch wirtschaftliche Vorteile für alle Stakeholder bieten. Daher ist es essenziell, nicht nur ökologische, sondern auch finanzielle Aspekte bei der Optimierung von Flugzeugbauteilen zu berücksichtigen. Dieser ganzheitliche Ansatz gewährleistet nicht nur die Erreichung der umweltbezogenen Ziele, sondern auch die Wettbewerbsfähigkeit und Akzeptanz solcher Neuerungen in der Luftfahrtindustrie.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die vorliegende Masterarbeit widmete sich verschiedenen zentralen Fragestellungen. Erstens wurde analysiert, in welchen Bereichen die Kreislaufwirtschaft bereits heute in der Luftfahrt umgesetzt wird und welche Herausforderungen dabei auftreten. Zweitens wurde untersucht, wie das Butterfly-Diagramm für die Luftfahrt angepasst werden muss und ob ein einheitlicher Bewertungsansatz für verschiedene Flugzeugtypen entwickelt werden kann, um sie ganzheitlich zu betrachten. Dabei wurden auch die Schwierigkeiten analysiert, die bei der Entwicklung des Tools auftraten. Drittens wurde erforscht, wie sich die Verwendung unterschiedlicher Materialien auf die Umsetzbarkeit der Kreislaufwirtschaft auswirkt.

Bisherige Studien haben sich hauptsächlich auf die Wiederverwendung und das Recycling von Rohstoffen am Ende der Lebensdauer eines Flugzeugs konzentriert. Diese Arbeit verfolgte das Ziel, den gesamten Lebenszyklus eines Flugzeugs umfassend zu betrachten und mithilfe verschiedener Bewertungsmethoden quantifizierbar zu machen. Dazu wurden eine vereinfachte Lebenszyklusanalyse und eine Lebenszykluskostenanalyse durchgeführt sowie der Kreislaufwirtschaftsindex angewandt. Zudem wurde ein erster Vergleich zwischen den Fahrwerken des Airbus A320-200 und des Airbus A350-900 vorgenommen.

Im ersten Schritt wurde die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft in der Luftfahrt analysiert. Die Implementierung im Bereich End-of-Life ist bereits heute in der Luftfahrtindustrie zu beobachten. Es ist üblich, verschiedene Komponenten aus ausgemusterten Flugzeugen auszubauen und nach einer Rezertifizierung in andere Flugzeuge einzubauen. Dennoch treten, bei der Umsetzung der Kreislaufwirtschaft, Herausforderungen auf, insbesondere im Bereich der Verbundwerkstoffe. Es wird zukünftig notwendig sein, kostengünstige und energieeffiziente Recyclingtechnologien zu erforschen, um dem steigenden Aufkommen von kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffabfällen (CFK-Abfällen) entgegenzuwirken. Zusätzlich wird besonders in der Luftfahrt die Umsetzung der Kreislaufwirtschaft durch strenge Regulierungen und die globale Verteilung erschwert, was die Koordination und Umsetzung erheblich beeinträchtigt.

Im weiteren Verlauf der Masterarbeit wurde das Butterfly-Diagramm der Ellen MacArthur Foundation analysiert. Dabei wurde festgestellt, dass dieses Diagramm einen vielversprechenden Ansatz bietet, um die Kreislaufwirtschaft in der Luftfahrt grafisch zu veranschaulichen. Aufgrund der hohen Komplexität der Luftfahrtbranche waren jedoch verschiedene Anpassungen erforderlich. Dies schloss die Ergänzung weiterer Kreisläufe ein, da es in der Praxis nicht möglich ist, das gesamte Recyclingvolumen vollständig wiederzuverwenden, wie es im ursprünglichen Konzept des Butterfly-Diagramms vorgesehen ist. Zudem erfolgten Änderungen in der Aufteilung der Kreisläufe, da in der Luftfahrt verschiedene Besitzverhältnisse existieren

und es für die Ausarbeitung des Butterfly-Diagramms von Bedeutung ist, ob ein Flugzeug im Eigentum der Fluggesellschaft oder einer Leasingfirma steht. Des Weiteren wurden verschiedene Konstellationen zwischen Airline und Instandhaltungsbetrieb berücksichtigt.

Im abschließenden Abschnitt dieser Arbeit wurde ein Bewertungstool entwickelt, das die Möglichkeit bietet, Bauteile anhand ökologischer, ökonomischer und kreislaufwirtschaftlicher Kriterien zu evaluieren und miteinander zu vergleichen. Durch die Implementierung einer konsistenten Lebenszyklusanalyse können mithilfe weniger Eingaben die kgCO_2eq -Emissionen eines Bauteils ermittelt werden. Während der Untersuchung wurde deutlich, dass Reifen und Felgen aufgrund ihrer hohen Wechselfrequenz den größten Anteil am CO_2 -Äquivalent ausmachen. Gleichzeitig ermöglicht die Durchführung einer traditionellen Lebenszykluskostenanalyse eine Abschätzung der Kosten. In dieser Untersuchung konnte festgestellt werden, dass die Bremsen mehr als 50% der Gesamtkosten ausmachen, während auch Reifen und Felgen einen signifikanten Anteil an den Kosten tragen. Die Lebenszyklusanalyse und Lebenszykluskostenanalyse wurde durch die Berechnung des Kreislaufwirtschaftsindex ergänzt. Anhand des Kreislaufwirtschaftsindex konnte nachgewiesen werden, dass unterschiedliche Materialien wie Gummi oder Stahl zu unterschiedlichen Umsetzbarkeiten der Kreislaufwirtschaft führen können. Bei Bauteilen aus verschiedenen Metallen hingegen war kaum ein Unterschied erkennbar. Die gleichzeitige Berücksichtigung aller drei Faktoren gewährleistet eine ganzheitliche Bewertung des Bauteils und somit eine schnelle Quantifizierung aller Anforderungen der Stakeholder.

Bei der Bewertung des Fahrwerks des A320-200 und des A350-900 treten jedoch einige relevante Einschränkungen auf. Zur Bestimmung der kgCO_2eq -Emissionen wurden Daten aus der Ecoinvent-Datenbank verwendet, einer Datenbank, die allgemein für die Industrie entwickelt wurde und nicht speziell für die Luftfahrtbranche. Dies kann zu Abweichungen zwischen den verwendeten Werten und den tatsächlichen Werten führen. Des Weiteren war es nicht möglich, für alle benötigten Werte Nachweise in der Literatur zu finden. Bei einigen Fahrwerkskomponenten, wie dem Durchmesser oder der Wandstärke, mussten Abschätzungen vorgenommen werden. Aufgrund der Komplexität der Luftfahrt waren an einigen Stellen Vereinfachungen notwendig. Zum Beispiel wurde keine ungeplante Wartung berücksichtigt, da diese schwer abzuschätzen ist und es keine geeigneten Daten in der Literatur gab.

Im Kontext dieser bisherigen Forschungsarbeit ergeben sich mehrere interessante Bereiche für zukünftige Untersuchungen. Es wäre lohnenswert, das Butterfly-Diagramm der Ellen MacArthur Foundation weiterzuentwickeln und den Detaillierungsgrad zu erhöhen. Eine Möglichkeit hierbei wäre die Erweiterung um verschiedene Lieferantennstufen während der Herstellung, um die unterschiedlichen Konstellationen der Zulieferer genauer zu berücksichtigen. Zudem ist es von großem Interesse, neue Flugzeugkonzepte wie den Blended Wing Body oder wasserstoffbetriebene Flugzeuge mithilfe des entwickelten Tools zu bewerten. Dabei sollten diese Konzepte unter Einbeziehung aller drei Faktoren mit den derzeitigen Modellen verglichen

werden. Diese Vorgehensweise ermöglicht eine Abschätzung, inwiefern zukünftige Flugzeugkonzepte neben den ökologischen Vorteilen auch weitere Aspekte wie Kosteneinsparungen oder eine verbesserte Kreislaufwirtschaft bieten könnten. Zu diesem Zweck wurde das Tool so entwickelt, dass eine einfache Anpassung ermöglicht wird, um zusätzliche Komponenten oder Flugzeugtypen in die Bewertung einzubeziehen.

7 Literaturverzeichnis

- [1] ACARE: Advisory Council for Aviation Research and Innovation, <https://www.acare4europe.org/>(aufgerufen am: 27. April 2023).
- [2] AIRBUS S.A.S: Delivering the Future, Global Market Forecast 2011-2030, Toulouse, 2011.
- [3] AIRBUS S.A.S: Flying on Demand - Global Market Forecast 2014-2033, 2014.
- [4] AIRBUS S.A.S: Maintenance Planning Document, A350, 2015.
- [5] AIRBUS S.A.S: Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning, A350, 2020.
- [6] AIRBUS S.A.S: Aircraft Characteristics Airport and Maintenance Planning, A320, 2020.
- [7] AIRBUS S.A.S: Maintenance Planning Document, A320, 2022.
- [8] AIRCRAFT COMMERCE: The economics of converted versus new-build freighters, 2015.
- [9] AIRCRAFT COMMERCE: Landing gear, wheels and brakes maintenance, 114. Aufl, Aircraft Commerce (114), S 59–67, 2017.
- [10] ANDERSSON, A.; SÖDERBERG, A.: Circular Logistics in the Construction Industry - An exploratory study based in a Swedish context, 2022.
- [11] ASMATULU, E.; OVERCASH, M.; TWOMEY, J.: Recycling of Aircraft: State of the Art in 2011, Journal of Industrial Engineering 2013, S 1, 2012.
- [12] BACHMANN, J.; HIDALGO, C.; BRICOUT, S.: Environmental analysis of innovative sustainable composites with potential use in aviation sector—A life cycle assessment review, Sci. China Technol. Sci. 60(9), S 1301–1317, doi:10.1007/s11431-016-9094-y, 2017.
- [13] BAKKER, C.; WANG, F.; HUISMAN, J.; HOLLANDER, M. den: Products that go round: exploring product life extension through design, Journal of Cleaner Production 69, S 10–16, doi:10.1016/j.jclepro.2014.01.028, 2014.
- [14] BAY, L.: Ranking, Handelsblatt, <https://www.handelsblatt.com/unternehmen/handelskonsumgueter/ranking-die-aeltesten-flugzeugflotten-der-welt/7021992.html> (aufgerufen am: 23. Juni 2023), 2012.
- [15] BECK, A.J.; HODZIC, A.; SOUTIS, C.; WILSON, C.W.: Influence of Implementation of Composite Materials in Civil Aircraft Industry on reduction of Environmental Pollution and Greenhouse Effect, IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng. 26, S 12015, doi:10.1088/1757-899X/26/1/012015, 2011.

- [16] BILGILI, L.; ÇETINKAYA, A.; KUZU, S.L.: Life Cycle Comparison of Passenger Air and Rail Transportation, *Environmental Research and Technology*, doi:10.35208/ert.1013350, 2022.
- [17] BJØRN, A.; MOLTESEN, A.; LAURENT, A.; OWSIANIAK, M.; CORONA, A.; BIRKVED, M.; HAUSCHILD, M.Z.: Life Cycle Inventory Analysis, S 117–165, doi:10.1007/978-3-319-56475-3_9, 2018.
- [18] BJØRN, A.; OWSIANIAK, M.; LAURENT, A.; OLSEN, S.I.; CORONA, A.; HAUSCHILD, M.Z.: Scope Definition, S 75–116, doi:10.1007/978-3-319-56475-3_8, 2018.
- [19] BOEING: Current Market Outlook 2014-2033, 2014.
- [20] BOOMERANG: Boomerang: Mehrweg-Versandtaschen für den E-Commerce, <https://www.boomerangpack.eu/> (aufgerufen am: 7. Juli 2023).
- [21] BOULDING, K.: The Economics of the Coming Spaceship Earth, <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Economics-of-the-Coming-Spaceship-Earth-Boulding/88cb333c9c7ebb5d852c037372eccc39c12ca691> (aufgerufen am: 09. August 2023), 2003.
- [22] BRAUNGART, M.: Public Goods for Economic Development. Compendium of Background papers, 2008.
- [23] BUNDESMINISTERIUM FÜR UMWELT, NATURSCHUTZ, NUKLEARE SICHERHEIT UND VERBRAUCHERSCHUTZ: FAQ Recht auf Reparatur, 2022.
- [24] BUNDESMINISTERIUM FÜR WIRTSCHAFTLICHE ZUSAMMENARBEIT UND ENTWICKLUNG: Klimaabkommen von Paris, 2023.
- [25] CANADAY, H.: Scrambling for Parts, *Aviation Week & Space Technology 2014*, 2014.
- [26] CARBERRY, B.: Airplane Recycling Efforts, Benefit Boeing Operators, https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qtr_4_08/pdfs/AERO_Q408_article02.pdf (aufgerufen am: 23. Juli 2023), 2008.
- [27] CASTAGNE, S.; CURRAN, R.; ROTHWELL, A.; PRICE, M.; BENARD, E.; RAGHUNATHAN, S.: A generic tool for cost estimating in aircraft design, *Res Eng Design* 18(4), S 149–162, doi:10.1007/s00163-007-0042-x, 2008.
- [28] CHANDLER, C.: Aircraft Recycling, Going green and growing, *Turbine Technology*, *Turbine Technology*, S 18–24, 2013.
- [29] CHANDRAKANTH, R.: Minimum Downtime for the A320s, <https://www.sps-aviation.com/story/?id=2094> (aufgerufen am: 28. Juli 2023).
- [30] CLEANSKY: Aviation & Environment., www.cleansky.eu/content/homepage/aviation-environment (aufgerufen am: 27. Juli 2023).
- [31] COLE, R.J.; STERNER, E.: Reconciling theory and practice of life-cycle costing, *Building Research & Information* 28(5-6), Routledge, S 368–375, doi:10.1080/096132100418519, 2000.

- [32] CURRAN, R.; VAN HEERDEN, D.: Value extraction from end-of-life aircraft, *Encyclopedia of Aerospace Engineering*, Wiley, S 3715–3726, 2011.
- [33] DAVIS, J.R.: *Aluminum and Aluminum Alloys*, ASM Specialty Handbook, ASM International, Materials Park, OH, 1993.
- [34] DEUTZ, P.: Producer responsibility in a sustainable development context: ecological modernisation or industrial ecology?, *Geographical Journal* 175(4), Wiley, S 274–285, doi:10.1111/j.1475-4959.2009.00330.x, 2009.
- [35] ECOINVENT: EcoInvent Data v2.0 Overview and Methodology, Swiss Centre for Life Cycle Inventories,, https://ecoinvent.org/wp-content/uploads/2020/08/200712_frischknecht_jungbluth_overview_methodology_ecoinvent2.pdf (aufgerufen am: 03. September 2023), 2007.
- [36] EEA REPORT: Circular economy in Europe, Developing the knowledge base, <https://eco.nomia.pt/contents/documentacao/thal16002enn-002.pdf> (aufgerufen am: 05. Juli 2023), 2016.
- [37] ELBE FLUGZEUGWERKE: Elbe Flugzeugwerke, Unsere Geschichte, <https://www.elbe-flugzeugwerke.com/de/ueber-uns/unsere-geschichte/> (aufgerufen am: 24. Juli 2023).
- [38] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: Growth within: a circular economy vision for a competitive europe 2015, https://emf.thirdlight.com/file/24/_A-BkCs_h7gRYB_Am9L_JfbYWF/Growth%20within%3A%20a%20circular%20economy%20vision%20for%20a%20competitive%20Europe.pdf (aufgerufen am: 20. Juli 2023).
- [39] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: The biological cycle of the butterfly diagram, <https://ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-biological-cycle-of-the-butterfly-diagram> (aufgerufen am: 20. Juli 2023).
- [40] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: The butterfly diagram: visualising the circular economy, <https://ellenmacarthurfoundation.org/circular-economy-diagram> (aufgerufen am: 20. Juli 2023).
- [41] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: The technical cycle of the butterfly diagram, <https://ellenmacarthurfoundation.org/articles/the-technical-cycle-of-the-butterfly-diagram> (aufgerufen am: 20. Juli 2023).
- [42] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: Methodology, S 1–64, 2015.
- [43] ELLEN MACARTHUR FOUNDATION: What we do, <https://ellenmacarthurfoundation.org/about-us/what-we-do> (aufgerufen am: 06. September 2023).
- [44] ELSAYED, A.; ROETGER, T.; BANN, A.: Environmental Report, Best Practices and Standards in Aircraft End-of-Life and Recycling, 2019.
- [45] ELSNER, P.; EYERER, P.; HIRTH, T.: *Domoninghaus - Kunststoffe, Eigenschaften und Anwendungen*, 8. Aufl, VDI-Buch, Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, 2013.

- [46] EMBRAER S.A: Market Outlook 2011-2030, Commercial Jets, Sao José dos Campos, 2011.
- [47] ERKMAN, S.: Industrial ecology: An historical view, *Journal of Cleaner Production* 5(1-2), S 1–10, doi:10.1016/S0959-6526(97)00003-6, 1997.
- [48] FAVI, C.; GERMANI, M.; LUZI, A.; MANDOLINI, M.; MARCONI, M.: A design for EoL approach and metrics to favour closed-loop scenarios for products, *International Journal of Sustainable Engineering* 10(3), Taylor & Francis, S 136–146, doi:10.1080/19397038.2016.1270369, 2017.
- [49] FLIGHTERA: Lufthansa - A320, <https://www.flightera.net/airline/Lufthansa/model/A320> (aufgerufen am: 28. Juli 2023).
- [50] FLIGHTERA: Lufthansa - A350-900, <https://www.flightera.net/airline/Lufthansa/model/A359> (aufgerufen am: 28. Juli 2023).
- [51] FLOTTAU, J.: Flugzeug-Leasing: Das neue Machtzentrum, *Süddeutsche Zeitung*, <https://www.sueddeutsche.de/wirtschaft/flugzeugleasing-aircap-gecas-airbus-boeing-1.5243159> (aufgerufen am: 21. Juli 2023), 2021.
- [52] FLUG REVUE: Alle Fakten, Airbus A350-900, <https://www.flugrevue.de/zivil/airbus-a350-900-airbus-a350-900/> (aufgerufen am: 02. August 2023), 2015.
- [53] FLUGHAFEN DÜSSELDORF GMBH: Einmal durchchecken, bitte!, Was passiert bei einer Flugzeugwartung?, <https://www.dus.com/de-de/erleben/dusmomente/einmal-durchchecken-bitte> (aufgerufen am: 17. Mai 2023).
- [54] FRANZ, K.; HOERNSCHEMEYER, R.; GROBE BOECKMANN, M.; SCHMITT, R.; POLLMANN, J.; FELDHUSEN, J.; BUEKER, K.; REICHMUTH, J.; PETZOLDT, K.; SAUTER, T.; SCHNEIDER, C.; EWERT, A.; FROMHOLD-EISEBITH, M.: A Methodical Approach to Assess the Aircraft Life Cycle, 2nd International Air Transport and Operations Symposium 2011, Delft, The Netherlands, S 1–19, 2011.
- [55] FRANZ, K.; HÖRNSCHEMEYER, R.; EWERT, A.; FROMHOLD-EISEBITH, M.; BÖCKMANN, M.G.; SCHMITT, R.; PETZOLDT, K.; SCHNEIDER, C.; HELLER, J.E.; FELDHUSEN, J.; BÜKER, K.; REICHMUTH, J.: Life Cycle Engineering in Preliminary Aircraft Design, S 473–478, doi:10.1007/978-3-642-29069-5_80, 2012.
- [56] GEISENDORF, S.; PIETRULLA, F.: The circular economy and circular economic concepts-a literature analysis and redefinition, *Thunderbird Int Bus Rev* 60(5), John Wiley & Sons, Ltd, S 771–782, doi:10.1002/tie.21924, <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/tie.21924>, 2018.
- [57] GEISSDOERFER, M.; SAVAGET, P.; BOCKEN, N.M.; HULTINK, E.J.: The Circular Economy – A new sustainability paradigm?, *Journal of Cleaner Production* 143, S 757–768, doi:10.1016/j.jclepro.2016.12.048, 2017.

- [58] GENOVESE, A.; ACQUAYE, A.A.; FIGUEROA, A.; KOH, S.L.: Sustainable supply chain management and the transition towards a circular economy: Evidence and some applications, *Omega* 66, S 344–357, doi:10.1016/j.omega.2015.05.015, 2017.
- [59] GHISELLINI, P.; CIALANI, C.; ULGIATI, S.: A review on circular economy: the expected transition to a balanced interplay of environmental and economic systems, *Journal of Cleaner Production* 114, S 11–32, doi:10.1016/j.jclepro.2015.09.007, 2016.
- [60] GLUCH, P.; BAUMANN, H.: The life cycle costing (LCC) approach: a conceptual discussion of its usefulness for environmental decision-making, *Building and Environment* 39(5), S 571–580, doi:10.1016/j.buildenv.2003.10.008, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360132303002610>, 2004.
- [61] GRIGORE, M.: Methods of Recycling, Properties and Applications of Recycled Thermoplastic Polymers, *Recycling* 2(4), Multidisciplinary Digital Publishing Institute, S 24, doi:10.3390/recycling2040024, 2017.
- [62] GUINÉE, J.B.: Handbook on life cycle assessment, Operational guide to the ISO standards, *Eco-efficiency in industry and science* 7, Kluwer, Dordrecht, 2002.
- [63] HABE, D.: So funktioniert Codesharing, [airliners.de](https://www.airliners.de), <https://www.airliners.de/so-funktioniert-code-sharing/33165> (aufgerufen am: 21. Juli 2023), 2017.
- [64] HAUSCHILD, M.Z.; ROSENBAUM, R.K.; OLSEN, S.I.: Life cycle assessment, Theory and practice, Springer, Cham, 2018.
- [65] HAUSCHILD, M.Z.; BONOU, A.; OLSEN, S.I.: Life Cycle Interpretation, S 323–334, doi:10.1007/978-3-319-56475-3_12, 2018.
- [66] HEYCAR: Gebrauchtwagengarantie bei heycar, <https://hey.car/garantie> (aufgerufen am: 27. Juli 2023).
- [67] HINSCH, M.: Industrielles Luftfahrtmanagement, Technik und Organisation luftfahrttechnischer Betriebe, 4. Aufl, Springer Vieweg, Berlin, Heidelberg, doi:10.1007/978-3-662-58804-8, 2019.
- [68] HÖB, C.: Der Unterschied zwischen "dry lease" und "wet lease", [airliners.de](https://www.airliners.de), <https://www.airliners.de/dry-lease-wet-lease-unterschied-mieten-luftrechts-kolumne/40535> (aufgerufen am: 23. Juli 2023), 2017.
- [69] HOLLAND, J.: From cradle to cradle: The aim of the aircraft recycling industry, *Aircraft Technology - Engineering & Maintenance* 2014, S 30–33, 2014.
- [70] HOUGHTON, J.T.; JENKINS, G.J.; EPHRAUMS, J.J.: Climate change: The IPCC scientific assessment, report, Cambridge, 1990.
- [71] HOWE, S.; KOLIOS, A.J.; BRENNAN, F.P.: Environmental life cycle assessment of commercial passenger jet airliners, *Transportation Research Part D: Transport and Environment* 19, S 34–41, doi:10.1016/j.trd.2012.12.004, 2013.
- [72] HUNKELER, D.; LICHTENVORT, K.; REBITZER, G.: Environmental Life Cycle Costing, CRC Press, doi:10.1201/9781420054736, 2008.

- [73] INFLOR: What is and what are the benefits of sustainable aviation fuel?, <https://in-flor.com/blog/benefits-of-sustainable-aviation-fuel/> (aufgerufen am: 04. September 2023).
- [74] ISO: Environmental management — Life cycle assessment — Principles and framework, ISO 14040:2006, 2006.
- [75] ISO: Environmental management — Life cycle assessment — Requirements and guidelines, ISO 14044:2006, 2006.
- [76] IVANOV, A.; BUSKE, N.: Inflationsrate in Deutschland: So hoch ist die Inflation aktuell, Handelsblatt, <https://www.handelsblatt.com/finanzen/geldpolitik/inflation-aktuell-wie-hoch-ist-die-inflationsrate-in-deutschland-/26252124.html> (aufgerufen am: 04. September 2023), 2023.
- [77] JABER, M.Y.; SAADANY, A.M.E.; ROSEN, M.A.: Simple price-driven Reverse Logistics system with entropy and exergy costs, *IJEX* 9(4), Inderscience Publishers, S 486–502, doi:10.1504/IJEX.2011.043921, 2011.
- [78] JAYAL, A.D.; BADURDEEN, F.; DILLON, O.W.; JAWAHIR, I.S.: Sustainable manufacturing: Modeling and optimization challenges at the product, process and system levels, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 2(3), Elsevier BV, S 144–152, doi:10.1016/j.cirpj.2010.03.006, 2010.
- [79] JOUNG, C.B.; CARRELL, J.; SARKAR, P.; FENG, S.C.: Categorization of indicators for sustainable manufacturing, *Ecological Indicators* 24, Elsevier BV, S 148–157, doi:10.1016/j.ecolind.2012.05.030, 2013.
- [80] KEIVANPOUR, S.: A Fuzzy Strategy Analysis Simulator for Exploring the Potential of Industry 4.0 in End of Life Aircraft Recycling 1197, S 797–806, doi:10.1007/978-3-030-51156-2_92, 2021.
- [81] KEIVANPOUR, S.; AIT KADI, D.: An integrated approach to analysis and modeling of End of Life phase of the complex products, *IFAC-PapersOnLine* 49(12), S 1892–1897, doi:10.1016/j.ifacol.2016.07.906, 2016.
- [82] KEIVANPOUR, S.; AIT KADI, D.; MASCLE, C.: End of life aircrafts recovery and green supply chain (a conceptual framework for addressing opportunities and challenges), *Management Research Review* 38(10), S 1098–1124, doi:10.1108/MRR-11-2014-0267, 2015.
- [83] KICHERER, A.; SCHALTEGGER, S.; TSCHOCHOHEI, H.; POZO, B.F.: Eco-efficiency, *Int J LCA* 12(7), S 537–543, doi:10.1007/s11367-007-0305-9, 2007.
- [84] KIRCHHERR, J.; REIKE, D.; HEKKERT, M.: Conceptualizing the circular economy: An analysis of 114 definitions, *Resources, Conservation and Recycling* 127, S 221–232, doi:10.1016/j.resconrec.2017.09.005, 2017.
- [85] KLUBMANN, N.: Lexikon der Luftfahrt, 4. Aufl, Lexikon, Springer, Berlin, Heidelberg, 2018.

- [86] KOLOSZ, B.W.; LUO, Y.; XU, B.; MAROTO-VALER, M.M.; ANDRESEN, J.M.: Life cycle environmental analysis of 'drop in' alternative aviation fuels: a review, *Sustainable Energy Fuels* 4(7), S 3229–3263, doi:10.1039/c9se00788a, 2020.
- [87] KORHONEN, J.; NUUR, C.; FELDMANN, A.; BIRKIE, S.E.: Circular economy as an essentially contested concept, *Journal of Cleaner Production* 175, S 544–552, doi:10.1016/j.jclepro.2017.12.111, 2018.
- [88] KOSCAKOVA, M.; KORBA, P.; SEKELOVA, I.: Life Cycle Assessment and its Application to the Aviation Sector, *AMS* (27), S 902–915, doi:10.46544/AMS.v27i4.06, 2023.
- [89] KOSLOWSKI, H.J.: *Chemiefaser-Lexikon, Begriffe, Zahlen, Handelsnamen*, 12. Aufl, Edition Textil, Dt. Fachverl., Frankfurt am Main, 2008.
- [90] KUNDU, A.K.: *Aircraft Design*, Cambridge University Press, doi:10.1017/CBO9780511844652, 2010.
- [91] LIEDER, M.; RASHID, A.: Towards circular economy implementation: a comprehensive review in context of manufacturing industry, *Journal of Cleaner Production* 115, S 36–51, doi:10.1016/j.jclepro.2015.12.042, 2016.
- [92] LIFE CYCLE INITIATIVE: Life cycle assessment: Benefits and limitations, <http://fibre-net.eu/index.php?id=blog-post-eleven> (aufgerufen am: 20. Juli 2023).
- [93] LOPES, J.: Life Cycle Assessment of the Airbus A330-200 Aircraft, <https://www.semanticscholar.org/paper/Life-Cycle-Assessment-of-the-Airbus-A330-200-Lopes/b635c37428c28a1d5f9cb302aad54c2cf0336b3d>, 2010.
- [94] LUFTHANSA: Upgrade your life, Edle Accessoires für Luftfahrtfans und Designliebhaber:innen, <https://www.worldshop.eu/de/upcycling/?p=hTDCC3ImV5k> (aufgerufen am: 24. Juli 2023).
- [95] LUFTHANSA INVESTOR RELATIONS: Investor Info, Verkehrszahlen Q2 2022, 2022.
- [96] LUFTHANSA INVESTOR RELATIONS: Investor Info, Verkehrszahlen Q3 2022, 2022.
- [97] LUFTHANSA INVESTOR RELATIONS: Investor Info, Verkehrszahlen Q4 2022, 2023.
- [98] LUFTHANSA INVESTOR RELATIONS: Investor Info, Verkehrszahlen Q1 2023, 2023.
- [99] LUFTHANSA TECHNIK: Lufthansa Technik, Die Geschichte, <https://www.lufthansa-technik.com/en/company> (aufgerufen am: 24. Juli 2023), 2023.
- [100] MAGAZIN, M.: Trotz Krise: Lufthansa kauft zehn neue Verkehrsmaschinen, *manager magazin*, <https://www.manager-magazin.de/unternehmen/lufthansa-kauft-neue-verkehrsmaschinen-von-airbus-und-boeing-a-74d925a1-733a-411c-a397-31cfbaff4d34> (aufgerufen am: 02. August 2023), 2021.
- [101] MANICKAM, P.; DURAISAMY, G.: 3Rs and circular economy, S 77–93, doi:10.1016/B978-0-08-102630-4.00004-2, 2019.
- [102] MCDONOUGH W.: *Cradle to Cradle: Remaking the Way We Make Things*, 2002.
- [103] MOURITZ, A.P.: *Introduction to aerospace materials*, Woodhead publishing in materials, Woodhead Publ, Oxford, 2012.

- [104] MÜLLER, J.; HAGELÜKEN, M.; SCHISCHKE, K.; GRIESE, H.: Geschäftsvorteile durch ÖkoDesign, Workshopreihe für Eco-Design für kleine und mittelständische Unternehmen der Elektronikbranche des Fraunhofer IZM, Berlin, im Auftrag der Europäischen Kommission, 2005.
- [105] MÜLLER, J.: Die 5 coolsten Flugzeughotels der Welt, <https://www.urlaubstracker.de/beste-flugzeughotel-der-welt/> (aufgerufen am: 24. Mai 2023).
- [106] NASR, N.; HILTON, B.; GERMAN, R.: A Framework for Sustainable Production and a Strategic Approach to a Key Enabler: Remanufacturing, S 191–196, doi:10.1007/978-3-642-20183-7_28, 2011.
- [107] NEHER, A.: Kreislaufwirtschaft für Unternehmen, Ein fließsystemorientierter Ansatz, Zugl.: Marburg, Univ., Diss., 1998, DUV Wirtschaftswissenschaft, Dt. Univ.-Verl., Wiesbaden, 1998.
- [108] NORRIDGE, T.: Metal recycling: The need for a life cycle approach, Australien, 2013.
- [109] OLSEN, S.I.; BORUP, M.; ANDERSEN, P.D.: Future-Oriented LCA, S 499–518, doi:10.1007/978-3-319-56475-3_21, 2018.
- [110] OTEKENARI DAVID ELISHA: Moving Beyond Take-Make-Dispose to Take-Make-Use for Sustainable Economy, 2020.
- [111] PIERRAT, E.; RUPCIC, L.; HAUSCHILD, M.Z.; LAURENT, A.: Global environmental mapping of the aeronautics manufacturing sector, *Journal of Cleaner Production* 297, S 1–14, doi:10.1016/j.jclepro.2021.126603, 2021.
- [112] PRESSE- UND INFORMATIONSAMT DER BUNDESREGIERUNG: Änderungen im Verpackungsgesetz, <https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/mehrweg-fuers-essen-to-go-1840830> (aufgerufen am: 17. Juli 2023).
- [113] RAHN, A.; POHYA, A.A.; WEHRSPHORN, J.; WICKE, K.: A Modular Framework for Life Cycle Assessment of Aircraft Maintenance, doi:10.2514/6.2021-2369, 2021.
- [114] RECKLIES, B.: "Sale und Lease Back"-Finanzierungen bringt Lufthansa Millionenbetrag, *airliners.de*, <https://www.airliners.de/sale-lease-back-finanzierungen-bringt-lufthansa-millionenbetrag/58826> (aufgerufen am: 21. Juli 2023), 2021.
- [115] RICHTER, E.: Recycling of plastic waste; Verwertung von Kunststoffabfaellen, *Umwelt (Duesseldorf)* 27, 1997.
- [116] RÖDGER, J.-M.; KJÆR, L.L.; PAGOROPOULOS, A.: Life Cycle Costing: An Introduction, S 373–399, doi:10.1007/978-3-319-56475-3_15, 2018.
- [117] RÖSCH, C.; SCHALDACH, R.; GÖPEL, J.: Bioökonomie im Selbststudium: Nachhaltigkeit und ökologische Bewertung, Zertifikatskurs Bioökonomie, Springer Spektrum, Berlin, Heidelberg, doi:10.1007/978-3-662-61383-2, 2020.
- [118] ROSENBAUM, R.K.; HAUSCHILD, M.Z.; BOULAY, A.-M.; FANTKE, P.; LAURENT, A.; NÚÑEZ, M.; VIEIRA, M.: Life Cycle Impact Assessment, S 167–270, doi:10.1007/978-3-319-56475-3_10, 2018.

- [119] SABAGHI, M.; MASCLE, C.; BAPTISTE, P.: Evaluation of products at design phase for an efficient disassembly at end-of-life, *Journal of Cleaner Production* 116, S 177–186, doi:10.1016/j.jclepro.2016.01.007, 2016.
- [120] SAKAI, S.; YOSHIDA, H.; HIRAI, Y.; ASARI, M.; TAKIGAMI, H.; TAKAHASHI, S.; TOMODA, K.; PEELER, M.V.; WEJCHERT, J.; SCHMID-UNTERSEH, T.; DOUVAN, A.R.; HATHAWAY, R.; HYLANDER, L.D.; FISCHER, C.; OH, G.J.; JINHUI, L.; CHI, N.K.: International comparative study of 3R and waste management policy developments, *J Mater Cycles Waste Manag* 13(2), Springer; Springer Japan, S 86–102, doi:10.1007/s10163-011-0009-x, 2011.
- [121] SCHOLZ, D.: Der Produktlebenszyklus eines Flugzeugs endet nicht mit der Ausflottung, *airliners.de*, <https://www.airliners.de/flugzeugbau-zukunft-46-produktlebenszyklus-flugzeugs-endet-ausflottung/63863> (aufgerufen am: 23. Juli 2023), 2022.
- [122] SHUAIB, M.; METTA, H.; LU, T.; BADURDEEN, F.; JAWAHIR, I.S.; GOLDSBY, T.: Advances in sustainable manufacturing, Revised and extended versions of selected papers presented at the 8th Global Conference on Sustainable Manufacturing; November 2010, *Advances in Sustainable Manufacturing*, Springer, Berlin, Heidelberg, doi:10.1007/978-3-642-20183-7_50, 2011.
- [123] STAHEL, W.: *An Inquiry into the Nature of Sustainable Societies: The Role of the Private Sector*, 1981.
- [124] STAHEL, W.R.: *The Performance Economy*, Palgrave Macmillan UK, doi:10.1057/9780230274907, 2010.
- [125] STAHEL, W.R.: The circular economy, *Nature* 531(7595), Nature Publishing Group, S 435–438, doi:10.1038/531435a, 2016.
- [126] STATISTA: Anteil der Verkehrsträger an den weltweiten CO₂-Emissionen aus der Verbrennung fossiler Brennstoffe in den Jahren 2018 und 2019, <https://de.statista.com/statistik/daten/studie/317683/umfrage/verkehrstraeger-anteil-co2-emissionen-fossile-brennstoffe/> (aufgerufen am: 06. September 2023).
- [127] STATISTA RESEARCH DEPARTMENT: Anteil der geleasteten Flugzeuge in der weltweiten Flugzeugflotte in ausgewählten Jahren von 1970 bis 2021 (aufgerufen am: 06. September 2023), 2023.
- [128] STEINKE, S.: Wer wagt, gewinnt, Die Geschichte des Airbus-Bestsellers A320, <https://www.flugrevue.de/zivil/wer-wagt-gewinnt-die-geschichte-des-airbus-bestseller-model-a320/> (aufgerufen am: 03. August 2023), 2023.
- [129] SYBERG, K.; NIELSEN, M.B.; WESTERGAARD CLAUSEN, L.P.; VAN CALSTER, G.; VAN WEZEL, A.; ROCHMAN, C.; KOELMANS, A.A.; CRONIN, R.; PAHL, S.; HANSEN, S.F.: Regulation of plastic from a circular economy perspective, *Current Opinion in Green and Sustainable Chemistry* 29, S 1–7, doi:10.1016/j.cogsc.2021.100462, 2021.
- [130] THE BOEING COMPANY: *Current Market Outlook 2011-2030*, Seattle, 2011.

- [131] THIES, C.; KIECKHÄFER, K.; SPENGLER, T.S.; SODHI, M.S.: Assessment of social sustainability hotspots in the supply chain of lithium-ion batteries, *Procedia CIRP* 80, S 292–297, doi:10.1016/j.procir.2018.12.009, 2019.
- [132] UNITED: UNITED Technical Operations, Over 90 years of experience serving the aircraft industry, <https://www.unitedtechops.com/> (aufgerufen am: 24. Juli 2023).
- [133] UTS: What Will a Circular Economy Look like in Australia, <http://www.uts.edu.au/research-and-teaching/our-research/institute-sustainable-futures/news/what-will-circular-economy> (aufgerufen am: 27. Juli 2023).
- [134] VAN DER MEER, Y.: Life Cycle Assessment: Benefits and limitations, <http://fibre-net.eu/index.php?id=blog-post-eleven> (aufgerufen am: 20. Juli 2023).
- [135] VAN HEERDEN, D.-J.; CURRAN, R.: Aircraft Disposal and Recycling, doi:10.1002/9780470686652.eae355, 2010.
- [136] VOLZ, S.: Screening LCA, <http://www.improving-sustainability.eu/index.php/screening-lca.html> (aufgerufen am: 26. Juli 2023).
- [137] WAGNER, S.M.: Strategisches Lieferantenmanagement in Industrieunternehmen, Eine empirische Untersuchung von Gestaltungskonzepten, Zugl.: St. Gallen, Univ., Diss., 2000, Europäische Hochschulschriften Reihe 5, Volks- und Betriebswirtschaft 2734, Lang, Frankfurt am Main, doi:2478, 2001.
- [138] WALKER, S.; COOK, M.: The contested concept of sustainable aviation, *Sustainable Development* 17(6), Wiley, S 378–390, doi:10.1002/sd.400, 2009.
- [139] WEINER, M.: Flugzeugrecycling: Schatzkästchen mit Flügeln (aufgerufen am: 23 Juni 2023).
- [140] WERNET, G.; BAUER, C.; STEUBING, B.; REINHARD, J.; MORENO-RUIZ, E.; WEIDEMA, B.: Theecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology, *Int J LCA* 21(9), Springer; Springer Berlin Heidelberg, S 1218–1230, doi:10.1007/s11367-016-1087-8, 2016.
- [141] WILTS, H.; GRIES, N. von: Der schwere Weg zur Kreislaufwirtschaft, *GWP – Gesellschaft. Wirtschaft. Politik* 66(1), S 271–273, 2017.
- [142] WIMMER, A.-K.; SALLES, A.; MÜLLER, T.; ELSNER, P.: Entwicklung eines Design for End of Life Tools für die Luftfahrtindustrie, *Chemie Ingenieur Technik* 88(4), S 489–499, doi:10.1002/cite.201400154, 2016.
- [143] WINKLER, H.: Closed-loop production systems—A sustainable supply chain approach, *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology* 4(3), S 243–246, doi:10.1016/j.cirpj.2011.05.001, 2011.
- [144] WONG, K.; RUDD, C.; PICKERING, S.; LIU, X.: Composites recycling solutions for the aviation industry, *Sci. China Technol. Sci.* 60(9), S 1291–1300, doi:10.1007/s11431-016-9028-7, 2017.

- [145] YAKOVLEV, A.; BOICHENKO, S.; IVANCHENKO, O.: Systemy i środki transportu samochodowego, Problemy eksploatacji i diagnostyki : wybrane zagadnienia, Transport / Politechnika Rzeszowska im. Ignacego Łukasiewicza nr 10, Oficyna Wydawnicza Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów, 2017.
- [146] YAKOVLEV, A.; BOICHENKO, S.; KALE, U.; NAGY, A.: Holistic approaches and advanced technologies in aviation product recycling, AEAT 93(8), S 1302–1312, doi:10.1108/AEAT-03-2021-0068, 2021.
- [147] YANG, Y.; BOOM, R.; IRION, B.; VAN HEERDEN, D.-J.; KUIPER, P.; WIT, H. de: Recycling of composite materials, Chemical Engineering and Processing: Process Intensification 51, S 53–68, doi:10.1016/j.cep.2011.09.007, 2012.
- [148] ZAHEDI, H.; MASCLE, C.; BAPTISTE, P.: A Conceptual Framework toward Advanced Aircraft End-of-Life Treatment using Product and Process Features, IFAC-PapersOnLine 48(3), S 767–772, doi:10.1016/j.ifacol.2015.06.175, 2015.
- [149] ZHAO, X.; VERHAGEN, W.J.; CURRAN, R.: Disposal and Recycle Economic Assessment for Aircraft and Engine End of Life Solution Evaluation, Applied Sciences 10(2), S 522, doi:10.3390/app10020522, 2020.
- [150] ZHAO, D.; GUO, Z.; XUE, J.: Research on Scrap Recycling of Retired Civil Aircraft, IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 657(1), S 1–11, doi:10.1088/1755-1315/657/1/012062, 2021.
- [151] ZHAO, X.; BORUAH, B.; CHIN, K.F.; ĐOKIĆ, M.; MODAK, J.M.; SOO, H.S.: Upcycling to Sustainably Reuse Plastics, Adv Mater 34(25), e2100843, doi:10.1002/adma.202100843, 2022.

Anhang

A Arten der LCA

Um Produkte hinsichtlich ihrer Umweltauswirkungen bewerten zu können, gibt es verschiedene Arten von Ökobilanzen. Je nach gewünschtem Umfang, Schwerpunkt oder Detaillierungsgrad kann eine geeignete Methode ausgewählt werden. Im Folgenden werden die verschiedenen Arten vorgestellt, wobei immer der Bezug zu den einzelnen Phasen des Produktlebenszyklus hergestellt wird.

Die *attributive LCA* ist die Ökobilanz mit dem geringsten Umfang. Hierbei handelt es sich um eine „cradle-to-gate“-Ökobilanz, die die Umweltauswirkungen eines Produkts während der Herstellung (bis zum Verlassen des Werksgeländes) analysiert. Hier werden nur die ersten beiden Phasen des Produktlebenszyklus (nach Franz et al., Abbildung 2-7) berücksichtigt. Dies führt dazu, dass die attributive Ökobilanz besonders gut für den Vergleich von Produkten aus der gleichen Branche geeignet ist, da sich diese häufig nur in der Herstellung, nicht aber in der Anwendung unterscheiden. [82]

Eine andere Art der Ökobilanz stellt eine Erweiterung der attributiven Ökobilanz zur *konsistenten LCA* dar. Hierbei wird das Produkt über alle vier Phasen seines Lebenszyklus analysiert (cradle-to-grave). Damit werden nicht nur die Umweltwirkungen während der Produktion, sondern auch die während des Gebrauchs und der Entsorgung sowie indirekte Auswirkungen (z.B. Veränderung der wirtschaftlichen Situation), die im Zusammenhang mit dem Produkt entstehen, berücksichtigt. [96, S. 3231f.]

Eine weitere Art der Ökobilanz ist die *soziale LCA* (S-LCA). Dabei werden die sozialen und sozio-ökologischen Aspekte eines Produkts in allen vier Phasen seines Lebenszyklus bewertet. Diese Bewertung umfasst beispielsweise Arbeitsbedingungen, Menschenrechte oder Auswirkungen auf das Gemeinwohl. Dabei wird die S-LCA als Ergänzung der traditionellen LCA angesehen, um soziale Risiken oder auch Verbesserungsmöglichkeiten aufzudecken. [148, S. 294]

Um auch zukünftige Ereignisse und Szenarien zu berücksichtigen, wurde die *prospektive LCA* eingeführt. Diese ermöglicht es, verschiedene Zukunftsszenarien zu betrachten und die Vor- und Nachteile unter verschiedenen Bedingungen abzuwägen. Um diese Art der Ökobilanz durchzuführen, müssen verschiedene Annahmen über mögliche zukünftige Entwicklungen getroffen werden. [124, S. 500ff.]

Alle bisherigen Arten der Ökobilanzierung erfordern eine große Menge an Informationen und sind mit einem sehr hohen Aufwand verbunden. Um dem entgegenzuwirken und erste Abschätzungen zu ermöglichen, wurde die *Screening LCA* eingeführt. Bei dieser Methode werden vereinfachte Modelle angenommen, Annahmen getroffen und mit leicht verfügbaren Daten gearbeitet, um eine schnelle Abschätzung zu ermöglichen. Diese Methode ist besonders geeignet, wenn eine Vielzahl von Möglichkeiten untersucht werden soll. [153]

Im Allgemeinen hat jede LCA-Methode unterschiedliche Vor- und Nachteile, und es ist wichtig, die Methode zu wählen, die den Anforderungen am besten entspricht. Eine „falsche“ Wahl der Methode kann die Durchführung der LCA unnötig komplizieren und die Weiterverwendung der Ergebnisse erschweren. [98, S. 904ff.]

B Arten der LCC

Die LCC kann ebenfalls auf verschiedene Arten erfolgen. Auch hier hängt die Wahl der Methode häufig von der Menge der verfügbaren Daten, dem gewünschten Detaillierungsgrad und dem gewählten Schwerpunkt ab. Im Gegensatz zur LCA wird bei der LCC in der Regel immer der gesamte Lebenszyklus eines Produktes berücksichtigt.

Die *traditionelle LCC* berücksichtigt nur die direkten Kosten, die mit dem Lebenszyklus eines Produktes verbunden sind. Dazu gehören z.B. die Anschaffungskosten, aber auch die Betriebskosten einschließlich Wartung und Entsorgungskosten. [132, S. 378ff.]

Die *Gesamtbetriebskosten* (Total Cost of Ownership, TCO) stellen eine Erweiterung der traditionellen LCC dar. Hier werden nicht nur die direkten Kosten berücksichtigt, sondern auch die indirekten Kosten, wie z.B. Schulungskosten für Mitarbeiter oder auch Kosten für Ausfallzeiten. [29, S. 151ff.]

Die *Ökologische Lebenszyklus-Kostenrechnung* (ELCC) ist eine Kombination aus LCA und LCC. Hier werden neben den Kosten auch die Umweltauswirkungen eines Produktes bewertet. Dabei werden den Umweltwirkungen häufig Kosten zugeordnet, die dann in die Gesamtkosten des Produktes einfließen. Diese Umweltkosten entstehen z.B. durch die Überwachung des Umweltschutzes oder durch das Abfallmanagement. [132, S. 378ff.]

Die *dynamische LCC* stellt die umfassendste Betrachtung im Rahmen einer LCC dar. Neben den direkten und indirekten Kosten wird hier auch die Veränderung der Kosten und des Nutzens des Produktes über den Lebenszyklus berücksichtigt. Letztere ändern sich z.B. durch Inflation oder technischen Fortschritt. Diese Methode ist daher besonders für Projekte mit sehr langer Lebensdauer geeignet. [132, S. 378ff.]

C Daten zur Berechnung des Auslastungsfaktors

Kurzstrecke

		Q2 2022 [95]	Q3 2022 [96]	Q4 2022 [97]	Q1 2023 [98]	Gesamt
Europa	Auslastung u_i	79,00%	84,60%	78,60%	76,60%	80,17%
	Angebotene Sitzkilometer (in Mio.) b_i	30.564	33.524	25.107	20.500	109.695

Langstrecke

		Q2 2022 [95]	Q3 2022 [96]	Q4 2022 [97]	Q1 2023 [98]	Gesamt
Amerika	Auslastung u_i	81,30%	88,80%	84,40%	79,50%	83,80%
	Angebotene Sitzkilometer (in Mio.) b_i	25.119	27.306	22.092	20.239	94.756
Asien/ Pazifik	Auslastung u_i	82,70%	86,40%	85,20%	85,70%	85,18%
	Angebotene Sitzkilometer (in Mio.) b_i	6.010	7.902	9.280	9.624	32.816
Nahe Osten/ Afrika	Auslastung u_i	79,10%	83,90%	82,10%	81,10%	81,61%
	Angebotene Sitzkilometer (in Mio.) b_i	8.268	8.958	9.595	8.984	35.805
					Gesamt:	83,60%

Tabelle C-1: Auslastung der Flugzeuge (Lufthansa Group) Q2 2022 bis Q1 2023

D Fahrwerk Airbus A320-200 und A350-900: Maße und Volumen

Airbus A320-200

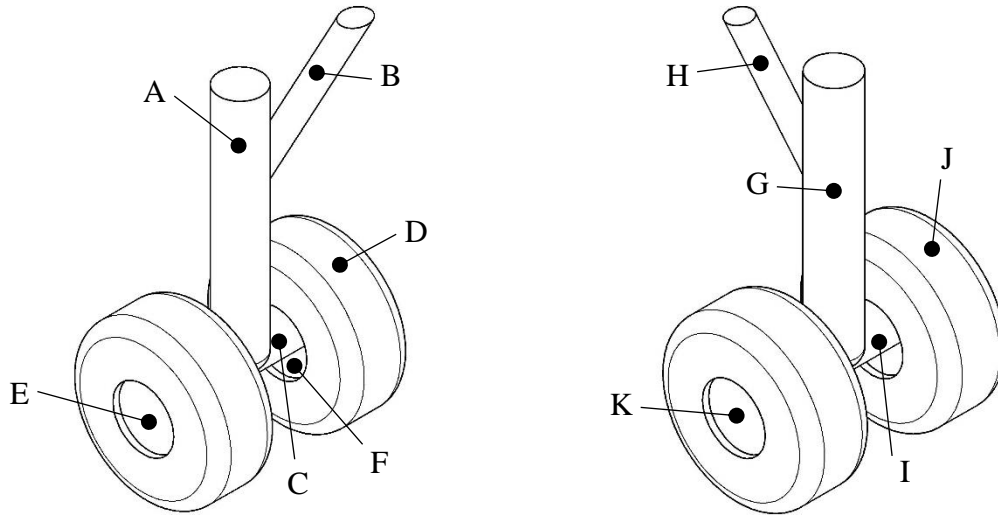


Abbildung D-1: Vereinfachte Darstellung A320-200 Hauptfahrwerk (links) und Bugfahrwerk (rechts)

HauptfahrwerkStruktur

	Durchmesser [cm]	Länge [cm]	Wandstärke [cm]	Grundfläche [cm ²]	Volumen [cm ³]
Fahrwerksbein [A]	18,00	280,90	2,00	53,40	15.002,04
Verriegelung [B]	12,00	230,00	2,00	34,55	7.948,29
Achse [C]	12,00	135,89	2,00	34,55	4.696,02
Gesamt					27.646,29

Reifen [D]

ø Reifen [cm]	Spurbreite [cm]	ø Felge [cm]	Dicke [cm]	Oberfläche [cm ²]	Volumen [cm ³]
116,84	43,18	50,80	3,00	33.240,01	99.720,02

Felge [E]

ø Felge [cm]	Spurbreite [cm]	% des Bauraums	Grundfläche [cm ²]	Volumen [cm ³]
50,80	43,18	0,25	2.026,83	21.879,62

Bremse [F]

Volumen Felge [cm ³]	% des Bauraums	Volumen [cm ³]
21.879,62	0,30	6.563,88

Tabelle D-1: Maße und Volumen des Airbus A320-200 Hauptfahrwerk [6]

BugfahrwerkStruktur

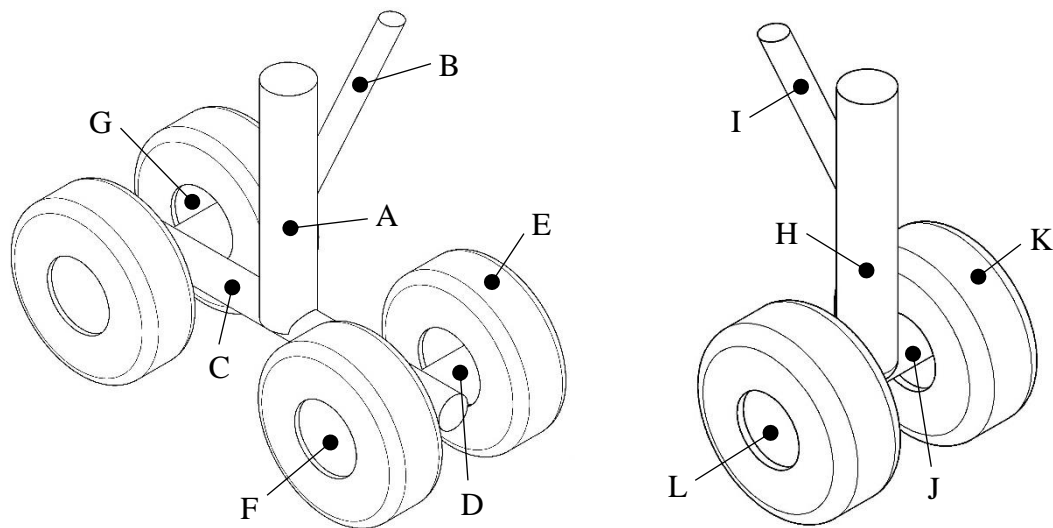
	Durchmesser [cm]	Länge [cm]	Wandstärke [cm]	Grundfläche [cm ²]	Volumen [cm ³]
Fahrwerksbein [G]	10,00	191,70	2,00	28,27	5.420,19
Verriegelung [H]	8,00	130,00	2,00	21,99	2.858,84
Achse [I]	8,00	72,35	2,00	21,99	1.591,06
Gesamt					9.870,09

Reifen [J]

ø Reifen [cm]	Spurbreite [cm]	ø Felge [cm]	Dicke [cm]	Oberfläche [cm ²]	Volumen [cm ³]
76,20	22,35	38,10	3,00	12.191,38	36.574,14

Felge [K]

ø Felge [cm]	Spurbreite [cm]	% des Bauraums	Grundfläche [cm ²]	Volumen [cm ³]
38,10	22,35	0,25	1.140,09	6.370,83

Tabelle D-2: Maße und Volumen des Airbus A320-200 Bugfahrwerk [6]Airbus A350-900**Abbildung D-2: Vereinfachte Darstellung A350-900 Hauptfahrwerk (links) und Bugfahrwerk (rechts)**

HauptfahrwerkStruktur

	Durchmesser [cm]	Länge [cm]	Wandstärke [cm]	Grundfläche [cm ²]	Volumen [cm ³]
Fahrwerksbein [A]	30,00	330,00	2,00	91,10	30.065,04
Verriegelung [B]	15,00	300,00	2,00	43,98	13.194,68
Achsverbindung [C]	20,00	250,00	2,00	59,69	14.922,56
Achse [D]	15,00	220,00	2,00	43,98	9.676,10
Gesamt					67.858,40

Reifen [E]

ø Reifen [cm]	Spurbreite [cm]	ø Felge [cm]	Dicke [cm]	Oberfläche [cm ²]	Volumen [cm ³]
140,00	53,00	58,42	3,00	48.737,26	14.6211,78

Felge [F]

ø Felge [cm]	Spurbreite [cm]	% des Bauraums	Grundfläche [cm ²]	Volumen [cm ³]
58,42	53,00	0,25	2.680,48	35.516,39

Bremse [G]

Volumen Felge [cm ³]	% des Bauraums	Volumen [cm ³]
35.516,39	0,30	10.654,91

Tabelle D-3: Maße und Volumen des Airbus A350-900 Hauptfahrwerk [5]

BugfahrwerkStruktur

	Durchmesser [cm]	Länge [cm]	Wandstärke [cm]	Grundfläche [cm ²]	Volumen [cm ³]
Fahrwerksbein [H]	15,00	237,00	2,00	43,98	10.423,80
Verriegelung [I]	10,00	200,00	2,00	28,27	5.654,86
Achse	10,00	160,00	2,00	28,27	4.523,89
Gesamt					20.602,56

Reifen [K]

ø Reifen [cm]	Spurbreite [cm]	ø Felge [cm]	Dicke [cm]	Oberfläche [cm ²]	Volumen [cm ³]
105,00	39,50	40,64	3,00	27.753,43	83.260,32

Felge [L]

ø Felge [cm]	Spurbreite [cm]	% des Bauraums	Grundfläche [cm ²]	Volumen [cm ³]
40,64	39,50	0,25	1.297,17	12.809,56

Tabelle D-4: Maße und Volumen des Airbus A350-900 Bugfahrwerk [5]

E Fahrwerk Airbus A320-200 und A350-900: Materialien

Airbus A320-200 - Hauptfahrwerk

Bauteil	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
Struktur	Stahl (80%)	Aluminium (10%)	Titan (10%)	
Reifen	Kautschuk (42%)	Kohlenstoff- verbund (30%)	Stahl (14%)	Polyester (14%)
Felge	Stahl (100%)			
Bremsen	Kohlenstoff- verbund (40%)	Stahl (60%)		

Tabelle E-1: Materialien des Airbus A320-200 Hauptfahrwerks

Airbus A320-200 - Bugfahrwerk

Bauteil	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
Struktur	Stahl (80%)	Aluminium (10%)	Titan (10%)	
Reifen	Kautschuk (42%)	Kohlenstoff- verbund (30%)	Stahl (14%)	Polyester (14%)
Felge	Stahl (100%)			

Tabelle E-2: Materialien des Airbus A320-200 Bugfahrwerks

Airbus A350-900 - Hauptfahrwerk

Bauteil	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
Struktur	Stahl (10%)	Aluminium (10%)	Titan (80%)	
Reifen	Kautschuk (42%)	Kohlenstoff- verbund (30%)	Stahl (14%)	Polyester (14%)
Felge	Stahl (100%)			
Bremsen	Kohlenstoff- verbund (40%)	Stahl (60%)		

Tabelle E-3: Materialien des Airbus A350-900 Hauptfahrwerks

Airbus A350-900 - Bugfahrwerk

Bauteil	Material 1	Material 2	Material 3	Material 4
Struktur	Stahl (10%)	Aluminium (10%)	Titan (80%)	
Reifen	Kautschuk (42%)	Kohlenstoff- verbund (30%)	Stahl (14%)	Polyester (14%)
Felge	Stahl (100%)			

Tabelle E-4: Materialien des Airbus A350-900 Bugfahrwerks

F Wartungstasks A320-200 und A350-900

Airbus A320-200 – Hauptfahrwerk

Mannstunden

Bauteil	Task Nr.	Mannstunden Intervall		Bemerkung
		[h]	[FC]	
Struktur	321000-01-1	0,5	500	Schmieren des Fahrwerks und der Türen
	321111-04-1	2,0	11000	Detaillierte Prüfung der Verriegelung
	321111-06-2	0,4	1000	Detaillierte Prüfung der vorderen Bolzensicherung
	321113-03-1	1,0	9000	Prüfung des Fülllevels der Stoßdämpferflüssigkeit
	321113-04-1	0,4	4500	Prüfung des Innendrucks des Stoßdämpfers
	321118-01-1	4,2	9000	Detaillierte Prüfung der oberen und unteren Verriegelung
	321127-01-1	0,2	9000	Funktionsprüfung der Drehmomentglieder auf extensives Spiel
Reifen	324100-01-1	0,1	10	Überprüfung des Reifendrucks
	324100-02-1	2,0	4500	Detaillierte Inspektion der Radachse
	324100-04-1	0,6	1750	Untersuchung der inneren Radhälfte auf Korrosion und Risse
	324100-05-1	0,4	2000	Schmieren der Radachse
	324900-01-1	0,2	750	Gegenkontrolle von TPIS-Messwert und Reifendruckmesser
Bremsen	324000-14-1	1,5	4550	Funktionsprüfung der automatischen Reaktivierung des normalen Bremsmodus (Feststellbremse Aktiviert)
	324000-15-1	3,0	9000	Funktionskontrolle zur Überwachung der internen Leckrate
	324000-17-1	0,5	5000	Funktionskontrolle des Bremsspeichersystems
	324200-03-1	3,0	2000	Detaillierte Prüfung des normalen Bremsverteilers
	324600-01-1	1,5	7000	Visuelle Inspektion der Bremsen

Tabelle F-1: Mannstunden für die Wartung des A320-200 Hauptfahrwerk

Fixe Kosten

Bauteil	Intervall [FC]	Kosten [€]	Bemerkung
Struktur	20.000	150.000	Kosten bei Neuanschaffung
Reifen	2.000	1.000	Kosten bei Neuanschaffung

Tabelle F-2: Fixe Kosten für die Wartung des A320-200 Hauptfahrwerk

Airbus A320-200 – Bugfahrwerk**Mannstunden**

Bauteil	Task Nr.	Mannstunden Intervall		Bemerkung
		[h]	[FC]	
Struktur	322000-01-1	0,5	500	Schmieren des Fahrwerks und der Türen
	322100-02-1	2,0	1350	Detaillierte Prüfung der oberen Struktur
	322100-02-2	2,0	4500	Detaillierte Prüfung der unteren Struktur
	322113-01-1	0,4	4500	Prüfung des Fülllevels und Drucks der Stoßdämpferflüssigkeit
	322127-01-1	0,6	4000	Funktionsprüfung der Drehmomentglieder auf extensives Spiel
	322128-01-1	1,5	4500	Prüfung der Struktur auf Verschleiß
Reifen	324100-01-1	0,1	20	Überprüfung des Reifendrucks
	324900-01-1	2,0	750	Gegenkontrolle von TPIS-Messwert und Reifendruckmesser

Tabelle F-3: Mannstunden für die Wartung des A320-200 Bugfahrwerk**Fixe Kosten**

Bauteil	Intervall [FC]	Kosten [€]	Bemerkung
Struktur	20.000	50.000	Kosten bei Neuanschaffung
Reifen	1.750	2.000	Kosten bei Neuanschaffung

Tabelle F-4: Fixe Kosten für die Wartung des A320-200 Bugfahrwerk

Airbus A350-900 - Hauptfahrwerk**Mannstunden**

Bauteil	Task Nr.	Mannstunden Intervall		Bemerkung
		[h]	[FC]	
Struktur	321000-01-01	1,5	500	Schmieren des Fahrwerks und der Türen
	321100-02-01	0,3	1080	Funktionskontrolle des Stoßdämpfers (Stickstoff Ladedruck)
	321100-03-01	1,5	2160	Kontrolle Stoßdämpfer (Gewicht auf Reifen)
	321100-04-01	0,1	1440	Funktionsprüfung der Drehmomentglieder auf extensives Spiel
	321100-09-01	0,1	120	Visuelle Inspektion der Hauptstruktur
	321100-01-01	1,0	2160	Funktionskontrolle Komponenten des alternativen Ausfahrsystems
	323300-02-01	4,0	2160	Funktionskontrolle des Gesamtsystems des alternativen Ausfahrsystems
Reifen	324100-01-01	0,1	2	Überprüfung des Reifendrucks
	324100-02-01	0,1	2	Visuelle Kontrolle des Reifens, der Räder und der Bremsen
Bremsen	324100-03-01	0,1	10	Visuelle Inspektion der Abnutzungsanzeige der Bremswärmepakete
	324200-01-01	1,5	4320	Funktionstest der Bremshydraulik

Tabelle F-5: Mannstunden für die Wartung des A350-900 Hauptfahrwerk**Fixe Kosten**

Bauteil	Intervall [FC]	Kosten [€]	Bemerkung
Struktur	20.000	350.000	Kosten bei Neuanschaffung
Reifen	2.000	1.000	Kosten bei Neuanschaffung

Tabelle F-6: Fixe Kosten für die Wartung des A350-900 Hauptfahrwerk

Airbus A350-900 - Bugfahrwerk**Mannstunden**

Bauteil	Task Nr.	Mannstunden Intervall		Bemerkung
		[h]	[FC]	
Struktur	322000-01-01	1,2	500	Schmieren des Fahrwerks und der Türen
	322100-02-01	0,4	1440	Funktionsprüfung der Drehmomentglieder auf extensives Spiel
	322100-05-01	5,0	16800	Detaillierte Inspektion der Buchsen und Lager der Flugzeugzellenbefestigung
	322100-06-01	1,0	2160	Kontrolle Stoßdämpfer (Gewicht auf Reifen)
	322100-08-01	0,1	120	Visuelle Inspektion der Hauptstruktur
	323300-01-01	0,5	2160	Funktionskontrolle Komponenten des alternativen Ausfahrsystems
	323300-02-01	4,0	2160	Funktionskontrolle des Gesamtsystems des alternativen Ausfahrsystems
Reifen	324100-01-01	0,1	2	Überprüfung des Reifendrucks
	324100-02-01	0,1	2	Visuelle Kontrolle des Reifens, der Räder und der Bremsen
	325100-01-01	2,0	2	Betriebskontrolle des Absperrventils

Tabelle F-7: Mannstunden für die Wartung des A350-900 Bugfahrwerk

Fixe Kosten

Bauteil	Intervall [FC]	Kosten [€]	Bemerkung
Struktur	20.000	150.000	Kosten bei Neuanschaffung
Reifen	1.750	2.000	Kosten bei Neuanschaffung

Tabelle F-8: Fixe Kosten für die Wartung des A350-900 Bugfahrwerk

G Werte Kreislaufwirtschaftsindex

Materialien	Rohstoffe			Nach der Nutzung			Nutzung		
	Reuse (F_u)	Recycling (F_r)	Recycling Effency (E_f)	Reuse (C_u)	Recycling (C_r)	Verbrennung (C_e)	Recycling Effency (E_c)	$\frac{L}{L_{av}}$	$\frac{U}{U_{av}}$
Aluminium	0,00	0,00	0,95	0,55	0,25	0,00	0,95	1,00	1,00
Kautschuk	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00	0,50	0,95	1,00	1,00
Kohlenstoffverbund	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00	0,50	0,95	1,00	1,00
Polyester	0,00	0,00	0,95	0,00	0,00	0,50	0,95	1,00	1,00
Stahl	0,00	0,00	0,95	0,56	0,24	0,00	0,95	1,00	1,00
Titan	0,00	0,00	0,95	0,42	0,38	0,00	0,95	1,00	1,00

Tabelle G-1: Nutzungsdaten der Rohstoffe zur Berechnung des Kreislaufwirtschaftsindex