

# Interner Bericht

**DLR-IB-SY-BS-2025-167**

## **Ökologische Bewertung von Verbundbauteilen im Luftfahrtsektor**

### **Masterarbeit**

Sarah Tenbrock

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

Institut für Systemleichtbau



**DLR**

**Deutsches Zentrum  
für Luft- und Raumfahrt**



---

# Dokumenteigenschaften

Titel	<u>Ökologische Bewertung von Verbundbauteilen im Luftfahrtsektor</u>
Betreff	<u>Masterarbeit</u>
Institut	<u>Systemleichtbau</u>
Erstellt von	<u>Sarah Tenbrock</u>
Beteiligte	<u>Karina Kroos</u>
Geprüft von	<u>Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann, Prof. Dr.-Ing. Markus Böhl</u>
Freigabe von	<u>Dr.-Ing. Steffen Opitz</u>
Zugänglichkeit	<input checked="" type="checkbox"/> Stufe 1: Allgemein zugänglich (in elib ohne Zugangsbeschränkung) <input type="checkbox"/> Stufe 2: DLR intern zugänglich (in elib mit Beschränkung „nur DLR-intern zugänglich“)
Datum	<u>01.10.2025</u>
Version	<u>1.0</u>
Datei Info	<u>IB_2025_167_MA_Tenbrock.pdf</u>





Technische  
Universität  
Braunschweig



# Ökologische Bewertung von Verbundbauteilen im Luftfahrtsektor

**Masterarbeit**

cand. mach.  
Matrikel-Nr.:

Sarah Tenbrock, B. Sc.  
5332399

Betreuer:

Karina Kroos, M. Sc.  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Systemleichtbau  
Abteilung Nachhaltigkeitstechnologien

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Martin Wiedemann  
Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)  
Institut für Systemleichtbau;  
TU Braunschweig, Institut für Mechanik u. Adaptronik

Zweitprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Markus Böhl  
TU Braunschweig, Institut für Mechanik u. Adaptronik





## Abstract

The increasing use of carbon fiber reinforced plastics (CFRP) in the aviation industry is driven by the demand for lightweight structures to reduce fuel consumption. For the sustainability in the aviation industry, the fuel reduction became a priority and therefore a thorough environmental assessment on the entire life cycle of airplanes is necessary. However, existing Life Cycle Assessment studies often generalize the manufacturing phase, neglecting the ecological differences between various production technologies and the inherent uncertainties in process data. This master's thesis addresses this research gap by conducting a detailed, comparative LCA for five manufacturing processes for a representative CFRP aircraft component.

The study focusses on the production of an upper wing shell, geometrically approximated from DLR's interpretation of the Airbus A350-1000 using CPACS and TiGL. Five manufacturing processes, in detail the Automated Tape Laying/Automated Fiber Placement (ATL/AFP), Resin Transfer Infusion (RTI), Resin Transfer Moulding (RTM), Vacuum Assisted Process (VAP), and Vacuum-Assisted Resin Transfer Moulding (VARTM), are modeled and evaluated. The analysis is performed in accordance with ISO 14040/44 standards, utilizing the Brightway Framework and the Ecoinvent database. A key focus is placed on a comprehensive uncertainty and sensitivity analysis, employing Monte-Carlo simulations and a variance-based global sensitivity analysis (GSA) with Sobol indices to assess the robustness of the results and identify key influencing parameters. Furthermore, the modeled manufacturing processes are compared to the generic ecoinvent-dataset for "vacuum infusion moulding" to investigate the comparability with such datasets.

The results reveal that autoclave-based processes, such as ATL/AFP and RTI, exhibit significantly higher environmental impacts across most of the 16 assessed impact categories of the EF 3.1, primarily due to high energy consumption and nitrogen usage during the curing cycle. While especially the fiber and also the epoxy resin dominate the overall environmental footprint, the analysis demonstrates that the differences between the processes are driven by process-specific inputs. The GSA confirms that parameters such as autoclave/oven energy, nitrogen consumption, cooling energy, isopropanol consumption, breather material and the mold are the most significant contributors to the result variance. The comparison to the ecoinvent-dataset shows significant differences and highlights the importance of process-specific modeling.

This thesis concludes that a differentiated, process-specific modeling of the manufacturing phase is crucial for accurate LCAs of composite components in the aviation industry. The identification of specific environmental hotspots provides a quantitative basis for targeted process optimization and highlights the need for high-quality, transparent primary data to reduce uncertainties in future assessments.



Technische  
Universität  
Braunschweig



## Danksagung

Hiermit bedanke ich mich herzlich bei meiner Betreuerin, Karina Kroos, für ihre stetige Unterstützung und wertvollen Ratschläge. Ihr konstruktives Feedback und ihr hoher wissenschaftlicher Anspruch haben mich stets motiviert, meinen Horizont zu erweitern und über den Tellerrand hinaus zu schauen.

Ein besonderer Dank geht auch an meine Familie und meinen Freund für ihre Geduld und ihre moralische Unterstützung sowie motivierenden Worte, welche mich durch anstrengende Arbeitsphasen getragen haben.

Darüber hinaus möchte ich mich herzlich bei den Mitarbeitenden des Instituts für Systemleichtbau bedanken, welche mir mit ihrem Fachwissen zu Seite standen und mich bei der Modellierung meiner Ökobilanzierung unterstützt haben.



Technische  
Universität  
Braunschweig



## Eidesstattliche Erklärung

Hiermit versichere ich, Sarah Tenbrock, durch meine Unterschrift, dass ich die vorliegende Masterarbeit, mit dem Titel „Ökologische Bewertung von Verbundbauteilen im Luftfahrtsektor“ selbstständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel gefertigt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht.

Die Arbeit oder Auszüge daraus haben noch nicht in gleicher oder ähnlicher Form dieser oder einer anderen Prüfungsbehörde vorgelegen.

---

Braunschweig, 01.10.2025, Sarah Tenbrock

## **Inhaltsverzeichnis**

---

<b>Abbildungsverzeichnis .....</b>	<b>III</b>
<b>Tabellenverzeichnis.....</b>	<b>V</b>
<b>Abkürzungsverzeichnis .....</b>	<b>VI</b>
<b>Symbolverzeichnis .....</b>	<b>VIII</b>
<b>1. Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2. Grundlagen und Stand der Technik.....</b>	<b>3</b>
2.1. Faserverbundkunststoffe .....	3
2.1.1. Matrixsysteme .....	4
2.1.2. Fasern.....	6
2.2. Bauteile in Flugzeugen aus Faserverbundwerkstoffen .....	8
2.3. Herstellungsverfahren von Faserverbundwerkstoffen .....	12
2.3.1. Handlaminat.....	13
2.3.2. Infusionsverfahren.....	14
2.3.3. Resin Transfer Molding .....	17
2.3.4. Prepreg-Verfahren .....	18
2.3.5. Pultrusionsverfahren .....	21
2.3.6. Wickelverfahren .....	22
2.4. Nachhaltigkeitsbewertung .....	23
2.4.1. Grundlagen Nachhaltigkeit.....	23
2.4.2. Ökobilanzierung .....	24
2.5. Datengrundlagen und Datenerhebung .....	27
2.6. Wirkungsabschätzungsmethoden .....	28
2.7. LCA Software Tools .....	32
2.8. Charakterisierung und Quantifizierung von Unsicherheiten .....	35
<b>3. Materialien und Methoden .....</b>	<b>38</b>
3.1. Untersuchungsgegenstand: Obere Flügelschale des A350 .....	39
3.2. Phase 1: Ziel und Untersuchungsrahmen .....	42
3.3. Phase 2: Sachbilanz.....	44
3.4. Phase 3: Wirkungsabschätzung.....	47
3.5. Methodische Ansätze zur Auswertung und Analyse einer Ökobilanz.....	47

## Inhaltsverzeichnis

---

<b>4. Ergebnisse und Diskussion .....</b>	<b>49</b>
4.1. Ökobilanzierung .....	49
4.2. Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse .....	58
4.3. Datenqualitätsbewertung und Limitationen der Sachbilanz .....	63
<b>5. Ausblick .....</b>	<b>65</b>
<b>6. Zusammenfassung.....</b>	<b>66</b>
<b>7. Literaturverzeichnis .....</b>	<b>68</b>
<b>8. Anhang .....</b>	<b>74</b>
8.1. Sachbilanzen der Herstellungsverfahren.....	74
8.2. Ecoinvent Datensätze .....	76
8.3. Hintergrunddaten für die Sachbilanzen .....	77
8.3.1. Datenblätter.....	77
8.3.2. Expertenwissen.....	78
8.3.3. Berechnungen.....	79
8.4. Programmierter Code.....	80
8.5. Ergebnis Grafiken.....	81
8.5.1. Prozessschritte der Herstellungsverfahren .....	81
8.5.2. Sobol Indizes.....	81

## Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1: Einfluss der Verstärkungsart auf die Festigkeit eines Kunststoffes [47]... 4	4
Abbildung 2: Entwicklung des relativen FW-Anteils bei verschiedenen Airbus-Flugzeugmodellen von 1970 bis 2015 [79] .....	8
Abbildung 3: Relative Gewichtsanteile verschiedener Materialien in Airbus und Boeing Flugzeugen [21] .....	9
Abbildung 4: Differenzierung der Flugzeugkomponenten in Primär- und Sekundärstruktur .....	9
Abbildung 5: Materialzusammensetzungen des A350 [79] und der B787 [54].....	10
Abbildung 6: Anwendungsbeispiele für das AFP-Verfahren (a) Rotierende Form (b) Vertikale Ablage (c) Ablage mit Roboterarm [9].....	11
Abbildung 7: Herstellungsverfahren und deren Anwendung bei Flugzeugbauteilen [10] .....	12
Abbildung 8: Handlaminat Aufbau nach [4].....	13
Abbildung 9: VARTM Aufbau nach [36] und [31] .....	14
Abbildung 10: VAP Aufbau nach [77] und [24].....	15
Abbildung 11: RTI Aufbau nach [36].....	17
Abbildung 12: Schematischer Prozessablauf des traditionellen RTM-Verfahrens nach [30] .....	18
Abbildung 13: ATL-Funktionsprinzip nach [47] .....	19
Abbildung 14: Pultrusionsprozess nach [56].....	21
Abbildung 15: a) Säulenmodell und b) Nachhaltigkeitsdreieck nach [43] .....	24
Abbildung 16: a) Gewichtetes Säulenmodell und b) Hierarchisches Modell nach [43] .....	24
Abbildung 17: Phasen einer Ökobilanz nach [16] .....	25
Abbildung 18: Grundlegender Aufbau eines Box Plots nach [53] .....	37
Abbildung 19: Grafische Übersicht der methodischen Vorgehensweise .....	39
Abbildung 20: Der D369 des CPACS-Datensatzes im TiGL-Viewer.....	40
Abbildung 21: TiGL-Viewer Draufsicht des Flügels mit Abmaßen in m .....	41
Abbildung 22: TiGL-Viewer Seitenansicht des Flügels mit Abmaßen in m .....	41
Abbildung 23: Prozesskette zur Herstellung der Flügelschale.....	43
Abbildung 24: Relativer Vergleich der Herstellungsverfahren.....	49
Abbildung 25: Relativer Vergleich der Herstellungsverfahren mit dem Ecoinvent-Datensatz ohne Faser- und Harzmaterial.....	51
Abbildung 26: Relativer Vergleich der Herstellungsverfahren ohne Faser- und Harzmaterial .....	52
Abbildung 27: Relativer Vergleich der Aktivitäten vom ATL/AFP-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial .....	53
Abbildung 28: Relativer Vergleich der Aktivitäten vom RTI-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial .....	54
Abbildung 29: Relativer Vergleich der Aktivitäten vom RTM-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial .....	55

---

Abbildung 30: Relativer Vergleich der Aktivitäten vom VAP-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial .....	56
Abbildung 31: Relativer Vergleich der Aktivitäten vom VARTM-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial .....	57
Abbildung 32: Box Plot mit absoluten Vergleichswerten des GWP100 ohne Faser- und Harzmaterial .....	58
Abbildung 33: Sobol Indizes totaler und 1. Ordnung vom ATL/AFP-Verfahren .....	60
Abbildung 34: Sobol Indizes totaler Ordnung vom ATL/AFP-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial .....	61
Abbildung 35: Sobol Indizes totaler Ordnung vom RTI-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial .....	61
Abbildung 36: Sobol Indizes totaler Ordnung vom RTM-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial .....	62
Abbildung 37: Sobol Indizes totaler Ordnung vom VAP-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial .....	62
Abbildung 38: Sobol Indizes totaler Ordnung vom VARTM-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial .....	63

---

## Tabellenverzeichnis

Tabelle 1: Wirkungskategorien des EF 3.1 nach [15] .....	31
Tabelle 2: Vergleichende Übersicht der Inputs für die untersuchten Herstellungsverfahren.....	45
Tabelle 3: Detaillierte Sachbilanz für das ATL/AFP-Verfahren pro funktionelle Einheit .....	46

---

## Abkürzungsverzeichnis

---

Abkürzung	Beschreibung
ADP-Elements	Resource use: minerals and metals
ADP fossil	Resource use, fossil
AF	Aramidfasern
AFP	Automated Fiber Placement
AP	Acidification
ATL	Automated Tape Laying
CF	Kohlenstofffasern
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CFRP	Carbon Fiber Reinforced Plastics
CPACS	Common Parametric Aircraft Configuration Schema
DALYs	Disability Adjusted Life Years
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
EADS	European Aeronautic Defence and Space
EF	Environmental Footprint
ELCD	European Life Cycle Database
EXACT	Exploration of Electric Aircraft Concepts and Technologies
FE	Funktionelle Einheit
FEP	Eutrophication: Freshwater
FET	Ecotoxicity, freshwater
FVK	Faserverbundkunststoffe
FW	Faserverbundwerkstoff
GF	Glasfasern
GLARE	Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy
GSA	Globale Sensitivitätsanalyse
GUI	Grafische Benutzeroberfläche
GWP	Global Warming Potential
GWP100	Climate Change
HT	High Tenacity
HTOXc	Human toxicity, carcinogenic

---

---

HTOXnc	Human toxicity, non-carcinogenic
IM	Intermediate Modulus (mittlerer Modul)
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IRP	Ionising radiation, human health
ISO	International Organization for Standardization
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LSA	Lokale Sensitivitätsanalyse
LU	Land Use
MEP	Eutrophication: Marine
NCF	Non-Crimp Fabrics
NF	Naturfasern
NMVOG	Non-Methane Volatile Organic Compounds
ODP	Ozone depletion
PAN	Polyacrylnitril
PEEK	Polyetheretherketon
PMF	Particulate matter
POCP	Photochemical ozone formation, human health
PPS	Polyphenylensulfid
RTI	Resin Transfer Infusion
RTM	Resin Transfer Molding
TEP	Eutrophication: Terrestrial
T <sub>g</sub>	Glasübergangstemperatur
TiGL	Titanium Geometry Library
TRACI	Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts
USLCI	U.S. Life Cycle Inventory Database
VAP	Vacuum Assisted Process
VARTM	Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding
VOC	Volatile Organic Compounds (flüchtige organische Verbindungen)
VW	Verbundwerkstoffe

---

---

## Symbolverzeichnis

Symbol	Bedeutung	Einheit
$S_i$	Sobol-Indize 1. Ordnung	einheitslos
$S_{Ti}$	Sobol-Indize totaler Ordnung	einheitslos

---

## 1. Einleitung

Der globale Luftfahrtsektor befindet sich auf einem ununterbrochenen Wachstumskurs, der die Nachfrage nach neuen, effizienteren Flugzeugen stetig antreibt. Es wird prognostiziert, dass die Nachfrage nach Flügen im Passagiersektor und im Cargo Sektor jedes Jahr bis 2038 um 4,5 % steigen wird [6]. Um den damit verbundenen ökologischen Herausforderungen zu begegnen und Klimaziele wie die der „Flightpath 2050“-Initiative der Europäischen Kommission zu erreichen, ist eine wesentliche Reduktion des Flugzeuggewichts und damit des Treibstoffverbrauchs unumgänglich [25]. In diesem Kontext haben sich Faserverbundwerkstoffe (FW), insbesondere kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe (CFK) etabliert. Ihr Einsatz ermöglicht eine Gewichtseinsparungen von bis zu 40 % [66]. Sie finden Anwendung in modernen Flugzeuggenerationen wie dem Airbus A350 oder der Boeing 787, bei denen Faserverbundwerkstoffe bereits über 50 % des Strukturgewichts ausmachen [1]. Der Composite-Markt, angetrieben durch die Luft- und Raumfahrt sowie den Bedarf an Windenergie und Leichtbau im Automobilsektor, verzeichnet daher ein kontinuierliches Wachstum [59]. Dieses Wachstum erhöht den Bedarf an leistungsfähigen und produktiven Herstellungsverfahren, deren technologische und wirtschaftliche Bewertung zunehmend in den Fokus rückt [61, 66].

Gleichzeitig gewinnt das Leitbild der Nachhaltigkeit in der Luftfahrtindustrie an zentraler Bedeutung. Um die Umweltleistungen von Flugzeugen über ihren gesamten Lebenszyklus hinweg zu bewerten, hat sich die Methode der Ökobilanzierung als wissenschaftlicher Standard etabliert [78]. Bestehende Life Cycle Assessment (LCA)-Studien konzentrieren sich jedoch überwiegend auf die Nutzungsphase, da der Treibstoffverbrauch die dominante Umweltauswirkungen verursacht [6, 61]. Die Herstellungsphase, obwohl energie- und ressourcenintensiv, wird oft nur generalisiert oder vereinfacht abgebildet. Diese Vorgehensweise vernachlässigt die signifikanten ökologischen Unterschiede, die zwischen den verschiedenen Herstellungsverfahren für Faserverbund-Bauteile bestehen.

An dieser Forschungslücke setzt die vorliegende Masterarbeit an. Ziel ist eine detaillierte, vergleichende ökologische Bewertung von Herstellungsprozessen anhand einer Flugzeugoberschale der DLR-Interpretation des Airbus A350-1000 vorzunehmen. Der Fokus liegt explizit auf der Analyse der Kernprozesse und der Identifizierung der verschiedenen Life Cycle Inventories, um die verfahrensspezifischen Unterschiede herauszuarbeiten und die Relevanz einer differenzierten Betrachtung der Herstellungsverfahren für eine ganzheitliche Ökobilanzierung aufzuzeigen.

Eine besondere Herausforderung stellt dabei die Datenlage dar. Die Sachbilanzdaten für Faserverbundwerkstoffe in der Luftfahrt weisen in öffentlich zugänglichen Datenbanken erhebliche Lücken und einen Mangel an Transparenz auf [32]. Dies führt zu hohen Unsicherheiten in den Modellergebnissen. Aus diesem Grund wird in dieser Arbeit ein besonderer Schwerpunkt auf eine fundierte Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse gelegt. Mithilfe ausgewählter stochastischer und globaler

---

Analysemethoden werden die Robustheit der Ergebnisse bewertet und die einflussreichsten Parameter innerhalb der Prozessketten identifiziert.

---

## 2. Grundlagen und Stand der Technik

Dieses Kapitel beschreibt die technologischen und methodischen Grundlagen für die vorliegende Arbeit. Zunächst werden die technologischen Grundlagen zu den Faserverbundwerkstoffen erläutert, einschließlich ihres Einsatzes in Primär- und Sekundärstrukturen von Flugzeugen sowie der zugehörigen Herstellungsverfahren. Dies bildet die Basis für die anschließende Auswahl des zu untersuchenden Bauteils und der zu vergleichenden Herstellungsverfahren. Im zweiten Teil des Kapitels wird die methodische Grundlage für die ökologische Bewertung geschaffen. Hier werden die Grundprinzipien der Ökobilanzierung nach ISO 14040/44 dargestellt, einschließlich der Datenerhebung, der Wirkungsabschätzungsmethoden sowie des Einsatzes von spezifischer Software umfassen. Abschließend werden die Methoden vorgestellt, welche zur Unsicherheitsanalyse und Sensitivitätsanalyse von Ökobilanzergebnissen angewendet werden, um die für diese Arbeit geeigneten Analyseverfahren bestimmen zu können.

### 2.1. Faserverbundkunststoffe

Faserverbundkunststoffe (FVK) sind eine Untergruppe der Verbundwerkstoffe (VW), welche sich durch die Kombination verschiedener Materialien auszeichnen, um ein Eigenschaftsprofil zu erzielen, welches die der einzelnen Komponenten übertrifft. Das grundlegende Wirkprinzip eines FW besteht in der Aufgabenteilung der Komponenten. Dabei übernehmen die hochfesten und hochsteifen Fasern die primäre Lastaufnahme. Die umgebende Matrix hingegen fixiert die Fasern, stützt sie, überträgt Kräfte und schützt die Fasern vor äußeren Einflüssen.[30, 47]

Die Eigenschaften der Faserverbundwerkstoffe sind sowohl von der Länge der einzelnen Fasern sowie deren Orientierungen abhängig. Der Einfluss unterschiedlicher Faserlängen und -orientierungen auf die Festigkeit des Werkstoffs ist in Abbildung 1 dargestellt. Anhand der Abbildung ist zu erkennen, dass die höchste Festigkeit erreicht wird, wenn die Fasern endlos und gerichtet sind, also unidirektional. Weiterhin lässt sich erkennen, dass bereits kurze, ungerichtete Fasern zur Erhöhung der Festigkeit eines Kunststoffes beitragen. Als kurze Fasern werden Fasern mit einer Länge bis 1 mm bezeichnet, Langfasern haben eine Länge von 1 bis 50 mm und Endlosfasern gehen über das gesamte hergestellte Bauteil. [47]

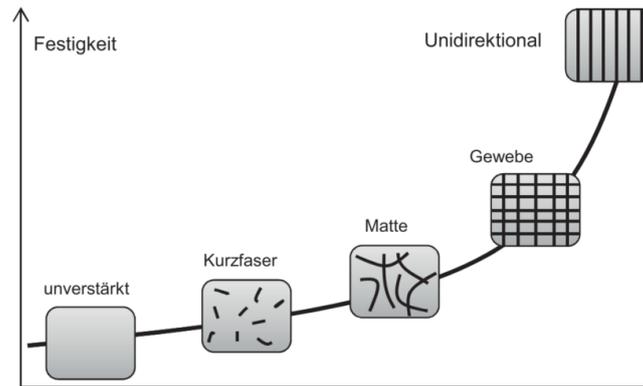


Abbildung 1: Einfluss der Verstärkungsart auf die Festigkeit eines Kunststoffes [47]

FVK bestehen im Wesentlichen aus einer Polymermatrix, welche mit hochfesten Fasern wie Kohlenstoff-, Glas- oder Aramidfasern verstärkt ist. Diese Materialkombination verleiht dem FVK maßgeschneiderte Eigenschaften. Insbesondere die hohen spezifischen Festigkeiten und Steifigkeiten bei gleichzeitig geringer Dichte machen FVK zu einem attraktiven Leichtbauwerkstoff und begründen die Bedeutung des Werkstoffs für die Luftfahrt. [37, 69]

### 2.1.1. Matrixsysteme

Die Matrix ist die kontinuierliche Phase, welche die Verstärkungsfasern einbettet. Das Matrixsystem ist maßgeblich für die Formgebung, die Temperaturbeständigkeit, die Schadenstoleranz und den Schutz der Fasern verantwortlich. Grundsätzlich wird zwischen duroplastischen und thermoplastischen Matrixmaterialien unterschieden. [30]

#### Duroplaste

Duroplaste sind die historisch dominierenden und am weitesten verbreiteten Matrixsysteme für Hochleistungs-FVK in der Luftfahrt [37, 47]. Sie bestehen aus niedermolekularen Harz- und Härterkomponenten, die während der Bauteilherstellung in einer irreversiblen chemischen Reaktion, der Härtung, zu einem engmaschigen, dreidimensionalen Molekülnetzwerk vernetzen [47]. Der Werkstoff ist nach der Aushärtung nicht mehr schmelz- oder umformbar [4, 47].

In der Luftfahrtindustrie kommen verschiedene duroplastische Harzsysteme zum Einsatz. Die mit Abstand wichtigste Klasse der Duromere für Strukturanwendungen in der Luftfahrtindustrie, sind Epoxidharze, welche über 90 % aller primär tragenden Verbundkomponenten in Flugzeugstrukturen ausmachen [10]. Epoxidharze sind für die Luftfahrt von besonderem Interesse aufgrund ihrer guten Haftung an den Fasern, guten mechanischen Eigenschaften und ihrer hohen Beständigkeit gegenüber flugzeugtypischen Medien wie Kerosin, Hydraulikflüssigkeiten (z.B. Skydrol) und Enteisungsmitteln [10, 69]. In der Luftfahrt sind vor allem zwei Systemklassen qualifiziert. Zum einen Systeme mit einer Härtungstemperatur von 125 °C und zum anderen Systeme mit einer Härtungstemperatur von 180 °C. Die maximale Einsatztemperatur wird durch die Glasübergangstemperatur des Harzes begrenzt, welche bei den 180 °C-Systemen bei bis zu 120 °C liegt. [10]

Phenolharze werden aufgrund guter Brandeigenschaften hauptsächlich für Kabineninnenräume verwendet, wie beispielsweise für Innenverkleidungen von Flugzeugen oder Zügen [47]. In diesen Innenräumen sind die Brandbeständigkeit und eine geringe Rauchentwicklung entscheidend. Phenolharze bieten gute thermische Eigenschaften, hohe Haftfestigkeit, Dimensionsstabilität und Kriechbeständigkeit [10, 54]. Im Vergleich zu Epoxidharzen weisen Phenolharze jedoch eine geringere Zähigkeit und Festigkeit auf, sodass diese Harze nicht in Strukturanwendungen eingesetzt werden [47].

Für Anwendungen mit Temperatureinsatzgrenzen oberhalb von 120 °C kommen Bismaleimidharze zum Einsatz. Diese müssen jedoch im Vergleich zu Epoxidharzen bei Temperaturen über 200 °C nachgehärtet werden, um das Eigenschaftsprofil vollständig auszubilden. [47]

Zu den wesentlichen Vorteilen der Duromere zählen die guten mechanischen Kennwerte, die hohe Temperaturbeständigkeit, eine große Auswahl an etablierten Systemen und Verarbeitungsverfahren sowie im Vergleich zu Thermoplasten geringere Materialkosten [37]. Die niedrige Viskosität von Duromeren im unvernetzten Zustand erleichtert zudem die vollständige Imprägnierung der Fasern [30]. Nachteilig sind die langen Prozesszeiten durch die chemische Härtingsreaktion, eine höhere Sprödigkeit im Vergleich zu Thermoplasten, und die begrenzte Lagerfähigkeit von vorimprägnierten Prepregs, die eine durchgehende Kühlkette erfordern [47].

### **Thermoplaste**

Thermoplaste bestehen aus langen, linearen oder verzweigten Makromolekülen (Polymerketten). Dabei sind diese Moleküle nicht chemisch miteinander vernetzt, sondern werden physikalisch durch Verschlaufungen und zwischenmolekulare Kräfte zusammengehalten. Aus diesem Grund sind die Thermoplaste im Gegensatz zu den Duroplasten schmelzbar und reversibel. Durch die Zufuhr von Wärmeenergie verringern sich die zwischenmolekularen Kräfte, die Ketten werden beweglich und der Kunststoff wird zu einer formbaren Schmelze. Beim Abkühlen erstarren die Ketten in der neuen Position. [47]

Für die Hochleistungsanwendungen in der Luftfahrt kommen vor allem semi-kristalline Thermoplaste wie Polyetheretherketon (PEEK) und Polyphenylensulfid (PPS) zum Einsatz. PEEK besitzt eine Schmelztemperatur, die zwischen 340 °C und 380 °C liegt, und eine Zugfestigkeit von 90-100 MPa, während PPS bei 280-290 °C schmilzt und eine Zugfestigkeit von 85 MPa aufweist. Beide Kunststoffe zeichnen sich durch eine hohe Temperaturbeständigkeit und Medienbeständigkeit aus. [10]

Der größte Vorteil von Thermoplasten liegt in der exzellenten Schlagzähigkeit und Schadenstoleranz, welche diejenige von Duromeren übertrifft. Hinzu kommen die geringen Zykluszeiten von wenigen Minuten, da keine zeitaufwendige chemische Reaktion stattfinden muss sowie die Möglichkeit, den Kunststoff zu schweißen und umzuformen. Darüber hinaus bieten diese Eigenschaften das Potential für eine Out-of-Au-

toclave Fertigung. Ein weiterer Vorteil ist, dass Thermoplaste keine Kühlung benötigen, wodurch das Materialmanagement vereinfacht und eine unbegrenzte Lagerfähigkeit ermöglicht wird. [10, 37, 47]

Die wesentlichen Herausforderungen, welche die breite Anwendung von Thermoplasten in großen Primärstrukturen von Flugzeugen bisher limitiert haben, sind die hohe Schmelzviskosität, welche eine vollständige, porenfreie Imprägnierung der Fasern erschwert, die hohen Verarbeitungstemperaturen von bis zu 380 °C und höhere Materialkosten als bei Duromeren [10]. Die Forschung konzentriert sich daher intensiv auf neue Verarbeitungs- und Imprägnierungstechnologien, um diese Nachteile zu überwinden und das Potential der Thermoplaste zukünftig breiter für Flugzeugstrukturen nutzbar zu machen. [27, 66]

Die Wahl zwischen Duroplasten und Thermoplasten für Luftfahrtkomponenten stellt einen komplexen Kompromiss zwischen Fertigungseffizienz, Betriebsleistung und Entsorgungsaspekten dar. Während Duroplaste, insbesondere Epoxidharz, aufgrund der etablierten Leistung und Verarbeitbarkeit dominieren, gewinnen Thermoplaste aufgrund ihrer inhärenten Wiederverwendbarkeit und des Potenzials für schnellere, autoklavfreie Verarbeitung zunehmend an Bedeutung. Es muss jedoch berücksichtigt werden, dass die höheren Verarbeitungstemperaturen von Thermoplasten zu neuen Energieanforderungen und Werkzeugkomplexitäten führen, die gegen ihre Recyclingvorteile abgewogen werden müssen. [10]

### **2.1.2. Fasern**

Die Fasern sind die primären Lastträger des Verbundwerkstoffes [47]. Die Werkstoffe weisen in Faserform deutlich höhere Festigkeiten und Steifigkeiten auf als in kompakter Form, sodass diese Eigenschaft eine Grundlage der Faserverbundtechnologie ist [69]. Die Fasern im Faserverbundmaterial sind in der Regel stärker, steifer und härter als das umgebende Matrixmaterial. In Hochleistungskompositen machen die Fasern typischerweise 60 bis 70 Volumenprozent aus [10]. Die mechanische Leistung von FVK hängt maßgeblich von den Eigenschaften und der Anordnung der Verstärkungsfasern ab [47].

#### **Kohlenstofffasern**

Kohlenstofffasern (CF) sind aufgrund der überragenden spezifischen Eigenschaften das dominierende Fasermaterial in primär tragenden Flugzeugstrukturen [46]. Die CF zeichnen sich durch hohe Festigkeiten und Steifigkeiten bei gleichzeitig geringer Dichte von 1,8 g/cm<sup>3</sup> aus [4]. Je nach Anforderungsprofil werden unterschiedliche Typen von Fasern eingesetzt. Die für Flugzeugstrukturen am häufigsten verwendeten Fasern sind die sogenannten HT-Fasern (High Tenacity), welche eine Zugfestigkeit von 3600 MPa und einen E-Modul von 240 GPa aufweisen und die IM-Fasern (Intermediate Modulus) mit einer Zugfestigkeit von 4700 MPa und einem E-Modul von 295 GPa [10]. Die für die Luftfahrt genutzten Fasern haben eine Durchmesser von

---

5 bis 7  $\mu\text{m}$  und basieren auf einer graphitähnlichen inneren Architektur [10]. Die einzelnen Fasern werden zu Faserbündeln, den sogenannten Rovings oder Tows, zusammengefasst, welche typischerweise aus 1000 (1k) bis 24000 (24k) Einzelfilamenten bestehen [10]. Die Herstellung aus einem organischen Vorläufermaterial, meist Polyacrylnitril (PAN), ist ein energieintensiver Prozess. Dieser Prozess umfasst eine oxidative Stabilisierung und eine anschließende Carbonisierung bei Temperaturen zwischen 1200 °C und 1500 °C für HT-Fasern unter inerter Atmosphäre [10].

### **Glasfasern**

Glasfasern (GF) werden als Verstärkungsfasern typischerweise in Polyester- oder Vinylesterharze eingesetzt [66]. Diese Verbundkunststoffe bieten ein gutes Kosten-Leistungs-Verhältnis und hohe Festigkeiten, weisen jedoch eine signifikant geringere Steifigkeit von 70 bis 90 GPa und eine höhere Dichte von 2,5  $\text{g/cm}^3$  als Kohlenstofffasern auf [66]. Der Einsatz von Glasfasern in primären Flugzeugstrukturen ist daher aufgrund des geringeren Leichtbaupotenzials limitiert [10, 30]. GF werden jedoch für Sekundärstrukturen oder in Hybridlaminaten wie GLARE (Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy), welches im Rumpf des A380 verbaut ist, verwendet [69].

### **Aramidfasern**

Aramidfasern (AF), wie Kevlar®, werden typischerweise in Epoxid- oder Phenolharzen als Verstärkungsfasern verwendet. Die Fasern zeichnen sich durch hohe Festigkeit, gute Schlagzähigkeit und gute Ermüdungseigenschaften aus. AF sind bekannt für ihre Zähigkeit und Beständigkeit gegen ballistischen Einschlag. Die Nachteile sind jedoch die Empfindlichkeit gegenüber Feuchtigkeitsaufnahme, eine geringe Druckfestigkeit und die Empfindlichkeit gegenüber UV-Strahlung. In der Luftfahrt werden diese Fasern in ballistischen Schutzsystemen, Hubschrauberrotorblättern und Komponenten eingesetzt, die hohe Geschwindigkeitsaufprallen ausgesetzt sind. [66]

### **Naturfasern**

Naturfasern (NF) wie Bambus, Flachs oder Hanf werden als Verstärkungsfasern oft in biobasierten Harzen verwendet. Diese Verbundwerkstoffe bieten deutliche Umweltvorteile, da die Materialien biologisch abbaubar sind und aus erneuerbaren Quellen stammen. Heutzutage werden Naturfasern aufgrund ihres geringen Gewichts, ihrer Nachhaltigkeit und ihrer hohen Dämpfungseigenschaften in bestimmten Nischenanwendungen, vor allem im Automobilinnenraum oder für Sportgeräte, eingesetzt. Für primär tragende Hochleistungsstrukturen in der Luftfahrt spielen Naturfasern aufgrund ihrer vergleichsweise geringeren mechanischen Kennwerte und höherer Feuchtigkeitsaufnahme keine Rolle [4]. Nichtsdestotrotz werden naturfaserverstärkte Kunststoffe im Flugzeugbau für Innenverkleidungen und quasi-strukturelle Anwendungen erforscht [66].

Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die Kombination aus einer spezifisch ausgewählten Faser und einem darauf abgestimmten Matrixsystem einen maßgeschneiderten Werkstoff ergibt. Die Anisotropie dieser Verbundwerkstoffe, deren Eigenschaften wesentlich von der Faserorientierung abhängen, ermöglicht ein lastpfadgerechtes Design, welches durch metallische Werkstoffe nicht realisierbar ist und das Leichtbaupotenzial der Faserverbundkunststoffe begründet [47].

## 2.2. Bauteile in Flugzeugen aus Faserverbundwerkstoffen

In der modernen zivilen Luftfahrt ist ein stetig wachsender Einsatz von Faserverbundwerkstoffen, insbesondere kohlenstofffaserverstärkten Kunststoffen, festzustellen. Dieser Trend ist maßgeblich durch das hohe Leichtbaupotenzial der Materialien getrieben, welches eine signifikante Reduktion des Strukturgewichts und folglich des Treibstoffverbrauchs ermöglicht. Durch den Einsatz von FVK kann der Kerosinverbrauch um bis zu 25 % im Vergleich zu einem Referenzflugzeug aus konventionellen Aluminiumlegierungen gesenkt werden [21]. Dies trägt direkt zur Reduktion von Emissionen während der Betriebsphase bei [21]. Die Entwicklung des Werkstoffeinsatzes über die letzten Jahrzehnte zeigt diesen Paradigmenwechsel eindrücklich. Anhand von Abbildung 2 ist zu erkennen, dass während frühere Airbus-Modelle wie der A300 noch fast ausschließlich aus metallischen Werkstoffen bestanden, der Gewichtsanteil von VW kontinuierlich anstieg.

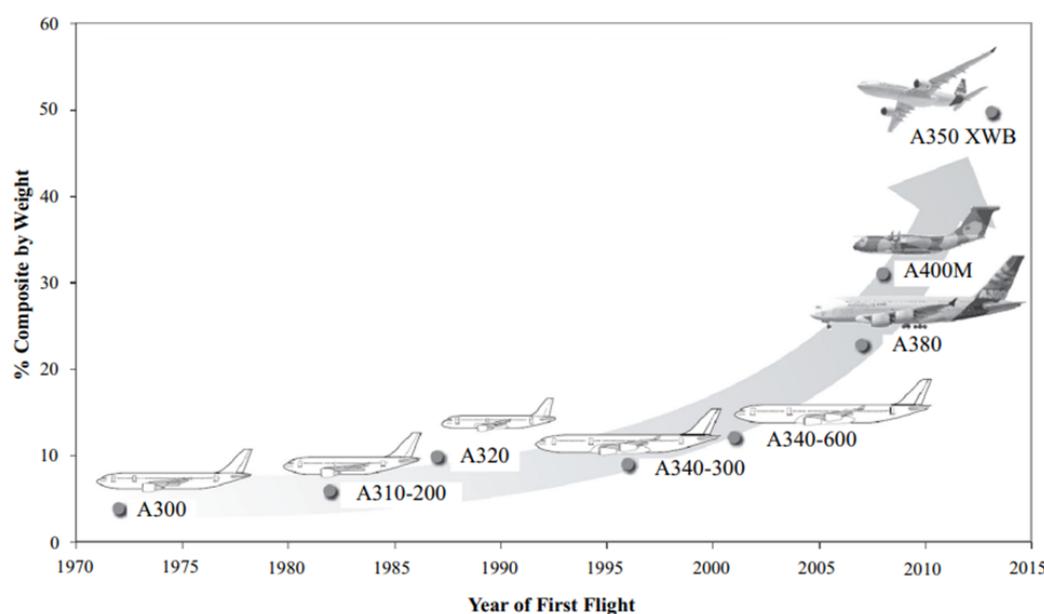


Abbildung 2: Entwicklung des relativen FW-Anteils bei verschiedenen Airbus-Flugzeugmodellen von 1970 bis 2015 [79]

Dieser technologische Wandel findet seinen Ausdruck insbesondere in den neuesten Flugzeuggenerationen wie dem Airbus A350 XWB und dem Boeing 787 Dreamliner. Bei diesen Modellen machen Faserverbundkunststoffe über 50 % des gesamten Strukturgewichts aus und ersetzen Aluminium als dominierenden Werkstoff [1]. Dieser

Trend bei den Herstellern Airbus und Boeing mit unterschiedlichen Flugzeuggenerationen ist in Abbildung 3 anhand der Gewichtsanteile der unterschiedlichen Materialien zu sehen.

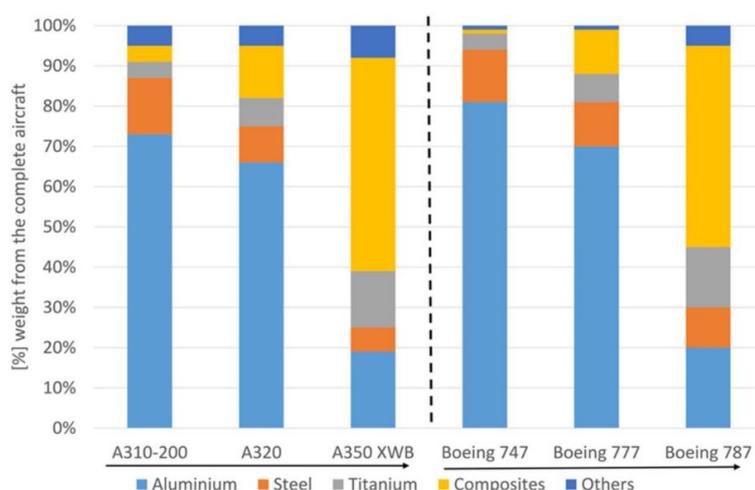


Abbildung 3: Relative Gewichtsanteile verschiedener Materialien in Airbus und Boeing Flugzeugen [21]

In der Literatur wird bei der Beschreibung von Flugzeugbauteilen grundsätzlich zwischen der Primär- und Sekundärstruktur unterschieden. Die Primärstruktur umfasst die wesentlichen lasttragenden Komponenten eines Flugzeugs, wie beispielsweise den Rumpf, Flügeln und Leitwerke. An diese Strukturen werden höchste Sicherheits- und Zulassungsanforderungen gestellt, da ihr Versagen katastrophale Folgen hätte [76]. Die Sekundärstruktur hingegen besteht aus niedriger belasteten Bauteilen, deren Ausfall die Flugtüchtigkeit nicht unmittelbar gefährdet [76]. Hierzu zählen beispielsweise Verkleidungsteile, Landeklappen oder Ruder [69]. Abbildung 4 gibt einen Überblick über die Zuordnung einzelner Flugzeugkomponenten zu den jeweiligen Strukturgruppen.

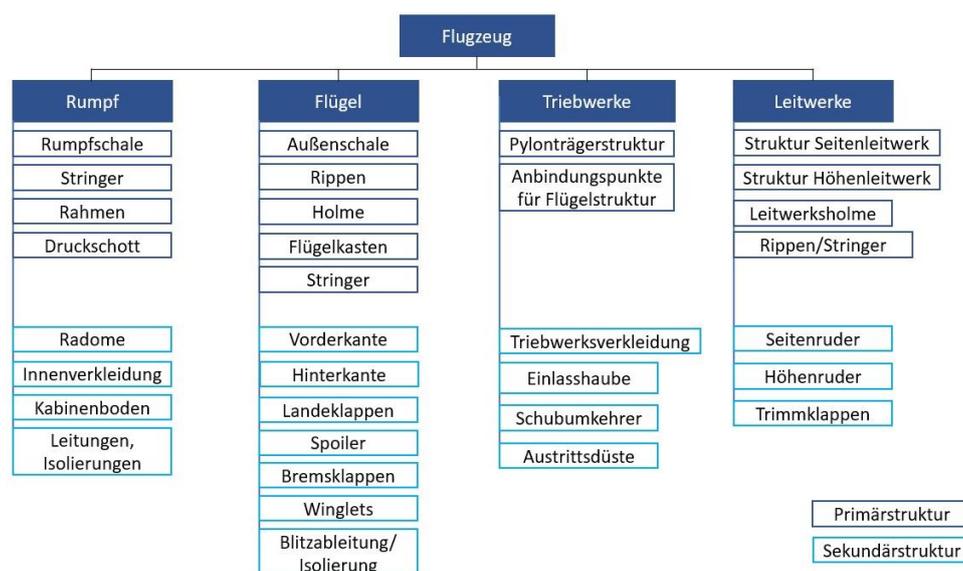


Abbildung 4: Differenzierung der Flugzeugkomponenten in Primär- und Sekundärstruktur

Entsprechend dieser Klassifizierung begann der Einsatz von VW in den 1970er Jahren zunächst bei Verkleidungsbauteilen und Sekundärstrukturen wie Spoilern. Erst nachdem ausreichend positive Betriebs- und Langzeiterfahrungen gesammelt waren, wurde der Einsatz schrittweise auf sicherheitskritische Primärstrukturen erweitert. Im Jahr 1987 wurde somit zum ersten Mal das Seitenleitwerk des Airbus A310, anschließend das Höhenleitwerk des A320 und der Druckschott des A340 aus VW gefertigt. [69]

Heute werden Faserverbundwerkstoffe in einer Vielzahl von Komponenten über die gesamte Flugzeugstruktur hinweg eingesetzt, wobei je nach Bauteilanforderung spezifische Herstellungsverfahren zu Anwendung kommen. Eine grafische Darstellung der Materialzusammensetzungen des A350 und der B787 ist in Abbildung 5 dargestellt.

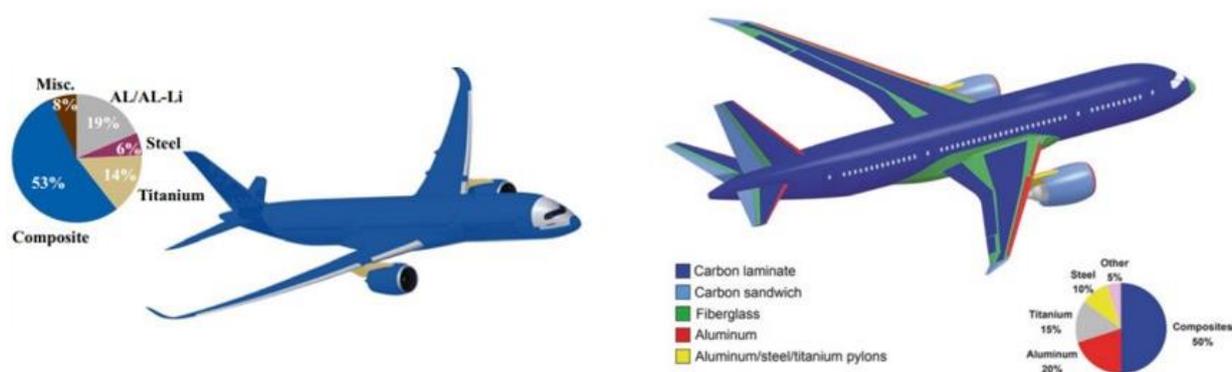


Abbildung 5: Materialzusammensetzungen des A350 [79] und der B787 [54]

Die Rumpf- und Flügelstrukturen des Airbus A350 und der Boeing 787 bestehen zu großen Teilen aus CFK-Laminaten [1]. Für die Fertigung der großflächigen, aerodynamisch geformten Rumpf- und Flügelschalen werden hochautomatisierte Legeverfahren wie das Automated Fiber Placement (AFP) und das Automated Tape Laying (ATL) eingesetzt [47]. Beispiele für die Ablage mit dem AFP-Verfahren sind in Abbildung 6 dargestellt.

Eine Besonderheit liefert die Bombardier C Series, heutzutage unter Airbus als A220 im Einsatz, bei welcher die Flügel mit dem Resin Transfer Infusion-Verfahren (RTI) vollständig aus Faserverbundkunststoff gefertigt werden [54].

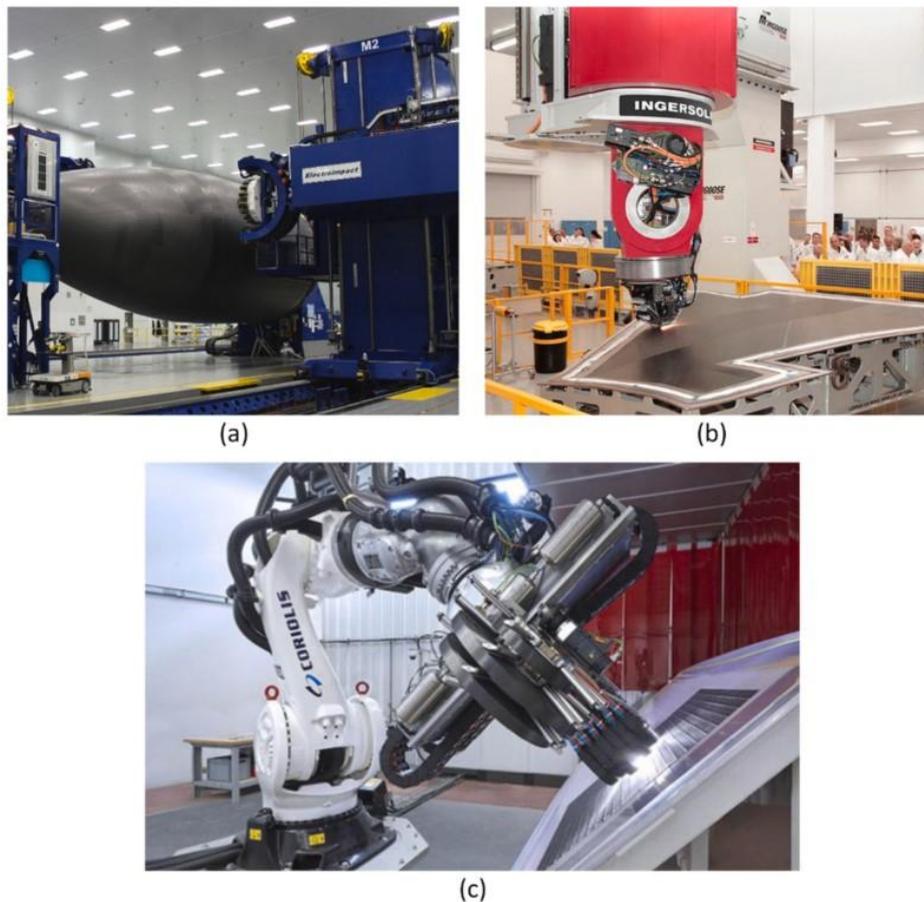


Abbildung 6: Anwendungsbeispiele für das AFP-Verfahren (a) Rotierende Form (b) Vertikale Ablage (c) Ablage mit Roboterarm [9]

Das hintere Druckschott (Rear Pressure Bulkhead), ein hochbelastetes Primärstrukturbauteil, wird je nach Flugzeugtyp mittels verschiedener Verfahren wie dem Vacuum Assisted Process Verfahren (VAP) beim Airbus A220, oder mittels AFP gefertigt [36, 54]. [8] beschäftigte sich darüber hinaus mit der automatisierten Ablage von Gelegen durch kooperierende Roboter oder kinematische Greifer für die Fertigung großflächiger Bauteile, wie der des Druckschotts.

Kleinere, aber geometrisch komplexe Strukturkomponenten wie Spante, Rippen oder Stringer, die zur Aussteifung der Schalenstruktur dienen, werden oftmals im Resin Transfer Molding (RTM) Verfahren hergestellt. Auch hochbeanspruchte Triebwerkskomponenten wie die Fan-Blades werden heutzutage bei der Boeing 787 im RTM-Prozess aus CFK gefertigt. [50]

Die genannten Herstellungsverfahren, deren Auswahl maßgeblich von der Bauteilgröße, -komplexität und den Stückzahlen abhängt, werden in den folgenden Kapiteln detailliert beschrieben.

## 2.3. Herstellungsverfahren von Faserverbundwerkstoffen

Die Realisierung von spezifischen Bauteileigenschaften und die wirtschaftliche Fertigung hängt maßgeblich von der Wahl der geeigneten Prozesstechnologie ab. In der Luft- und Raumfahrt haben sich eine Reihe hochspezialisierter, meist automatisierter Verfahren etabliert, um den Qualitäts- und Leistungsanforderungen gerecht zu werden. [2]

Die Auswahl des optimalen Herstellungsverfahrens ist ein komplexer Abwägungsprozess, der von zahlreichen Faktoren, insbesondere der Bauteilgröße und -komplexität, abhängt. Anhand von Abbildung 7, in welcher die unterschiedlichen Herstellungsverfahren mit den Anwendungsbereichen in der Luftfahrt dargestellt sind, ist zu erkennen, dass sich für nahezu jede Kombination aus Bauteilgröße und geometrischer Komplexität ein prädestiniertes Fertigungsverfahren identifizieren lässt.

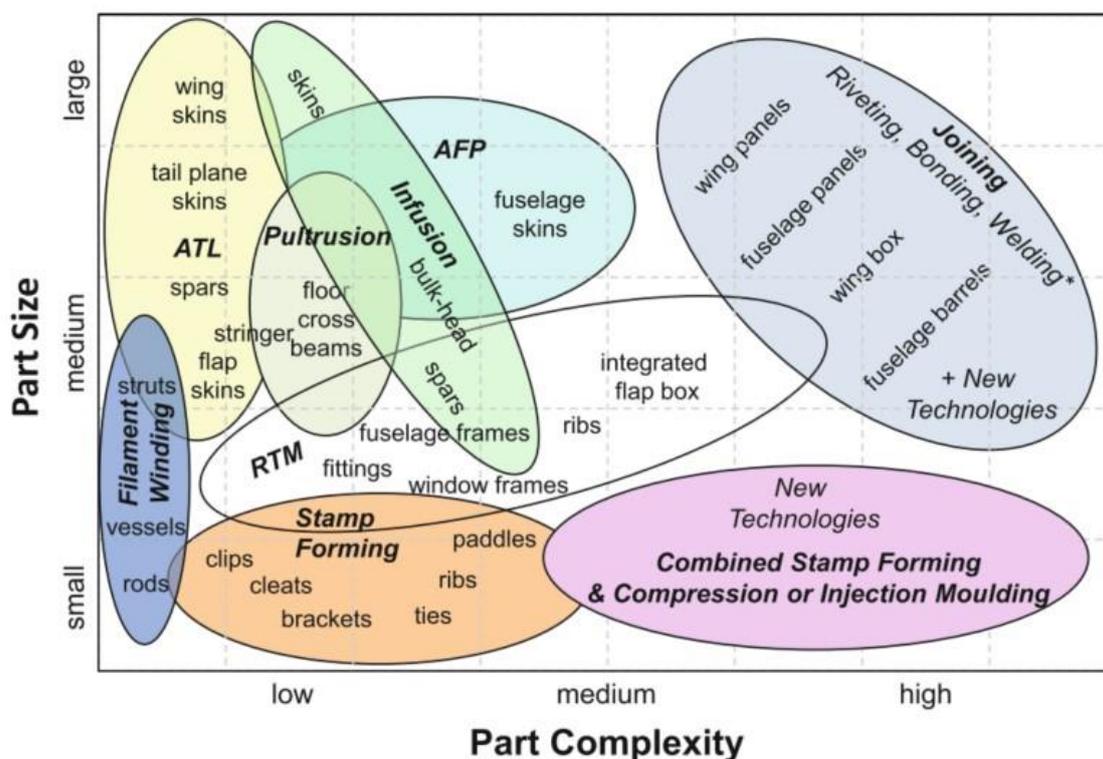


Abbildung 7: Herstellungsverfahren und deren Anwendung bei Flugzeugbauteilen [10]

Diese Übersicht verdeutlicht, dass es nicht das eine universelle Herstellungsverfahren gibt, sondern eine prozessuale Vielfalt, die es ermöglicht, für jede spezifische Anforderung der Luftfahrtindustrie eine technologisch und ökonomisch passende Lösung zu finden. Die folgenden Unterkapitel werden detailliert auf einige der bekanntesten Herstellungsverfahren eingehen sowie auf die Verfahren, die für die Herstellung von modernen Flugzeugen von Bedeutung sind. Die nachfolgenden Informationen zu verschiedenen Herstellungsverfahren bilden die Grundlage für die Auswahl der Verfahren, die im Rahmen der Ökobilanzierung verglichen werden sollen.

### 2.3.1. Handlaminat

Handlaminat ist das älteste und grundlegendste Herstellungsverfahren für Faserverbundbauteile. Dieses Verfahren wurde bereits in den 1940er Jahren in den USA entwickelt und hauptsächlich für den Boots- und Segelflugzeugbau sowie für Becken- und Behälterauskleidungen eingesetzt. Bei dem Handlaminat werden Fasergewebe oder -gelege abwechselnd mit Textilmatten schichtweise in eine einseitige Form gelegt. Dabei wird nach jeder Lage die Harzmatrix aufgetragen und mit einem Handroller oder einer Handwalze verdichtet und entlüftet. Dieser Prozess erfordert eine hohe Sorgfalt, um den Faservolumengehalt konstant zu halten und für eine ausreichende Entlüftung zu sorgen. Das Handlaminat-Verfahren ist im Vergleich zu anderen Herstellungsverfahren kostengünstig, jedoch wird nur eine glatte Bauteilseite erzielt und die Dicke der hergestellten Bauteile ist limitiert. [4, 30]

Insgesamt handelt es sich um einen lagenweisen Wandungsaufbau, bei dem zuerst eine Trennmittelschicht auf die Form aufgetragen wird, damit das Bauteil nach dem Aushärten aus der Form gelöst werden kann. Daraufhin folgt eine „Gelcoat“-Schicht und eine Pufferschicht, wobei der Gelcoat unter anderem die Aufgabe hat das Laminat vor Witterungen, UV-Strahlung und chemischer Beanspruchung zu schützen. Die Pufferschicht dient als Trennung zwischen Gelcoat und Laminat und sorgt darüber hinaus für einen Spannungsausgleich, sodass Rissbildungen oder Delaminationen vorgebeugt werden. Nach der Pufferschicht folgt die Ablage der Gelege bzw. Gewebe und der Textilmatten sowie die Harzeinarbeitung. Abschließend kann optional ein Topcoat aufgetragen werden. Der Topcoat dient zur Abdeckung der Fasern und fungiert darüber hinaus, wie der Gelcoat auf der Werkzeugseite, als Verschleiß- bzw. Witterungsschutz. Eine schematische Abbildung dieses Aufbaus ist in Abbildung 8 Abbildung 8: Handlaminat Aufbau nach [4] zu sehen. [4]

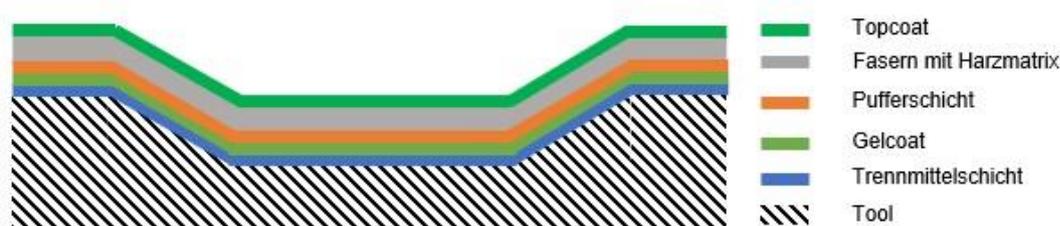


Abbildung 8: Handlaminat Aufbau nach [4]

Nachteile des Verfahrens sind, dass Handlaminieren zeitintensiv ist und die Qualität des Bauteils maßgeblich von den Fertigkeiten der Person abhängt, die das Bauteil herstellt. Des Weiteren weisen die Bauteile Unebenheiten und Lufteinschlüsse auf. Der schwerwiegendste Nachteil von Handlaminat ist, dass typische flüchtige organische Verbindungen (VOC) wie Styrol an die Atmosphäre abgegeben werden. Diese Gase sind umwelt- und gesundheitsschädlich und werden aus diesem Grund durch Umweltgesetzgebungen streng kontrolliert. Diese Nachteile führen dazu, dass Handlaminat in der heutigen Zeit kaum Verwendung findet und durch andere effektivere Verfahren ersetzt wird. [30, 46]

## 2.3.2. Infusionsverfahren

Unter Infusionsverfahren werden diejenigen Methoden verstanden, welche eine Druckdifferenz zwischen der Harzzufuhr und der Kavität, also dem Vakuumaufbau aufweisen. Bei Infusionsverfahren ist der Druck innerhalb der Kavität geringer als derjenige der Atmosphäre. [36]

Im Allgemeinen wurden im Laufe der Zeit eine Vielzahl von Infusionsverfahren entwickelt und patentiert. In der Literatur kommt es bei der Bezeichnung der unterschiedlichen Verfahren zu Widersprüchen, da die gleichen Bezeichnungen in einigen Fällen für unterschiedliche Verfahren genutzt werden und nicht immer eindeutig ist auf wen ein Infusionsverfahren zurückgeführt werden kann. [36]

Die hier erläuterten Verfahren beruhen auf den Informationen, welche im Großteil der Literatur wiedergegeben werden. Es wird sich auf die Beschreibung von drei Verfahren konzentriert, die industriell bei der Herstellung von Flugzeugbauteilen verwendet werden.

### Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding

Vacuum-Assisted Resin Transfer Molding (VARTM) ist ein Infusionsverfahren bei dem ein Vakuum innerhalb des Vakuumbeutels gebildet wird, sodass durch die Druckdifferenz zur Atmosphäre das Harz in den Lagenaufbau gezogen wird. Im ersten Schritt werden Kohlenstofffaserlagen in die Form gelegt. Nach der Ablage wird die Form mit einer Vakuumfolie geschlossen. Optional wird davor Peel Ply über die Fasern gelegt und daraufhin wird der Aufbau evakuiert. Nach der Evakuierung wird das Harz in den Aufbau gezogen. Anschließend wird das getränkte Bauteil in einem Ofen ausgehärtet. [44, 55]

Der schematische Vakuumaufbau des VARTM-Verfahrens ist in Abbildung 9 dargestellt.

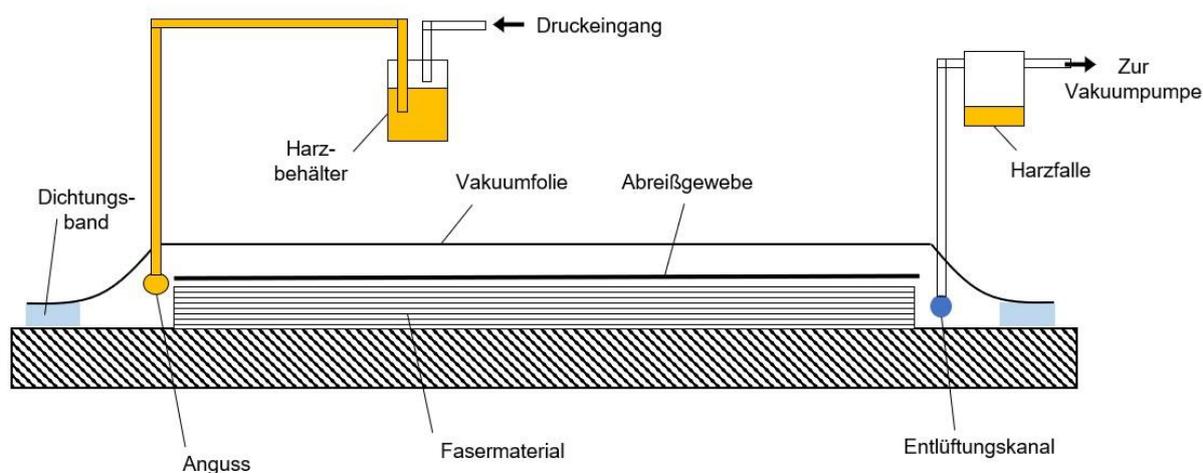


Abbildung 9: VARTM Aufbau nach [36] und [31]

Dieses Verfahren ist kostengünstiger als das RTM-Verfahren und Verfahren, welche den Autoklaven zur Aushärtung nutzen. Des Weiteren werden mit diesem Verfahren auch große Bauteile wie der Druckschott der Boeing 787 hergestellt. [31]

Ein Nachteil des Verfahrens ist jedoch die Abhängigkeit vom Vakuum. Durch das Vakuum wird die Luft durch den Aufbau gezogen, anstatt das Harz mit zusätzlichem Druck hineinzupressen. Dies kann dazu führen, dass insbesondere bei komplexen Geometrien das Harz nicht durch das gesamte Bauteil gezogen wird und trockene Stellen entstehen. Aus diesem Grund ist es bei VARTM wichtig, die Harzanschlüsse und den Anschluss für das Vakuum sorgfältig zu planen, um eine vollständige Durchtränkung mit dem Harz zu garantieren. [30]

### Vacuum Assisted Process

Vacuum Assisted Process (VAP) ist ein Infusionsverfahren, bei dem eine semipermeable Membran genutzt wird. Diese Membran ist für Gase durchlässig, jedoch nicht für das flüssige Harz. Im Gegensatz zu konventionellen Infusionsverfahren, wie dem VARTM, bei denen die Entlüftung an diskreten, positionierten Anschlüssen erfolgt, ermöglicht die VAP-Membran eine kontinuierliche und flächige Evakuierung des Bauteils. Bei dem Aufbau wird über die Faserablage und die VAP-Membran Abreißgewebe (Breather) gelegt und abschließend die Vakuumfolie. Das Abreißgewebe ist bei diesem Verfahren von großer Bedeutung, da damit sichergestellt wird, dass die Entlüftung zwischen der VAP-Membran und der Vakuumfolie kontinuierlich abläuft und die Vakuumfolie nicht durch den Umgebungsdruck an die VAP-Membran gepresst wird und keine Entlüftung stattfinden kann. [36, 77]

Der vollständige schematische Vakuumaufbau ist in Abbildung 10 zu sehen.

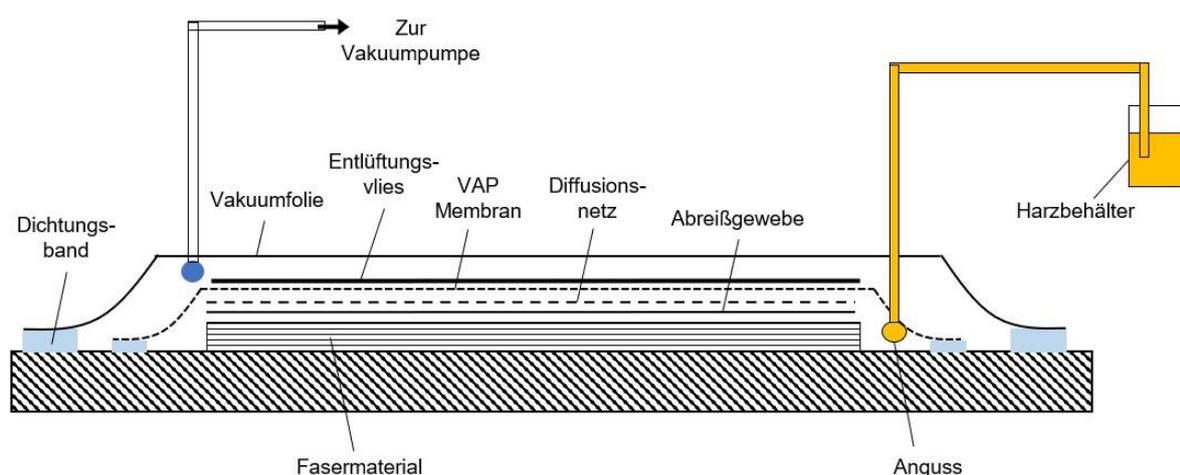


Abbildung 10: VAP Aufbau nach [77] und [24]

VAP wurde von European Aeronautic Defence and Space (EADS) entwickelt und zusammen mit dem Hersteller Trans-Textil GmbH, welcher die offizielle VAP-Membran herstellt, patentiert. [33]

---

Ein Nachteil des VAP-Verfahrens sind die zusätzlichen Kosten und der erhöhte Zeitaufwand aufgrund der zusätzlichen Membran bei dem Vakuumaufbau. Die Membran ist empfindlich und muss mit Sorgfalt abgelegt werden, da ansonsten die Poren der Membran verzogen und beschädigt werden können. Des Weiteren müssen die Infusionsparameter wie die Temperatur, der Druck und die Viskosität des Harzes auf die spezifisch verwendete Membran abgestimmt sein. Die Membran funktioniert nur dann einwandfrei, wenn das Harz diese bis zum Ende der Aushärtung nicht vollständig durchtränkt. [30]

### **Resin Transfer Infusion**

Das Verfahren Resin Transfer Infusion (RTI) ist ein Infusionsverfahren, das zur Herstellung großflächiger Faserverbundstrukturen genutzt wird. Dieses Verfahren wurde von Short Brothers in Belfast entwickelt und 1998 patentiert. [62]

Das Unternehmen hat das Verfahren für die Fertigung der Flügel des Bombardier CSeries Flugzeugs genutzt. Diese Anwendung stellt einen Meilenstein dar, da dies der erste Flieger im regulären Flugbetrieb war, der Flügel aus Faserverbundwerkstoffen aufwies. Nach dem Kauf des Unternehmens durch Airbus ist der Flieger unter dem Namen A220 bekannt. Die Flügel werden immer noch mit dem RTI-Verfahren hergestellt. [38]

Das RTI-Verfahren basiert auf der Formgebung von trockenen Fasergelege zwischen einem rigiden Unterwerkzeug und einem flexiblen Oberwerkzeug mit einer Vakuumdecke. Nach der Positionierung der Preform wird der Aufbau vakuumiert und in einen Autoklav gebracht. In dem Autoklav erfolgt die Injektion des Epoxidharzes. Der entscheidende und namensgebende Prozessschritt erfolgt nach der vollständigen Imprägnierung. Dabei wird der Umgebungsdruck im Autoklav um bis zu 96,5 kPa erhöht wodurch das überschüssige Harz aus den bewusst geschaffenen Fließpfaden herausgedrückt und in die Preform gepresst wird. Dadurch lässt sich der Faservolumenanteil gezielt auf das erforderliche Niveau einstellen. Die Fließpfade selbst werden durch das Zusammenspiel von versteiften und flexiblen Zonen der Vakuumdecke realisiert. [36, 54]

Der Aufbau des RTI-Verfahrens vor der Druckbeaufschlagung durch den Autoklav und währenddessen ist in Abbildung 11 zu sehen.

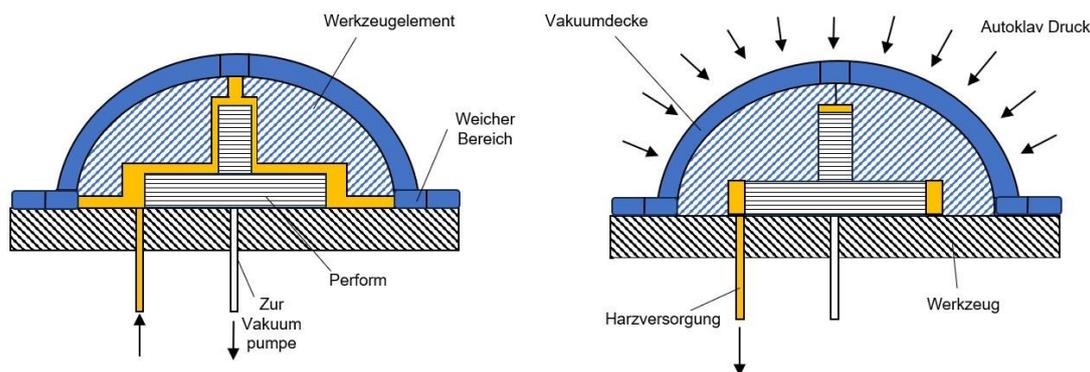


Abbildung 11: RTI Aufbau nach [36]

Ein Vorteil von RTI gegenüber anderen Verfahren ist beispielsweise, dass durch die Nutzung von Non-Crimp Fabrics (NCF) aus CF, anstatt von Prepreg-Lagen, Zeit bei der Ablage gespart wird. Die NFC-Lagen sind zwei bis viermal dicker als Prepreg, so dass die manuelle oder mittels Pick-and-Place-Systemen durchgeführte Ablage beschleunigt wird. Des Weiteren weist der Flügel, welcher mit dem RTI-Verfahren hergestellt wurde eine Gewichtsersparnis von 10 % gegenüber einer konventionellen Aluminiumstruktur dar. [38]

Nachteile des Verfahrens sind die Notwendigkeit des Autoklavs und die Prozesskomplexität. Die Nutzung eines Autoklavs ist mit hohen Investitionskosten und einer limitierten Produktionsrate verbunden. Darüber hinaus erfordert die Steuerung der Harzverteilung eine prozesstechnische Expertise, damit die gewünschte Bauteilqualität reproduzierbar sichergestellt ist. [54]

### 2.3.3. Resin Transfer Molding

Das Resin Transfer Molding (RTM) ist ein Herstellungsverfahren für Faserverbundbauteile, welches sich durch einen geschlossenen Prozessaufbau mit zwei festen Formwerkzeugen auszeichnet. In der Luft- und Raumfahrtindustrie findet das Verfahren Anwendung bei der Fertigung von komplexen, qualitativ hochwertigen Komponenten in der Primär- und Sekundärstruktur, aber auch im Interieur. [24]

Der Prozess lässt sich in vier wesentliche Schritte unterteilen. Zunächst wird trockenes Fasermaterial, typischerweise als vorgefertigte Preform, in die untere Hälfte des vorbereiteten, also gereinigten und mit Trennmittel beschichteten Werkzeugs platziert. Nach dem Schließen der Form wird ein niedrigviskoses Harzsystem, häufig Epoxidharz, über einen Anguss in die Kavität injiziert. Der Injektionsdruck zwingt das Harz, alle Hohlräume der Preform zu füllen, wobei auch Harze mit vergleichsweise hoher Viskosität verwendet werden können. Um die treibende Kraft für die Injektion zu erhöhen und Luftpneinschlüsse zu minimieren, wird an den Entlüftungsöffnungen häufig zusätzlich ein Vakuum angelegt. [30, 50]

Der schematische Ablauf eines RTM-Prozesses ist in Abbildung 12 zu sehen.

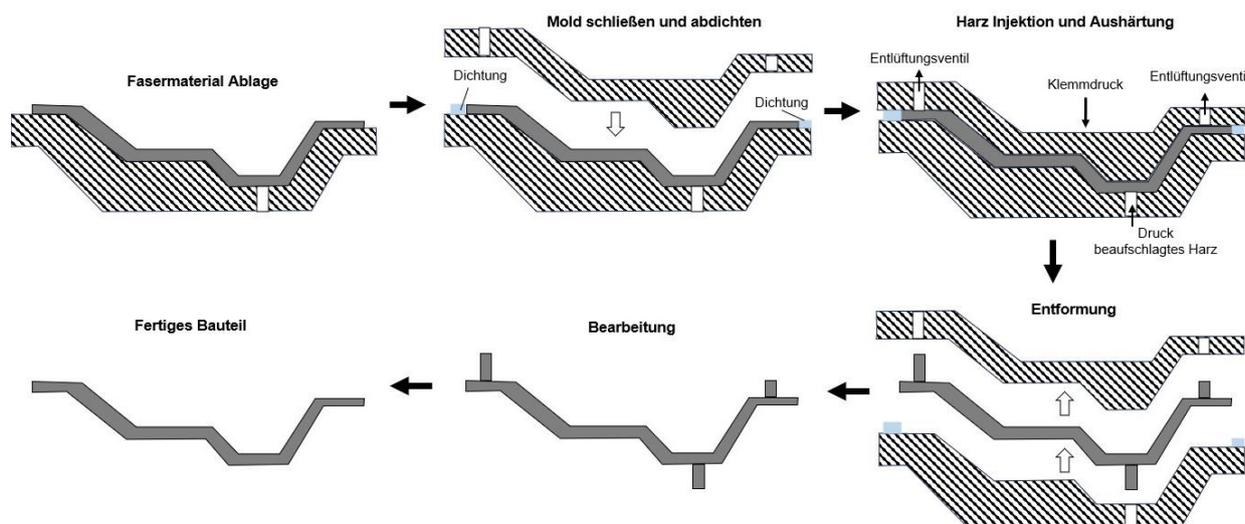


Abbildung 12: Schematischer Prozessablauf des traditionellen RTM-Verfahrens nach [30]

Zu den wesentlichen Vorteilen des RTM-Verfahrens zählen die hohe Reproduzierbarkeit und die Oberflächengüte auf beiden Bauteilseiten, die durch die Verwendung zweier starrer Werkzeughälften erzielt wird. [50]

Das Verfahren ermöglicht die Realisierung hoher Faservolumenanteile von über 60 % und gewährleistet enge Fertigungstoleranzen bezüglich Gewicht, Faservolumenanteil und Bauteilabmaßen. Dies führt zu einer konsistenten Laminatqualität. Darüber hinaus sind die Produktionsraten hoch und eignen sich für Stückzahlen von 100 pro Jahr bis zu 800 pro Tag, was das Verfahren für die Serienproduktion von Luftfahrtkomponenten wie Verkleidungen (Fairings) oder Interieur interessant macht. [4, 56, 66]

Ein weiterer Vorteil liegt in der potenziellen Kostenreduktion, da im Gegensatz zu Prepreg-Verfahren ein teurer Autoklav nicht zwingend erforderlich ist und der Verschnitt von trockenen Halbzeugen kostengünstiger ist als der von vorimprägnierten Materialien. [24, 38]

Die Herausforderungen des RTM-Verfahrens liegen in den signifikanten initialen Investitionskosten für die spezialisierten Werkzeuge und Anlagen, weshalb das Verfahren für Massenproduktionen und weniger für Kleinserien oder Prototypen geeignet ist. Zudem ist der Prozess im Vergleich zu anderen Methoden nicht anpassungsfähig gegenüber Designveränderungen. [66]

### 2.3.4. Prepreg-Verfahren

In der Faserverbundfertigung, insbesondere in der Luftfahrtindustrie, stellen automatisierte Verfahren den Schlüssel zu einer zuverlässigen und effizienten Produktion dar. Zwei der etabliertesten und fortschrittlichsten Technologien zur Verarbeitung von vorimprägnierten Fasern sind das ATL-Verfahren und das AFP-Verfahren. Beide Verfahren legen mit Harz vorimprägnierte Endlosfasern auf eine Formoberfläche ab. Diese computergesteuerten Prozesse haben sich als Standard zur Herstellung großer und

komplexer Luft- und Raumfahrtstrukturen etabliert. Grund dafür sind unter anderem die beschleunigten Produktionszeiten im Vergleich zu manuellen Infusionsverfahren und gleichzeitig der minimierte Materialabfall. [1, 2, 47]

Der Herstellungsprozess folgt trotz der technologischen Unterschiede der beiden Verfahren einem grundlegenden, mehrstufigen Ablauf. Der Kern des Prozesses ist der Legekopf, der von einem Roboter oder einer Portal-Anlage über die Formoberfläche geführt wird. Der Legekopf führt die von gekühlten Spulen oder Kassetten abgewickelten Prepreg-Tapes (ATL) oder -Tows (AFP). Während der Ablage wird das Material durch eine Wärmequelle, wie einem Infrarotstrahler oder einem Laser, erhitzt, um die Klebrigkeit des Harzes zu erhöhen. Gleichzeitig drückt eine Kompaktierrolle das Material fest auf die Form oder die bereits abgelegte Schicht. Dieser Prozessschritt stellt die Haftung sicher und reduziert Lufteinschlüsse zwischen den Lagen. Ein Schneidwerkzeug im Legekopf schneidet das Tape oder die einzelnen Tows am Ende jeder Legebahn präzise ab. Schicht für Schicht wird so das Laminat gemäß der digitalen Bauteildefinition aufgebaut. [9]

Eine schematische Darstellung des ATL-Prozesses ist in Abbildung 13 dargestellt.

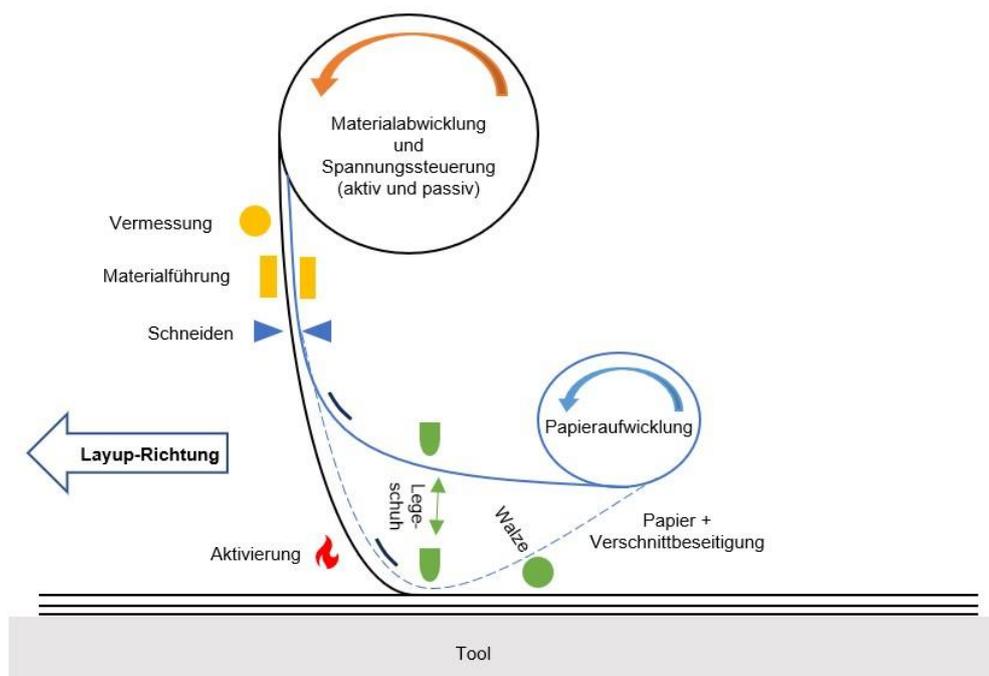


Abbildung 13: ATL-Funktionsprinzip nach [47]

Nach der Ablage wird ein typischer Vakuumaufbau, wie bei dem VARTM, angewendet und der Aufbau evakuiert, um die verbleibenden Lufteinschlüsse zu entfernen und das Laminat durch den atmosphärischen Druck zu kompaktieren. Der finale Schritt ist die Aushärtung des reaktiven Harzsystems in einem Autoklav. [47]

Trotz der prozesstechnischen Ähnlichkeiten weisen ATL und AFP spezifische Merkmale auf, die diese Verfahren für unterschiedliche Anwendungsbereiche prädestinieren. Die grundlegendste Unterscheidung zwischen ATL und AFP basiert auf der Breite

---

des verarbeiteten Prepreg-Materials. Bei dem Automated Tape Laying werden breite Prepreg-Bänder (Tapes), mit einer typischen Breite von 75 mm bis zu 300 mm oder industriell auch 150 mm bis 600 mm verwendet [9, 52]. Im Gegensatz dazu legt eine AFP-Anlage mehrere schmale, einzelne Materialstreifen, sogenannte Tows, simultan ab. Diese Tows haben eine Standardbreite von 3,17 mm bis 12,7 mm [52]. Des Weiteren ist das Funktionsprinzip grundlegend anders, da jedes Tow einzeln und unabhängig gesteuert, zugeführt und geschnitten wird. Dies ermöglicht eine konturnahe Ablage, die sich an die definierte Lagenkontur anpasst. Durch die präzise Steuerung jedes einzelnen Tows wird der Materialabfall im Vergleich zum ATL-Verfahren signifikant reduziert. [47, 52]

Während diese Unterscheidung anhand der Materialbreite lange Zeit als klares Abgrenzungsmerkmal galt, haben stetige Weiterentwicklungen, neue Materialformate, wie breitere Tows, und verbesserte Schneidetechnologien zu einer zunehmenden Vermischung der Konzepte geführt. Die Wahl zwischen ATL und AFP hängt dennoch maßgeblich von der Bauteilgeometrie, der geforderten Produktivität und der Komplexität ab. [47]

ATL ist beispielsweise aufgrund einer geringen Drapierfähigkeit der breiten Bänder für flache oder schwach gekrümmte Bauteile geeignet. Bei stark gekrümmten Bauteilen würde es zu Faltenbildung kommen. Typische Anwendungen sind daher große, geometrisch einfache Strukturen, wie Flügelschalen, Rumpf-Paneele oder Leitwerksbeplankungen. Im Gegensatz dazu bietet AFP durch die Verwendung von schmalen Tows eine deutlich höhere Drapierfähigkeit. Die geringe Breite erlaubt die Herstellung von komplexen 3-D-Formen, was das Verfahren ideal für Bauteile wie Stringer, Spannen oder komplex geformte Rumpfsegmente macht. [47, 52]

Ein Vorteil den ATL gegenüber AFP hat ist die höhere Ablegerate aufgrund der breiten Bänder. Dabei werden bei dem ATL-Verfahren zumeist steife Portalanlagen verwendet, um die hohen Genauigkeitsanforderungen der Luftfahrtindustrie, wie einen maximalen Spalt von 0,1 mm zwischen den abgelegten Bändern, zu erfüllen. Heutzutage liegt die Ablegerate bei ATL bei bis zu 20 kg/h, bei AFP wird eine Rate von 10 kg/h erreicht. Zukünftige Konzepte wie multi-robotische Anlagen, bei denen mehrere Roboter koordiniert an einem Bauteil arbeiten, versprechen eine drastische Steigerung dieser Rate auf bis zu 150 kg/h und ermöglichen zudem eine platzsparende Fertigung in vertikaler Ausrichtung. [76]

Insgesamt erfordern beide Technologien einen signifikanten Kapitalaufwand für die Anlagen und die spezialisierte Ausrüstung. Dies beschränkt ihre Anwendung auf hochwertige Industrien wie die Luft- und Raumfahrt. [1]

### 2.3.5. Pultrusionsverfahren

Das Pultrusionsverfahren ist eines der ältesten und zugleich effizientesten kontinuierlichen Verfahren zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Kunststoffprofilen [47]. Es handelt sich um einen hochautomatisierten Prozess, der die kostengünstige Fertigung von langen, geraden Bauteilen mit konstantem Querschnitt ermöglicht und sich durch einen hohen Automatisierungsgrad sowie geringe Arbeitskosten auszeichnet [74]. Aufgrund seiner Energieeffizienz im Vergleich zu anderen Verfahren, welche beispielsweise den Autoklaven nutzen, stellt es eine wirtschaftliche Alternative dar, insbesondere für Strukturbauteile wie Bodenquerträger oder Stringer in der Luftfahrt [10, 74].

Der Prozess besteht darin, dass trockene Fasern zunächst durch ein Führungssystem geleitet werden, um ihre korrekte Positionierung im späteren Bauteilquerschnitt sicherzustellen. Die Imprägnierung erfolgt entweder mit dem klassischen Offenen Verfahren oder dem Geschlossenen Verfahren. Bei dem offenen Verfahren, welches auch als Harzbad-Tränkung bezeichnet wird, werden die Fasern durch eine offene Wanne mit flüssigem Harz gezogen und vollständig getränkt. Bei dem geschlossenen Verfahren, auch unter der Bezeichnung Injektions-Pultrusion bekannt, treten die trockenen Fasern erst im formgebenden Werkzeug mit dem Harz in Kontakt, welches unter Druck in die geschlossene Kavität injiziert wird. Dieses Verfahren ermöglicht höhere Faservolumenanteile und reduziert die Emission flüchtiger Harzbestandteile. [47]

Nach der Tränkung werden die Fasern durch ein beheiztes, formgebendes Werkzeug gezogen. In diesem Werkzeug wird das Material auf die endgültige Querschnittsform verdichtet, überschüssiges Harz und Lufteinschlüsse werden entfernt und die Aushärtung des Harzes durch Temperaturführung eingeleitet. Die Geometrie des Werkzeugs definiert dabei den finalen Querschnitt des Profils. [74]

Eine kontinuierliche Abzugsvorrichtung zieht das ausgehärtete Profil konstant durch die Anlage. Nach dem Verlassen des Werkzeugs und einer Kühlstrecke wird das Endlosprofil mittels einer mitlaufenden Säge auf die gewünschte Länge zugeschnitten. [50]

Der Pultrusionsprozess ist in Abbildung 14 dargestellt.

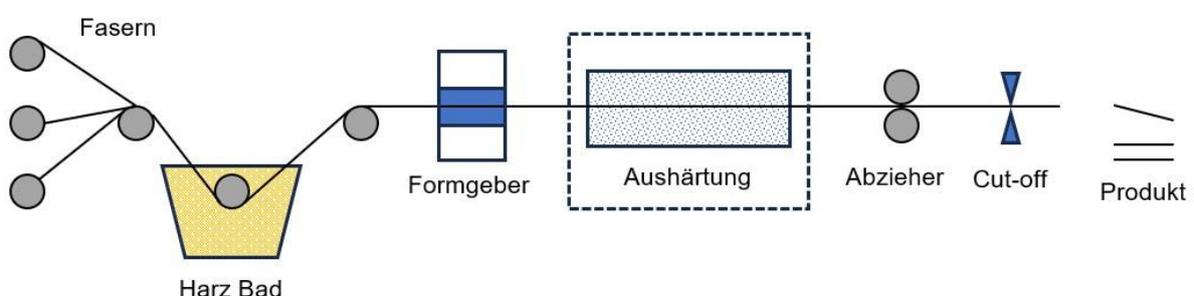


Abbildung 14: Pultrusionsprozess nach [56]

Die Pultrusion ist eine Methode für Bauteile mit konstantem Querschnitt über eine große Länge [56]. Die pultrudierten Profile zeichnen sich durch ein hohes Festigkeits-zu-Gewichts-Verhältnis, Korrosionsbeständigkeit und eine reproduzierbare Qualität

dank des automatisierten Prozesses aus [74]. Während die klassische Pultrusion auf gerade Profile beschränkt ist, gibt es Forschungs- und Entwicklungsanstrengungen, das Verfahren auch für gebogene oder im Querschnitt veränderliche Bauteile nutzbar zu machen, da dies für komplexe Flugzeugstrukturen wie Rumpfspante Kosteneinsparungen ermöglichen würde [10, 47, 74].

### **2.3.6. Wickelverfahren**

Das Wickelverfahren, engl. Filament Winding, ist ein hochautomatisiertes Verfahren zur Herstellung von rotationssymmetrischen, hohlen Faserverbundbauteilen [4, 56]. Das Verfahren hat sich durch den Einsatz von CNC-Steuerungen zu einem präzisen und wiederholgenauen Prozess entwickelt, welches in der Luft- und Raumfahrt vor allem für die Serienfertigung von Strukturbauteilen wie Druckbehältern, Streben und Stangen eingesetzt wird [4, 10].

Das Grundprinzip des Wickelverfahrens besteht darin, kontinuierlich Faserbündel (Rovings) oder vorimprägnierte Bänder unter kontrollierter Spannung auf einen rotierenden Kern, den sogenannten Wickeldorn (engl. Mandrel), aufzubringen [10, 11]. Der Prozess wird durch das synchronisierte Zusammenspiel der Rotation des Dorns und der translatorischen Bewegung der Ablegeeinheit gesteuert. Diese Kinematik ermöglicht die präzise Steuerung des Wickelwinkels zwischen  $0^\circ$  und  $90^\circ$  [35]. Insgesamt wird in drei wesentliche Verfahrensvarianten unterschieden: das Nasswickeln, das Prepreg-Wickeln und das Trockenwickeln [4]. Das Nasswickeln ist das klassische und am weitesten verbreitete Verfahren. Hierbei werden trockene Faserrovings von Spulen abgezogen und unmittelbar vor der Ablage auf den Dorn durch ein temperierbares Harzbad geführt, um die Fasern vollständig zu imprägnieren [4]. Eine ausreichend niedrige Viskosität des Harzes ist hierbei entscheidend für eine vollständige Tränkung [4, 10].

Bei dem Prepreg-Wickeln werden vorimprägnierte Faserbänder verwendet. Dies ermöglicht im Vergleich zum Harzbad eine sauberere Prozessführung und eine hohe Ablegerate von über 100 kg/h [10]. Das Trockenwickeln besteht darin, trockene Fasern ohne Harz auf den Dorn zu wickeln. Der so entstandene trockene Faserwickel dient als Preform, die in einem nachgelagerten Prozessschritt, beispielsweise mittels RTM, mit Harz imprägniert und ausgehärtet wird [50].

Insgesamt erfolgt nach dem Wickelprozess die Aushärtung, welche typischerweise in einem Ofen oder für besondere Qualitätsanforderungen in einem Autoklav stattfindet [10, 11]. Nach dem Aushärten folgt die Entformung, wobei der Wickeldorn, je nach Bauteilkomplexität, wiederverwendbar, zerlegbar, klappbar, ausschmelzbar oder aus einem aufblasbaren elastomeren Bladder ist [4, 35].

Das Wickelverfahren eignet sich hervorragend zur Herstellung von hohlen Bauteilen, wie beispielsweise Druckbehältern für Hydraulik- oder Sauerstoffsysteme oder Strukturstreben und -stangen zur Abstützung der Passagierböden von Flugzeugen oder zur Befestigung von Gepäckfächern [10]. Die wesentlichen Vorteile des Wickelverfahrens

liegen in dem hohen Automatisierungsgrad, der hohen Wiederholgenauigkeit und den damit verbundenen potenziell geringen Material- und Fertigungskosten in der Serienproduktion [50]. Der größte Nachteil, insbesondere im Hinblick auf die Flugzeugherstellung, ist die Beschränkung auf rotationssymmetrische Geometrien, sodass die Anwendung auf andere Flugzeugkomponenten limitiert ist [54]. Forschungen konzentrieren sich daher auf die Steigerung der Ablegerate, die Entwicklung kostengünstiger Hochleistungsmaterialien sowie auf innovative Krafteinleitungskonzepte, die beispielsweise das Energieabsorptionsvermögen von Crash-Strukturen verbessern [10].

## **2.4. Nachhaltigkeitsbewertung**

Die Analyse der Umweltauswirkungen von Produkten und Prozessen erfordert ein fundiertes Verständnis übergeordneter Konzepte wie der Nachhaltigkeit sowie etablierter Bewertungsmethoden. Für eine detaillierte Ökobilanzierung ist es notwendig, einen theoretischen Rahmen zu schaffen, der von der allgemeinen Definition der Nachhaltigkeit bis zur standardisierten Methodik der Ökobilanzierung reicht. Dieser theoretische Rahmen bildet die Grundlage für die vorliegende Arbeit. Daher ist ein vertieftes Verständnis der zugrunde liegenden Konzepte von zentraler Bedeutung.

### **2.4.1. Grundlagen Nachhaltigkeit**

Der Begriff der Nachhaltigkeit, der ursprünglich aus der Forstwirtschaft stammt, beschreibt im Kern ein Handlungsprinzip, bei dem Ressourcen in dem Maße genutzt werden, in welchem die Bedürfnisse gegenwärtiger Generationen befriedigt werden, ohne die Fähigkeit zukünftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen [43, 45]. Dieses als Brundtland-Definition bekannte Leitbild hat sich zu einem vielschichtigen Konzept entwickelt, welches üblicherweise in drei Dimensionen oder Säulen unterteilt wird: Ökologie, Ökonomie und Soziales [7, 43].

Es gibt in der Literatur verschiedene Nachhaltigkeitsmodelle, welche diese Dimensionen unterschiedlich gewichten. Eines der bekanntesten Modelle ist das Drei-Säulen-Modell, das von einer Gleichrangigkeit der drei Dimensionen ausgeht [7]. Dieses Modell zählt zu den Modellen der „schwachen Nachhaltigkeit“ welche davon ausgehen, dass Naturkapital durch Sach- oder Humankapital substituiert werden kann [43].

Ein weiteres Beispiel für diesen Ansatz ist das Nachhaltigkeitsdreieck, bei dem die drei Dimensionen gleichgewichtet sind [43]. Abbildung 15 zeigt die grafischen Darstellungen dieser beiden Modelle.

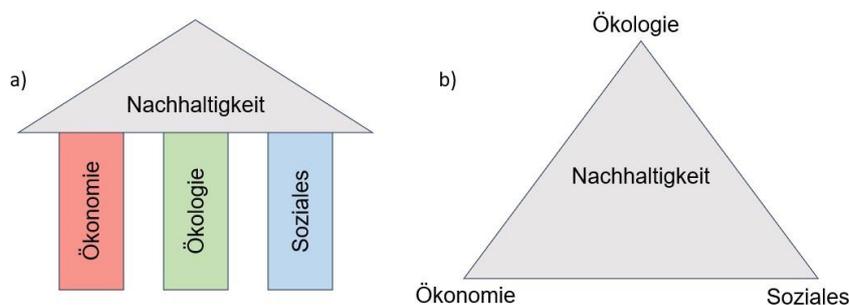


Abbildung 15: a) Säulenmodell und b) Nachhaltigkeitsdreieck nach [43]

Im Gegensatz dazu argumentieren Vertreter der „starken Nachhaltigkeit“, dass die ökologische Dimension die fundamentale Grundlage für jede Form von gesellschaftlicher und wirtschaftlicher Entwicklung darstellt. Ein intaktes Ökosystem kann demnach nicht durch technologischen oder ökonomischen Fortschritt ersetzt werden und das menschliche Leben und Wirtschaften sind von den Ressourcen der Biosphäre abhängig. Diese Hierarchie, in welcher die Ökologie das Fundament bildet, ist für die Bewertung von Umweltauswirkungen von zentraler Bedeutung, da sie verdeutlicht, dass ökonomische und soziale Ziele nur innerhalb der planetaren Belastungsgrenzen verfolgt werden können. Beispielmodelle für diesen Ansatz sind das bekannte gewichtete Säulenmodell und das hierarchische Modell, die in Abbildung 16 schematisch dargestellt sind. [7, 43]

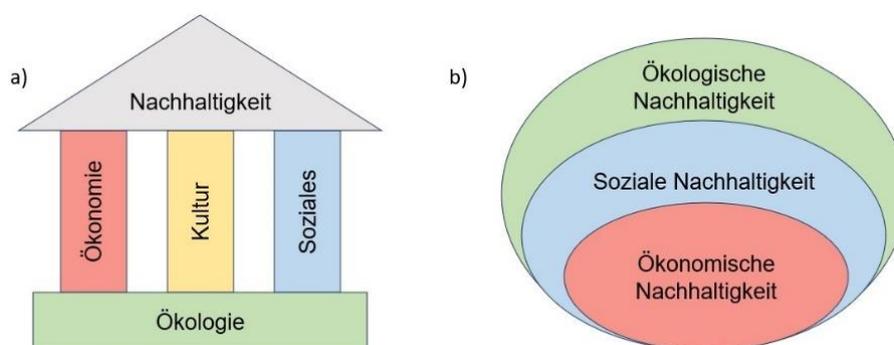


Abbildung 16: a) Gewichtetes Säulenmodell und b) Hierarchisches Modell nach [43]

## 2.4.2. Ökobilanzierung

Um die ökologische Dimension der Nachhaltigkeit systematisch und wissenschaftlich fundiert zu bewerten, hat sich die Methode der Ökobilanzierung etabliert. LCA ist ein zentrales Instrument, um die Umsetzungsstrategien der Nachhaltigkeit mit quantitativen Daten zu untermauern [45]. Die Ökobilanzierung ist eine Methodik zur Zusammenstellung und Beurteilung der Input- und Outputflüsse eines Produktsystems oder einer Dienstleistung und darüber hinaus ein Werkzeug zur Analyse der potenziellen Umweltauswirkungen dieses Produktsystems über dessen gesamten Lebensweg hinweg [16]. Der Lebenswegansatz, bekannt unter dem Ausspruch „von der Wiege bis zur Bahre“, stellt sicher, dass mögliche Problemverlagerungen zwischen den verschiede-

nen Lebensphasen identifiziert und vermieden werden können [67]. Zu diesen Lebensphasen zählen die Rohstoffgewinnung, die Produktion, die Nutzung sowie die Entsorgung beziehungsweise das Recycling und die wieder Einführung in den Produktkreislauf [28, 67]. Es gibt auch Ökobilanzierungen, bei denen ein Teil des Lebenswegs, genannt „von der Wiege bis zum Tor“ (engl. cradle-to-gate), betrachtet wird, sodass die Betrachtung vor der Nutzungsphase aufhört [20]. Insgesamt ist es wichtig zu beachten, dass die Ergebnisse einer Ökobilanzierung die Entscheidungsfindung unterstützen, diese jedoch nicht vollständig ersetzen können, da bei einer vollständigen Betrachtung auch die wirtschaftlichen, sozialen und technischen Aspekte berücksichtigt werden müssen [28].

Die Durchführung einer Ökobilanz ist international durch die Normenreihe ISO 14040 ff. standardisiert. Die ISO 14040 legt die Grundsätze und Rahmenbedingungen fest, während die ISO 14044 die detaillierten Anforderungen und Anleitungen für die einzelnen Phasen spezifiziert. Jede LCA gliedert sich in die vier iterativen Phasen: Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, Sachbilanz, Wirkungsabschätzung sowie die Auswertung. Eine schematische Darstellung der Wechselwirkungen zwischen diesen Phasen sowie direkte Anwendungsbeispiele sind in Abbildung 17 dargestellt. [16–18]

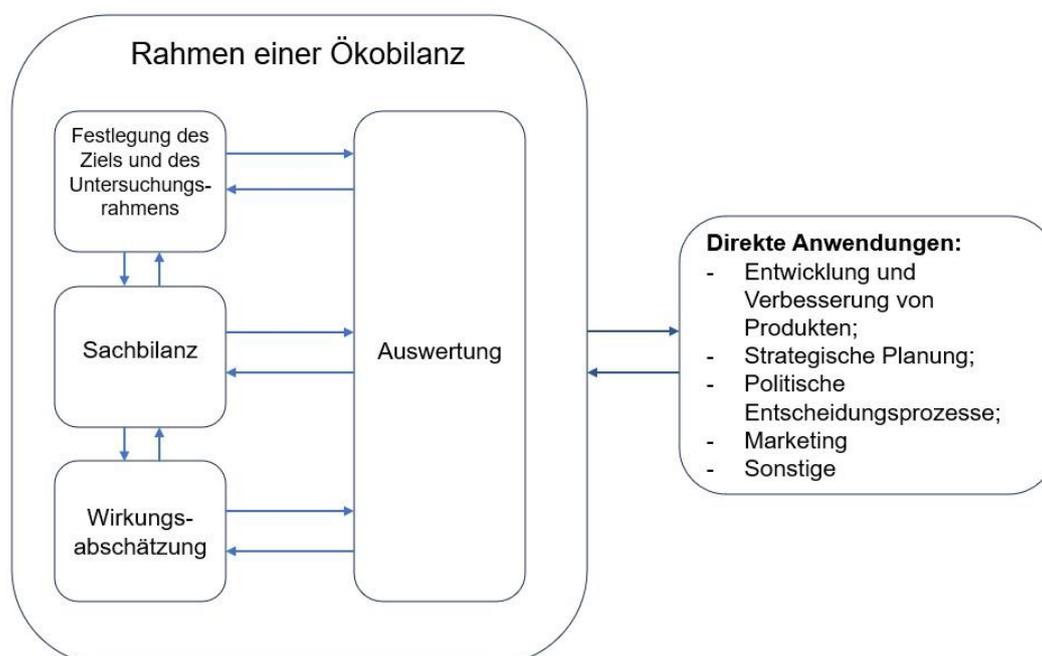


Abbildung 17: Phasen einer Ökobilanz nach [16]

Die erste Phase ist die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens (Goal and Scope Definition) [16]. Diese Phase ist für die Ausrichtung der gesamten Ökobilanz fundamental, da hier der Zweck der Untersuchung, die Zielgruppe und die beabsichtigte Anwendung klar definiert werden [16]. Ein zentrales Element ist die Festlegung der funktionellen Einheit, die den Nutzen eines Produktsystems beschreibt und eine Vergleichsbasis schafft [16]. Die funktionelle Einheit (FE) muss sich auf den quantitativen Nutzen oder eine wirtschaftliche Tätigkeit beziehen, beispielsweise stellt der

Personenkilometer eine funktionelle Einheit dar, um die Umweltauswirkungen unterschiedlicher Transportmittel für den Personenverkehr vergleichbar zu machen [28]. Darauf aufbauend werden die Systemgrenzen definiert. Diese legen fest, welche Prozesse in die Untersuchung einbezogen werden und welche, basierend auf transparenten Abschneidekriterien, vernachlässigt werden [16]. Die getroffenen Annahmen, beispielsweise zur Technologie, zum geografischen Raum und zum Zeitbezug, müssen genau dokumentiert werden, da diese die Ergebnisse maßgeblich beeinflussen [28].

Im nächsten Schritt folgt die Sachbilanz, in der alle relevanten Inputs und Outputs für das definierte Produktsystem erfasst und quantifiziert werden [16]. Bei der Sachbilanz werden die Daten zu sämtlichen Stoff- und Energieflüssen dokumentiert, welche die Systemgrenzen überschreiten und für das Ziel der Ökobilanz relevant sind [16]. Diese Flüsse, auch Elementarflüsse genannt, sind Stoffe oder Energie, die der Umwelt ohne vorherige menschliche Behandlung entnommen oder wieder an die Umwelt abgegeben werden, wie beispielsweise Rohöl aus der Erde oder CO<sub>2</sub>-Emissionen in die Luft [16]. Die Datenerhebung ist die aufwendigste Phase einer Ökobilanz. Dabei ist es entscheidend auf die Qualität der Daten zu achten und zwischen Vordergrunddaten und Hintergrunddaten zu unterscheiden [72]. Die Vordergrunddaten sind prozessspezifische Primärdaten, welche direkt erhoben und örtlich und zeitlich zugeordnet werden können [72]. Bei den Hintergrunddaten handelt es sich um generische Daten aus Datenbanken, welche nicht direkt kontrollierbar sind, aber dennoch einen Einfluss auf das Produktsystem haben, wie beispielsweise die Produktion von Rohmaterial eines Zulieferers [72]. Ein weiteres zentrales Thema ist die Allokation von Prozessen, welche mehrere Produkte gleichzeitig erzeugen. Bei der Allokation werden die Umweltlasten dieser Prozesse nach konkreten Regeln auf die einzelnen Produkte aufgeteilt [18]. Insgesamt ist die Datenqualität für aussagekräftige Ergebnisse von höchster Bedeutung und muss anhand von Kriterien wie Zeitbezug, geografischem Bezug, Technologiebezug und Repräsentativität bewertet und dokumentiert werden [18, 20].

Nach der Sachbilanz folgt die Phase der Wirkungsabschätzung, bei welcher die Listen der Sachbilanzdaten in Indikatoren für potenzielle Umweltauswirkungen übersetzt werden [16]. Dieser Schritt macht die Umweltrelevanz der Elementarflüsse greifbar und folgt einem Grundschema vom Elementarfluss über sogenannte Midpoints (Wirkungskategorien) bis zu den Endpoints (Schutzgüter) [28]. Die Wirkungsabschätzung umfasst dabei folgende Bestandteile: Zuerst erfolgt die Klassifizierung, bei welcher die Sachbilanzergebnisse relevanten Wirkungskategorien, wie dem Klimawandel, der Versauerung, der Humantoxizität usw. zugeordnet werden [17, 28]. Daraufhin folgt die Charakterisierung der Beiträge der einzelnen Stoffe innerhalb einer Wirkungskategorie, indem die Beiträge mithilfe wissenschaftlich fundierter Charakterisierungsfaktoren in Äquivalenzeinheiten umgerechnet und zu einem Wirkungsindikatorwert für jede Kategorie aggregiert werden [17, 28]. Ein Charakterisierungsfaktor ist beispielsweise das Global Warming Potential für Treibhausgase, das in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalente umgerechnet wird [28].

Über diese beiden verbindlichen Bestandteile hinaus gibt es noch weitere Schritte, die je nach Bedarf miteinbezogen werden. Beispielsweise kann eine Normierung erfolgen, wobei die Indikatorwerte mit den Gesamtemissionen einer Region verglichen werden, um die relative Bedeutung abschätzen zu können. Darüber hinaus kann auch eine Gewichtung vorgenommen werden, bei welcher verschiedene Wirkungskategorien zu einem Wert zusammengefasst werden. Dabei ist insbesondere bei einer Gewichtung darauf zu achten, die Zusammenfassung transparent zu gestalten, da diese auf Werturteilen basiert und einen Vergleich erschweren kann. [68]

In der letzten Phase einer Ökobilanzierung, der Auswertung, erfolgt die Interpretation der Ergebnisse aus der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung bezogen auf das zuvor definierte Ziel [18]. Hierbei werden die Ergebnisse analysiert, um signifikante Umweltlasten, Prozesse und Lebensphasen, so genannte „Hotspots“ zu identifizieren [13]. Darüber hinaus werden eine Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfung durchgeführt, um die Stabilität und Robustheit der Ergebnisse zu bewerten [18, 28]. Mit der Sensitivitätsanalyse wird beispielsweise geprüft, wie sich die Ergebnisse verändern, wenn zentrale Annahmen, wie die Allokation, variiert werden. Auf Basis dieser Prüfungen werden Schlussfolgerungen gezogen, Einschränkungen der Studie transparent dargelegt und Empfehlungen für die Zielgruppe formuliert. Die Auswertung ist ein iterativer Prozess, der oft zu einer Anpassung des Untersuchungsrahmens oder der Datenerhebung in früheren Phasen führt [28, 64].

## 2.5. Datengrundlagen und Datenerhebung

Die Aussagekraft und Verlässlichkeit einer Ökobilanz hängen maßgeblich von der Qualität und Transparenz der zugrundeliegenden Sachbilanzdaten ab. Dabei setzt sich jedes modellierte Produktsystem einer Ökobilanz aus einer Vielzahl von Einzelprozessen zusammen, für die Stoff- und Energieflüsse quantifiziert werden müssen. [32]

Die Mehrheit der Prozesse eines Produktsystems beruht auf Hintergrunddaten, sodass Life Cycle Inventory (LCI)-Datenbanken einen erheblichen Einfluss auf die Ergebnisse einer Ökobilanzierung haben [57]. Auf dem Markt existiert eine Reihe von kommerziellen und frei zugänglichen Datenbanken. Einige der bekanntesten Datenbanken sind Ecoinvent, Sphera (ehemals GaBi), U.S. Life Cycle Inventory Database (USLCI) und die European Life Cycle Database (ELCD), welche inzwischen jedoch nicht weitergeführt wird [32, 57]. Diese Datenbanken unterscheiden sich hinsichtlich des Umfangs, der regionalen Abdeckung, der zugrundeliegenden Modellierungsansätze, beispielsweise bei den Allokationsregeln, und des Alters der Datensätze [32]. Studien haben gezeigt, dass die Verwendung unterschiedlicher Datenbanken für dieselbe Produktbilanz zu bedeutsam abweichenden Ergebnissen führt, sodass die Vergleichbarkeit von Ökobilanzen erschwert wird [32, 57].

Sphera ist eine kommerzielle Datenbank welche als eine der Marktführer gilt und insbesondere in der Industrie, wie der Automobilbranche, genutzt wird. Ein Vorteil dieser

Datenbank ist die bevorzugte Verwendung von Primärdaten aus der Industrie [57]. Dennoch sind viele Prozesse in Sphera aggregierte LCI-Ergebnisse, welche sich aus einer Vielzahl von Quellen zusammensetzen. Diese komplexe Quervernetzung und oft unvollständige oder inkonsistente Zitierungen von Quellen machen eine Rückverfolgung der Daten schwierig. In einer Analyse erwiesen sich beispielsweise nur 2 % der untersuchten Prozesse als vollständig quellenzugänglich. [32, 57, 58]

Die ELCD wurde von der Europäischen Kommission 2006 mit dem Ziel initiiert, eine frei zugängliche, ISO-konforme Datengrundlage zu schaffen. Der Umfang der Datenbank ist jedoch im Vergleich zu kommerziellen Anbietern begrenzt. Eine wesentliche Schwäche der ELCD ist die hohe Abhängigkeit von anderen Datenbanken, insbesondere von Sphera. Viele der ELCD-Prozesse verweisen auf Sphera-Daten, welche wiederum kostenpflichtig sind, sodass die Transparenz und Zugänglichkeit der Quellen erheblich eingeschränkt sind. In Untersuchungen konnte für keinen der betrachteten Prozesse eine vollständige Zugänglichkeit der Quellen nachgewiesen werden [32]. Das Projekt der Datenbank wurde zudem nicht mehr weitergeführt. [57]

Die Ecoinvent-Datenbank stammt aus der Schweiz und gilt als eine der weltweit führenden und am weitesten verbreiteten LCI-Datenbanken [57]. Ecoinvent wird von einer breiten wissenschaftlichen Gemeinschaft getragen und ihr größter Vorteil liegt im Modellierungsansatz und der vergleichsweise hohen Transparenz [57]. Die Datenbank basiert auf sogenannten Einheitsprozessen, die kleinstmögliche Prozessschritte abbilden [57]. Dies bietet eine hohe Flexibilität und ermöglicht es dem Anwender, die Prozessketten detailliert nachzuvollziehen und bei Bedarf anzupassen [57]. Zudem legt Ecoinvent großen Wert auf eine transparente Dokumentation, auch wenn nicht jede einzelne Datenquelle vollständig zugänglich ist [32].

Eine zentrale Herausforderung bei der Nutzung von LCI-Datenbanken ist die Transparenz. Die Nachvollziehbarkeit der Daten und deren Qualität ist für die Validität einer Ökobilanz unerlässlich. Untersuchungen zeigen jedoch, dass die heutzutage genutzten Datenbanken dabei deutliche Mängel aufweisen. Die ursprünglichen Quellen der Daten sind nicht immer vollständig dokumentiert, der Zugang kostenpflichtig oder die Quellen sind gar nicht mehr auffindbar, sodass die Überprüfung der Daten erschwert oder sogar unmöglich ist. [32]

## **2.6. Wirkungsabschätzungsmethoden**

Die Wirkungsabschätzung ist ein essenzieller Schritt, um die Vielzahl von Elementarflüssen in eine überschaubare Anzahl von Umweltindikatoren zu überführen und so die ökologische Relevanz eines Produktsystems interpretierbar zu machen. Dies geschieht mithilfe sogenannter Charakterisierungsfaktoren, die einen Elementarfluss in einen Betrag zu einer bestimmten Wirkungskategorie umrechnen. [23]

In den DIN EN ISO 14040/14044 wird keine konkrete Methode für die Wirkungsabschätzung vorgeschrieben, sodass sich im Laufe der Zeit eine Vielzahl verschiedener

---

Methoden etabliert hat. Im Folgenden werden vier Methoden vorgestellt, die in der Industrie und in der Wissenschaft Anwendung finden. Dies soll einen Einblick geben, welche Verfahren heutzutage genutzt werden und die Entscheidungsfindung für die geeignete Methode dieser Arbeit unterstützen.

### **IMPACT 2002+**

Die IMPACT 2002+ Methode stellt einen kombinierten Midpoint-Damage-Ansatz dar. Diese Methode verbindet die Ergebnisse der Sachbilanz über 14 Midpoint-Kategorien mit vier übergeordneten Endpunkt- oder Schutzkategorien (Damage Categories). Dieser Ansatz ermöglicht sowohl eine detaillierte, problemorientierte Analyse auf der Midpoint-Ebene als auch eine aggregierte, schadensorientierte Bewertung auf der Endpunkt-Ebene. [41]

Die vier Schutzkategorien sind die menschliche Gesundheit, Ökosystemqualität, Klimawandel und Ressourcen. Bei der menschlichen Gesundheit wird die Bewertung in DALYs (Disability Adjusted Life Years) vorgenommen, welches ein Maß für die verlorenen Lebensjahre durch Krankheit oder vorzeitigen Tod darstellen. Die Ökosystemqualität wird als potenziell verschwundener Anteil von Arten über eine bestimmte Fläche und Zeit gemessen. Der Klimawandel wird in CO<sub>2</sub>-Äquivalenten ausgedrückt und bei den Ressourcen wird der zusätzliche Energieaufwand gemessen, welcher für die zukünftige Gewinnung von Mineralien und fossilen Brennstoffen benötigt wird. [41]

Ein besonderes Merkmal von IMPACT 2002+ ist die detaillierte und innovative Modellierung der Humantoxizität und Ökotoxizität. Hierfür werden Aufnahmefaktoren für Schadstoffe, Dosis-Wirkung-Beziehungen und die Schwere der gesundheitlichen Auswirkungen berücksichtigt, um sowohl krebserregende als auch nicht krebserregende Effekte zu quantifizieren. [41]

### **IPCC-Methoden zu Klimawirkungsabschätzung**

Im Gegensatz zu umfassenden Multi-Kategorien-Methoden konzentrieren sich die Methoden des Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) ausschließlich auf eine einzige Wirkungskategorie, den Klimawandel. Diese Methoden sind der international anerkannte Standard zur Berechnung des Treibhauspotentials (Global Warming Potential, GWP) und bilden die wissenschaftliche Grundlage für Klimapolitik und -berichterstattung. [29]

Der zentrale Indikator ist das GWP über einen Zeithorizont von 100 Jahren (GWP100), ausgedrückt in kg CO<sub>2</sub>-Äquivalenten. Dieser Faktor gibt an, wie signifikant eine bestimmte Masse eines Treibhausgases im Vergleich zu einer gleichen Masse CO<sub>2</sub> über einen Zeitraum von 100 Jahre zur globalen Erwärmung beiträgt. Die wissenschaftlich konsolidierten Charakterisierungsfaktoren werden in den regelmäßigen Sachstandsberichten des IPCC veröffentlicht, wobei neuere Ökobilanz-Datenbanken wie Ecoinvent die Faktoren des IPCC 2021 implementiert haben. [22]

---

Die in der Ecoinvent-Datenbank implementierten IPCC-Methoden bieten zudem eine differenzierte Betrachtung der Emissionsquellen, indem Sub-Indikatoren für fossile, biogene und landnutzungsbedingte Treibhausgasemissionen bereitstehen. Dies ermöglicht eine detaillierte Analyse der Herkunft der Klimawirkungen eines Produktsystems. [22]

### **ReCiPe**

Die ReCiPe-Methode ist, ähnlich wie IMPACT 2002+, eine harmonisierte Methode, welche sowohl Midpoint- als auch Endpunkt-Indikatoren bereitstellt. Die Methode integriert den problemorientierten Ansatz (Midpoint) der CML-Methode und den schadensorientierten Ansatz (Endpunkt) des Eco-indicator 99. [39]

Die Methode ist um drei Schutzgüter (Areas of Protection) auf der Endpunkt-Ebene strukturiert. Diese sind die menschliche Gesundheit, Ökosysteme und die Ressourcenverfügbarkeit. Dabei ist ein wesentliches Merkmal von ReCiPe die explizite Berücksichtigung unterschiedlicher Wertvorstellungen und Unsicherheiten durch die Bereitstellung von drei kulturellen Perspektiven oder „Archetypen“ für die Gewichtung der Ergebnisse. Dazu zählt die kurzfristige Perspektive, unter dem Namen „Individualist“, bei der nur wissenschaftlich bewiesene Effekte berücksichtigt werden. Die konsensbasierte Perspektive, unter dem Namen „Hierarchist“, beruht auf gängigen politischen und wissenschaftlichen Annahmen. Diese Perspektive ist die Standardeinstellung für die Methode. Die dritte Perspektive, unter dem Namen „Egalitarian“, ist die langfristige Vorsorgeperspektive, bei welcher auch unsichere, aber potenziell schwerwiegende Schäden miteinbezogen werden. Diese Differenzierung in die Perspektiven ermöglicht es dem Anwender, die Sensitivität der Ergebnisse gegenüber unterschiedlichen ethischen und zeitlichen Prioritäten zu analysieren. [29, 39]

### **Environmental Footprint (EF) Methode**

Die Environmental Footprint (EF) Methode (aktuelle Version EF 3.1) wurde von der Europäischen Kommission entwickelt, um eine harmonisierte und vergleichbare Basis für die Umweltbewertung von Produkten und Organisationen im europäischen Binnenmarkt zu schaffen. Diese Methode ist primär eine Midpoint-Methode. [26]

Das Hauptziel der EF-Methode ist nicht die Entwicklung neuer wissenschaftlicher Modelle, sondern die Empfehlung und Standardisierung eines Sets von 16 Wirkungskategorien und der dazugehörigen, als am besten befundenen Charakterisierungsmodelle [15]. Dies soll die Reproduzierbarkeit und Vergleichbarkeit von Ökobilanz-Ergebnissen erhöhen, insbesondere wenn diese für politische Zwecke oder für Umweltkennzeichnungen von Produkten verwendet werden [26]. Die Methode gibt klare Vorgaben für die Modellierung und Berechnung vor, um die Konsistenz zwischen verschiedenen Studien zu gewährleisten [26]. Die 16 Wirkungsindikatoren sind in Tabelle 1 aufgelistet und beschrieben.

Tabelle 1: Wirkungskategorien des EF 3.1 nach [15]

Wirkungskategorie	Abkürzung	Einheit	Beschreibung
Acidification (Versauerung)	AP	mol H <sup>+</sup> -Äq.	Zunahme des Säuregehalts in Luft, Gewässern und Böden, durch Emissionen., insbesondere durch Verbrennungsprozesse verursacht.
Climate Change (Klimawandel)	GWP100	kg CO <sub>2</sub> -Äq.	Erhöhung der weltweiten Durchschnittstemperatur durch den Ausstoß von Treibhausgasen.
Ecotoxicity, freshwater (Ökotoxizität, Süßwasser)	FET	CTUe	Schädliche Einwirkungen von Giftstoffen auf Süßwasserökosysteme.
Resource use, fossil (Ressourcennutzung, fossile Rohstoffe)	ADP fossil	MJ	Verbrauch von endlichen, fossilen Energieträgern.
Eutrophication: Freshwater (Eutrophierung Süßwasser)	FEP	kg P-Äq.	Anreicherung von Süßwasserökosystemen mit Nährstoffen, insbesondere Stickstoff und Phosphor, welche das ökologische Gleichgewicht stören.
Eutrophication: Marine (Eutrophierung Marin)	MEP	kg N-Äq.	Anreicherung von Ökosystemen mit Nährstoffen, insbesondere Stickstoff und Phosphor, die das ökologische Gleichgewicht stören.
Eutrophication: Terrestrial (Eutrophierung terrestrisch)	TEP	Mol N-Äq.	Anreicherung von terrestrischen Ökosystemen mit Nährstoffen, insbesondere Stickstoff und Phosphor, die das ökologische Gleichgewicht stören.
Human toxicity, carcinogenic (Humantoxizität, krebserregend)	HTOXc	CTUh	Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit durch die Aufnahme von Stoffen aus Luft, Wasser und Boden.
Human toxicity, non-carcinogenic (Humantoxizität, nicht krebserregend)	HTOXnc	CTUh	Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit durch die Aufnahme von Stoffen aus Luft, Wasser und Boden.
Ionising radiation, human health (Ionisierende Strahlung,	IRP	kBq U-235-Äq.	Gesundheitliche Konsequenzen, die aus der Einwirkung von ionisierender

menschliche Gesundheit)			Strahlung auf den menschlichen Organismus resultieren.
Land Use (Landnutzung)	LU	dimensionslos	Umgestaltung von Flächen für Zwecke wie Landwirtschaft, Infrastruktur oder Siedlungen.
Resource use: minerals and metals (Ressourcennutzung, Mineralien und Metalle)	ADP-Elements	kg Sb-Äq.	Verbrauch von endlichen, nicht erneuerbaren Rohstoffen, was deren Verfügbarkeit für nachfolgende Generationen einschränkt.
Ozone depletion (Ozonabbau)	ODP	kg FCKW-11-Äq.	Schädigung und Abbau der Ozonschicht in der Stratosphäre.
Particulate matter (Feinstaub)	PMF	Krankheitshäufigkeit	Auswirkungen auf die menschliche Gesundheit durch Feinstaubemissionen und deren Vorläuferstoffe (z.B. Schwefel- und Stickoxide).
Photochemical ozone formation, human health (Photochemische Ozonbildung, menschliche Gesundheit)	POCP	kg NMVOC-Äq.	Potenzial der Bildung von schädlichem troposphärischem Ozon aus Luftemissionen.
Water use (Wassernutzung)	Water	m <sup>3</sup> Welt-Äq.	Verbrauch von Wasserressourcen unter Berücksichtigung der regionalen Verfügbarkeit.

Neben den hier beschriebenen Ansätzen existiert eine Vielzahl weiterer LCIA-Methoden, welche in der Praxis Anwendung finden. Dazu gehören beispielsweise die primär in den USA entwickelte TRACI-Methode (Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and other environmental Impacts) oder die auf toxikologische Bewertungen spezialisierte USEtox-Methode, die beide ebenfalls in gängigen Datenbanken implementiert sind [23]. Die Auswahl der Methode hängt letztlich von den Zielen der Studie, der geografischen Region und den spezifischen Umweltaspekten ab, die im Fokus der Untersuchung stehen.

## 2.7. LCA Software Tools

Die Durchführung einer Ökobilanzierung ist ein datenintensiver und methodisch komplexer Prozess. Um die großen Datenmengen zu verwalten, Produktsysteme zu modellieren und die Wirkungsabschätzung zu berechnen, ist der Einsatz spezialisierter Software-Tools unerlässlich. Der Markt bietet eine Vielzahl von Lösungen, welche sich in der Funktionalität, der Benutzerfreundlichkeit, dem Datenbankzugang und der zugrundeliegenden Philosophie unterscheiden. Die Wahl des Software-Tools ist dabei

---

nicht trivial, da wissenschaftliche Studien darlegen, dass die Ergebnisse und damit die Schlussfolgerungen einer Ökobilanz maßgeblich von den Software-Tools beeinflusst werden [3, 48]. Im Folgenden werden einige der führenden Software-Lösungen vorgestellt und ihre charakteristischen Merkmale sowie Vor- und Nachteile erörtert, um die Wahl der Software für die vorliegende Arbeit zu unterstützen.

Untersuchungen haben gezeigt, dass die Anwendung verschiedener Software-Tools auf identischen Produktsysteme zu abweichenden Ergebnissen führt. Diese Diskrepanzen sind nicht zwangsläufig auf Fehler in der Software zurückzuführen, sondern resultieren aus einer Kombination von Faktoren, die in der Konzeption und Implementierung der Software begründet sind. [48]

Beispielsweise verfügt jede Software über spezifische Voreinstellungen, zum Beispiel für Allokationsregeln oder Systemgrenzen, welche das Modellergebnis beeinflussen, wenn diese vom Nutzer nicht aktiv angepasst werden. Des Weiteren kann die Art und Weise, wie die Sachbilanzdatenbanken oder Wirkungsabschätzungsmethoden in die Software integriert werden, variieren. Dies betrifft die Zuordnung von Elementarflüssen zu Wirkungskategorien oder die Handhabung von regionalen Unterschieden. Insgesamt werden kommerzielle Software-Tools von Anwendern als „Black-Box“ gesehen, bei der interne Berechnungsalgorithmen und Standardannahmen nicht vollständig transparent sind. Dies erschwert die Nachvollziehbarkeit und Reproduzierbarkeit der Ergebnisse. [48]

Zu den gängigen Software-Tools zählen Sphera (LCA for Experts), SimaPro, Umberto und openLCA. Sphera, vertrieben von dem gleichnamigen Unternehmen, ist eine der führenden kommerziellen LCA-Softwarelösungen und findet breite Anwendung in der Industrie, insbesondere im Automobil- und Ingenieursektor. Diese Software zeichnet sich durch eine prozessorientierte Modellierungsphilosophie aus und wird mit einer umfangreichen, professionellen Sachbilanzdatenbank geliefert. Sphera ermöglicht eine detaillierte Prozessanalyse und weist robuste Modellierungsfähigkeiten auf. SimaPro von PRé Sustainability ist ebenfalls eine weit verbreitete kommerzielle Software, die für ihre Benutzerfreundlichkeit und eine Integration mit der Ecoinvent-Datenbank bekannt ist. SimaPro wird in der Wissenschaft und der Beratung eingesetzt und bietet eine Palette an implementierten Wirkungsabschätzungsmethoden. Die Software Umberto wurde vom Institut ifu Hamburg entwickelt, welches 2018 von der iPoint-Gruppe übernommen wurde. Diese Software setzt den Fokus auf die Modellierung und Visualisierung von Stoff- und Energieflüssen. Ein charakteristisches Merkmal ist die Darstellung von Produktsystemen mittels Sankey-Diagrammen, wodurch Umberto insbesondere für die Analyse von Ressourceneffizienz und die Optimierung von Produktionsprozessen interessant ist. Im Gegensatz zu den genannten Software-Tools ist openLCA, entwickelt von GreenDelta, eine kostenlose und Open-Source Software. Der Open-Source-Charakter fördert ein hohes Maß an Transparenz und Zugänglichkeit für Anwender. Die Software ist flexibel und unterstützt eine Vielzahl von Datenbanken und

---

Methoden, sodass openLCA sowohl in der Lehre als auch in der Forschung eingesetzt wird. Die offene Architektur ermöglicht es zudem, eigene Erweiterungen zu entwickeln. [3]

Eine besondere Stellung im Bereich der Open-Source-Software nimmt das Brightway-Framework ein. Im Gegensatz zu den anderen genannten Softwarelösungen ist Brightway keine monolithische Software mit einer festen grafischen Benutzeroberfläche, sondern ein leistungsstarkes, modulares Framework, das auf der Programmiersprache Python basiert. Diese Architektur bietet ein Höchstmaß an Flexibilität, Skalierbarkeit und Transparenz. Brightway ist speziell für fortgeschrittene und forschungsorientierte Ökobilanzierungen konzipiert und eignet sich für komplexe Aufgaben, wie umfangreiche Szenarioanalysen, Entwicklungen neuer LCIA-Methoden oder die Integration von Ökobilanzen mit anderen Modellen. Um die Funktionen von Brightway auch für Anwender ohne tiefgehende Programmierkenntnisse zugänglich zu machen, wurde der Activity Browser entwickelt. Der Activity Browser ist eine Open-Source-Software, die als grafische Benutzeroberfläche (GUI) auf dem Brightway-Framework aufbaut. Anhand dieser Benutzeroberfläche werden gängige LCA-Aufgaben wie die Verwaltung von Projekten und Datenbanken, die Modellierung von Sachbilanzen und die Analyse von Ergebnissen vereinfacht und intuitiver. Gleichzeitig stellt der Activity Browser die fortschrittlichen Funktionen von Brightway bereit und erleichtert so die LCA-Forschung. [73]

Um die Leistungsfähigkeit von Brightway, insbesondere bei rechenintensiven Analysen wie der Monte-Carlo-Simulation und der globalen Sensitivitätsanalyse, weiter zu steigern, wurde die Python-Bibliothek `lca_algebraic` entwickelt. Diese open-source Bibliothek integriert symbolische Berechnungen in die Ökobilanzierung. Die Bibliothek ist dabei auf die Bibliotheken Brightway2, für die Erstellung von Ökobilanzierungen, und Sympy, eine Bibliothek für symbolische Berechnungen, aufgebaut. Anstatt rein numerischer Werte können mithilfe von `lca_algebraic` Parameter in den Sachbilanzen als algebraische Ausdrücke definiert werden. Die bereitgestellten Funktionen nutzen diese parametrisierten Modelle, um die Berechnungen der Umweltauswirkungen erheblich zu beschleunigen, indem die Berechnungen der Hintergrundaktivitäten faktorisiert werden. Diese enorme Effizienzsteigerung ermöglicht es, in kurzer Zeit eine sehr große Anzahl an Simulationen durchzuführen, was die Anwendung fortgeschrittener statistischer Methoden, wie die Berechnung von Sobol-Indizes zur Quantifizierung von Parameterunsicherheiten, in der Praxis handbarer macht. Die Kombination aus dem flexiblen Brightway-Framework, der benutzerfreundlichen Oberfläche des Activity Browser und der Rechenleistung von `lca_algebraic` stellt somit ein besonders leistungsfähiges System für transparente und tiefgreifende Ökobilanzstudie dar. [40]

Insgesamt lässt sich festhalten, dass die diversen LCA-Softwares für unterschiedliche Anforderungen passende Lösungen bieten. Während kommerzielle Softwarelösungen wie Sphera, SimaPro und Umberto durch umfangreichen Support und integrierte Da-

---

tenbanken überzeugen, bieten Open-Source-Lösungen wie openLCA und insbesondere das Brightway-Framework ein hohes Maß an Transparenz, Flexibilität und Erweiterbarkeit.

## 2.8. Charakterisierung und Quantifizierung von Unsicherheiten

Die Ergebnisse von Ökobilanzierungen dienen zunehmend als Grundlage für weitreichende Entscheidungen in Politik und Wissenschaft. Dies stellt hohe Anforderungen an die Robustheit, Transparenz und Verlässlichkeit der Ergebnisse. Jede Ökobilanz unterliegt jedoch Unsicherheiten, welche aus Datenvariabilität, Modellierungsentscheidungen und Annahmen über Szenarien resultieren. In der Ökobilanzierung werden Ergebnisse oft als deterministische Einzelwerte dargestellt, ohne die zugrundeliegenden Unsicherheiten explizit zu quantifizieren. Mit dem wachsenden Anspruch, Ökobilanzen für vergleichende Aussagen zu nutzen, hat die systematische Analyse von Unsicherheiten und der Sensitivität der Ergebnisse gegenüber den Eingangsdaten an Bedeutung gewonnen. Die Quantifizierung von Unsicherheiten ist entscheidend, um die statistische Signifikanz von Unterschieden zwischen zwei Systemen zu beurteilen und die Verlässlichkeit von Schlussfolgerungen zu stützen. [51]

In der LCA-Methodik gibt es keine universell anerkannte, einheitliche Methode zur Unsicherheitsanalyse. Aus diesem Grund existiert eine Vielzahl von Ansätzen, welche auf unterschiedlichen Definitionen von Unsicherheit basieren [12]. Grundsätzlich lassen sich Unsicherheiten bei der Ökobilanzierung in die drei Hauptkategorien Parameter-, Model- und Szenariounsicherheit einteilen [58, 70].

Die Parameterunsicherheit bezieht sich auf die Variabilität und Ungenauigkeit der in der Sachbilanz verwendeten Daten. Diese Unsicherheit entsteht durch Messfehler, Extrapolationen, veraltete Daten oder die Verwendung von Durchschnittswerten, welche die Streuung eines Prozesses nicht vollständig abbilden. Die Modellunsicherheit umfasst Unsicherheiten, die durch die Entscheidungen des LCA-Erstellers während der Modellierung entstehen. Dazu zählen die Wahl der Systemgrenzen, Allokationsverfahren für Koppelprodukte oder die Auswahl der Wirkungsabschätzungsmethode. Diese Entscheidungen beeinflussen die Ergebnisse maßgeblich und sind eine Quelle für mangelnde Reproduzierbarkeit zwischen Studien. Die Szenariungenauigkeit tritt insbesondere bei prospektiven Ökobilanzen auf und betrifft Annahmen über zukünftige Entwicklungen. [58, 70]

Zur Quantifizierung der Parameterunsicherheit werden den Eingangsdaten Wahrscheinlichkeitsverteilungen zugeordnet, welche die statistische Streuung beschreiben. Die Wahl der geeigneten Verteilungsfunktion ist ein entscheidender Modellierungsschritt, da die Auswahl die Ergebnisse der Unsicherheitsanalyse maßgeblich beeinflusst [63]. Die Wahl der Verteilung hängt von der Art und Verfügbarkeit der Daten ab. Zu den in LCA am häufigsten verwendeten Verteilungen gehören die Normalverteilung, die Lognormalverteilung, die Dreiecksverteilung und die Gleichverteilung (Uniformverteilung) [5, 63].

Die Normalverteilung (Gauß-Verteilung) ist symmetrisch und wird durch den Mittelwert und die Standardabweichung definiert. Die Normalverteilung eignet sich für Daten, welche um einen zentralen Wert streuen und sowohl positive als auch negative Werte annehmen können. Da jedoch viele physikalische Größen in der Ökobilanzierung naturgemäß keine negativen Werte annehmen, ist die Anwendung der Normalverteilung nicht sinnvoll. In diesen Fällen kommt die Lognormalverteilung zum Einsatz, welche nur für positive Werte definiert ist. Die Lognormalverteilung ist die am häufigsten verwendete Verteilung in LCI-Datenbanken wie Ecoinvent, da diese die Charakteristik vieler umweltrelevanter Parameter gut abbildet. Die Dreiecksverteilung wird durch einen Minimal-, Maximal- und den Modus definiert. Diese Verteilung ist eine pragmatische Wahl, wenn Daten begrenzt sind und hauptsächlich auf Expertenurteilen basieren, da die Dreiecksverteilung eine klare zentrale Tendenz abbildet, ohne umfangreiche statistische Daten zu erfordern. Die Gleichverteilung (Uniformverteilung) nimmt an, dass alle Werte innerhalb eines Intervalls gleich wahrscheinlich sind. Diese Verteilung wird verwendet, wenn nur die Unter- und Obergrenze eines Parameters bekannt sind und keine Informationen über eine zentrale Tendenz vorliegen. Bei der Gleichverteilung liegt somit ein hohes Maß an Unsicherheit, bezüglich des wahren Wertes vor. [5, 40, 58, 63]

Die am weitesten verbreitete Methode zur Propagierung von Parameterunsicherheiten in der Ökobilanzierung ist die Monte-Carlo-Analyse. Bei dieser Methode wird die gesamte Ökobilanz-Berechnung tausendfach wiederholt. In jeder Iteration wird für jeden unsicheren Parameter ein zufälliger Wert aus seiner zuvor definierten Wahrscheinlichkeitsverteilung gezogen. Das Resultat ist eine Ergebnisverteilung, aus welcher statistische Kennzahlen wie der Mittelwert, die Standardabweichung und das Konfidenzintervall abgeleitet werden können. [40, 58]

Zur Visualisierung von Ergebnisverteilungen aus Monte-Carlo-Analysen eignen sich Box-Plots. Anstatt tausende einzelnen Datenpunkte darzustellen, fassen Box Plots die statistischen Haupteigenschaften einer Verteilung grafisch zusammen [60].

Grundsätzlich baut sich ein Boxplot aus der Box, dem Median, den Whiskers und den Ausreißern zusammen. Die Box repräsentiert die mittleren 50 % der Daten und wird durch das untere Quartil (Q1) und das obere Quartil (Q3) begrenzt. Die Spanne zwischen Q1 und Q2 wird als Interquartilsabstand (IQR) bezeichnet und ist ein Maß für die Streuung der Daten. Der Median wird durch einen Strich innerhalb der Box markiert und gibt die Mitte der gesamten Daten an. Die Whisker sind die von der Box ausgehenden Linien. Diese Linien zeigen die Spannweite der Daten außerhalb der zentralen 50 % an. Ihre Länge ist typischerweise auf das 1,5-fache des IQR begrenzt. Datenpunkte, die innerhalb dieser Spanne liegen, werden als Teil der typischen Datenverteilung betrachtet. Datenpunkte, die außerhalb der Whisker liegen, werden als einzelne Punkte dargestellt und als potenzielle Ausreißer identifiziert. [53]

Der grundlegende Aufbau eines Box Plot ist in Abbildung 18 dargestellt. Durch diese Darstellung wird ein schneller visueller Vergleich der Zentraltendenz, Streuung und

Symmetrie verschiedener Ergebnisverteilungen möglich und somit sind Box Plots ein effektives Werkzeug zur Interpretation von wissenschaftlichen Daten [60].

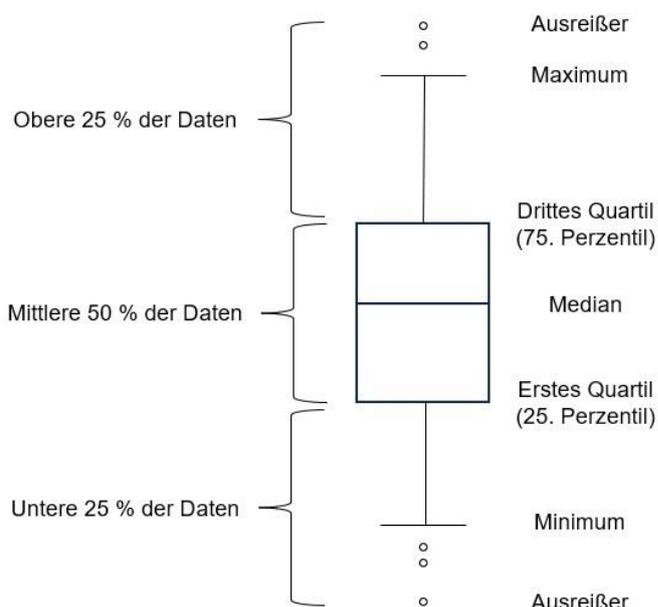


Abbildung 18: Grundlegender Aufbau eines Box Plots nach [53]

Aufgrund der Tatsache, dass für viele Sachbilanzdaten keine empirischen Verteilungen vorliegen, wurde in der Ecoinvent-Datenbank die Pedigree-Matrix entwickelt. Dieser Ansatz ermöglicht eine semiquantitative Schätzung der Unsicherheit. Die Datenqualität wird anhand von qualitativen Indikatoren wie Verlässlichkeit, Vollständigkeit sowie zeitlicher, geografischer und technologischer Repräsentativität bewertet. Jedem Indikatorwert wird ein empirisch abgeleiteter Unsicherheitsfaktor zugeordnet, der zur Berechnung einer Standardabweichung für eine angenommene Lognormalverteilung dient. [14]

Jede LCA-Software liefert Werkzeuge, um Unsicherheiten quantifizieren zu können, wobei sich diese in ihrem Umfang und Methodik unterscheiden. SimaPro liefert beispielsweise eine Szenario Analyse, eine Lokale Sensitivitätsanalyse und die Monte-Carlo-Analyse. Bei Umberto LCA+ sind nur die Szenario Analyse und die Lokale Sensitivitätsanalyse vorhanden. Shpera liefert die selben Werkzeuge wie SimaPro, jedoch nur für Vordergrunddaten. [58]

Neben der Quantifizierung der Ergebnisunsicherheit ist es entscheidend, zu analysieren, welche Parameter den größten Einfluss auf das Ergebnis und dessen Varianz haben. Hier kommt die Sensitivitätsanalyse zum Einsatz, welche untersucht, wie sich Änderungen in den Eingabeparametern auf das Modellergebnis auswirken. Es wird dabei zwischen der lokalen und globalen Sensitivitätsanalyse unterschieden. Die lokale Sensitivitätsanalyse (LSA) variiert jeweils nur einen Parameter, während alle anderen Parameter konstant gehalten werden. Diese Methode ist einfach umzusetzen, vernachlässigt jedoch Interaktionen zwischen den Parametern. Die globale Sensitivi-

---

tätsanalyse (GSA) variiert alle unsicheren Parameter simultan über die gesamte Verteilungsbreite. Diese Methode ist rechenintensiver, ermöglicht aber die Analyse von Wechselwirkungen und nichtlinearen Effekten. [40, 42, 65]

Eine Methode der GSA ist die varianzbasierte Analyse, welche die Ergebnisvarianz auf die einzelnen Eingangsparameter und deren Interaktionen aufschlüsselt. Daraus resultieren die sogenannten Sobol-Indizes. Der First-Order-Index ( $S_i$ ) quantifiziert den direkten Betrag eines Parameters zur Ergebnisvarianz, während der Total-Effect-Index ( $S_{Ti}$ ) dessen direkten Beitrag plus alle Effekte aus seinen Interaktionen mit anderen Parametern erfasst. Die Differenz zwischen  $S_{Ti}$  und  $S_i$  ist ein Maß für die Intensität der Interaktionseffekte. Moderne LCA-Frameworks wie `lca_agebraic` für Brightway erleichtern die Berechnung dieser Indizes erheblich. [40, 65]

### 3. Materialien und Methoden

Das vorliegende Kapitel beschreibt die methodische Vorgehensweise zur Erstellung einer vergleichenden Ökobilanz für verschiedene Herstellungsverfahren zur Produktion der oberen Flügelschale der Interpretation des Airbus A350-1000 mit dem Namen D369. Ziel ist es, die potenziellen Umweltauswirkungen der unterschiedlichen Herstellungsverfahren transparent und nachvollziehbar zu quantifizieren, zu bewerten und zu vergleichen. Zudem wird die Relevanz einer Differenzierung der Herstellungsverfahren im Vergleich zur Nutzung eines generischen Ecoinvent-Datensatzes für die Herstellung von Faserverbundwerkstoffen analysiert. Um die wissenschaftliche Belastbarkeit, Konsistenz und Vergleichbarkeit der Ergebnisse sicherzustellen, orientiert sich die gesamte Untersuchung an den international etablierten Normen DIN EN ISO 14040/14044.

Die nachfolgende Abbildung visualisiert den methodischen Aufbau dieser Arbeit, der sich an den vier Phasen einer Ökobilanzierung orientiert. Zur Vorbereitung erfolgte eine umfassende Recherche zu Faserverbundwerkstoffen und den dazugehörigen Fertigungsverfahren im Flugzeugbau. Auf Basis dieser Wissensgrundlage wurde ein geeignetes Beispielbauteil sowie die zu untersuchenden Herstellungsverfahren identifiziert und ausgewählt. Diese vorbereitenden Schritte waren notwendig, um eine fundierte Zieldefinition für die anschließende Ökobilanzierung zu gewährleisten. Darüber hinaus zeigt die Abbildung, welche spezifischen Werkzeuge und Methoden in den jeweiligen Phasen der Ökobilanzierung zur Anwendung kamen.

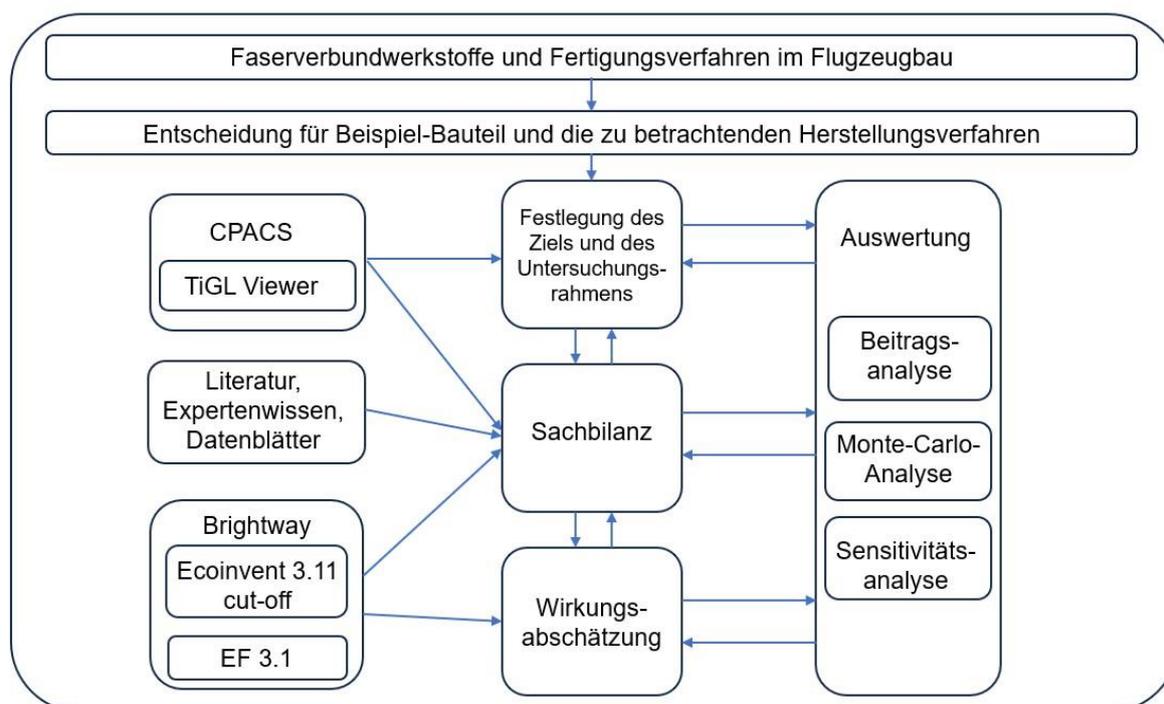


Abbildung 19: Grafische Übersicht der methodischen Vorgehensweise

In den nachfolgenden Abschnitten wird die konkrete Umsetzung der vier Phasen und die spezifischen Werkzeuge und Methoden detailliert erläutert. Zunächst wird in Abschnitt 3.1 der Untersuchungsgegenstand, die Flügelschale mit den zu vergleichenden Herstellungsverfahren, definiert. Darauf aufbauend werden in Abschnitt 3.2 die Zielsetzung der Studie und der Untersuchungsrahmen festgelegt. Abschnitt 3.3 dokumentiert die Datengrundlage und die Modellierung der Sachbilanz, während Abschnitt 3.4 die gewählte Methode zur Wirkungsabschätzung vorstellt. Abschließend werden in Abschnitt 3.5 die methodischen Ansätze zur Auswertung, insbesondere zur Durchführung der Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse, beschrieben, um die Robustheit und Aussagekraft der Ergebnisse zu gewährleisten.

### 3.1. Untersuchungsgegenstand: Obere Flügelschale des D369

Für die detaillierte Untersuchung der Herstellungsverfahren im Rahmen dieser Arbeit wurde als repräsentatives Fallbeispiel die obere Flügelschale des modernen Langstreckenflugzeugs, des D369 [80], ausgewählt. Dieses Bauteil ist aufgrund der Größe und der Fertigung aus hochleistungsfähigen Faserverbundwerkstoffen für die Analyse besonders relevant. Da detaillierte Konstruktionsdaten von Flugzeugherstellern in der Regel nicht öffentlich zugänglich sind, ist für die Analyse eine Annäherung der Geometrie und eine darauf basierende Massenabschätzung erforderlich. Zu diesem Zweck wird eine Methodik auf Basis von Open-Source-Software aus der Luft- und Raumfahrtforschung angewendet.

## Parametrische Datenmodellierung mit CPACS

Die Grundlage für die geometrische Definition der Flügelschale ist das Common Parametric Aircraft Configuration Schema (CPACS). CPACS ist ein am Deutschen Zentrum für Luft- und Raumfahrt (DLR) entwickeltes, XML-basiertes Datenformat, das als „gemeinsame Sprache“ im Flugzeugentwurf dient. Dieses Tool ermöglicht die zentrale Speicherung aller relevanten Daten eines Flugzeugentwurfs in einer hierarchischen Struktur und stellt eine konsistente Informationsquelle für verschiedene disziplinäre Werkzeuge dar. Anstatt auf CAD-Formaten zu basieren, wird eine parametrisierte Beschreibung der Geometrie und der internen Struktur verwendet. [49]

Für diese Arbeit wird der CPACS-Datensatz des D369 verwendet, der die Geometrie des A350-1000 approximiert. Diese Konfiguration stammt aus dem Projekt “Exploration of Electric Aircraft Concepts and Technologies” (EXACT) des DLRs. Im Rahmen von EXACT arbeiten 20 DLR-Institute interdisziplinär zusammen, indem sie verschiedene Technologien analysieren und vergleichen um sie anschließend digital in zukünftige Flugzeugkonfigurationen zu integrieren. Dieses Projekt gilt als die bisher größte und umfassendste Studie des DLRs zur nachhaltigen Luftfahrt. Das übergeordnete Ziel ist es, die Klimaauswirkungen der Luftfahrt signifikant zu reduzieren, ohne die wirtschaftliche Wettbewerbsfähigkeit zu beeinträchtigen. Hierbei wird die gesamte Klimaauswirkung des Flugzeugs während seines gesamten Lebenszyklus betrachtet. [19]

Der D369 ist in Abbildung 20 mit dem TiGL-Viewer dargestellt und die betrachtete Flügelschale ist in rot eingefärbt.



Abbildung 20: Der D369 des CPACS-Datensatzes im TiGL-Viewer

## Geometrieberechnung und Visualisierung mit TiGL

Um aus dem abstrakten CPACS-Datenmodell eine konkrete dreidimensionale Geometrie zu erzeugen, wird die Open-Source-Bibliothek TiGL (Titanium Geometry Library) eingesetzt. TiGL ist eine auf C++ basierende Geometriebibliothek, welche

speziell dafür entwickelt wurde, parametrische CPACS-Beschreibungen in vollwertige 3D-Modelle zu überführen. Die Software nutzt mathematische Verfahren, um die komplexen, gekrümmten Oberflächen von Flugzeugkomponenten wie Flügel und Rumpf präzise zu generieren. Zur visuellen Überprüfung und Analyse des aus der CPACS-Datei generierten Flugzeugmodells wird der TiGL-Viewer verwendet. Diese Anwendung bietet eine grafische Benutzeroberfläche, welche es ermöglicht, das 3D-Modell zu laden und geometrische Eigenschaften zu analysieren. [71]

Mithilfe dieser Werkzeuge wird der Flügel samt der Flügelbox aus dem Gesamtflugzeugmodell extrahiert. Die Abbildung 21 und die Abbildung 22 zeigen die Geometrie des Flügels aus dem TiGL-Viewer mit absoluten Koordinaten in Metern. Gemäß den CPACS-Daten beträgt die Fläche der Flügeloberschale  $\blacksquare$  m<sup>2</sup> bei einer Masse von  $\blacksquare$  kg. Für die weitere Betrachtung wird die Flügeloberschale als reines Kohlenstofffaserverbundbauteil mit einer Epoxidharzmatrix angenommen. In Anlehnung an gängige Literaturwerte für Prepreg- und Infusionsverfahren wird ein Faservolumengehalt von 60 % festgelegt [4, 47].

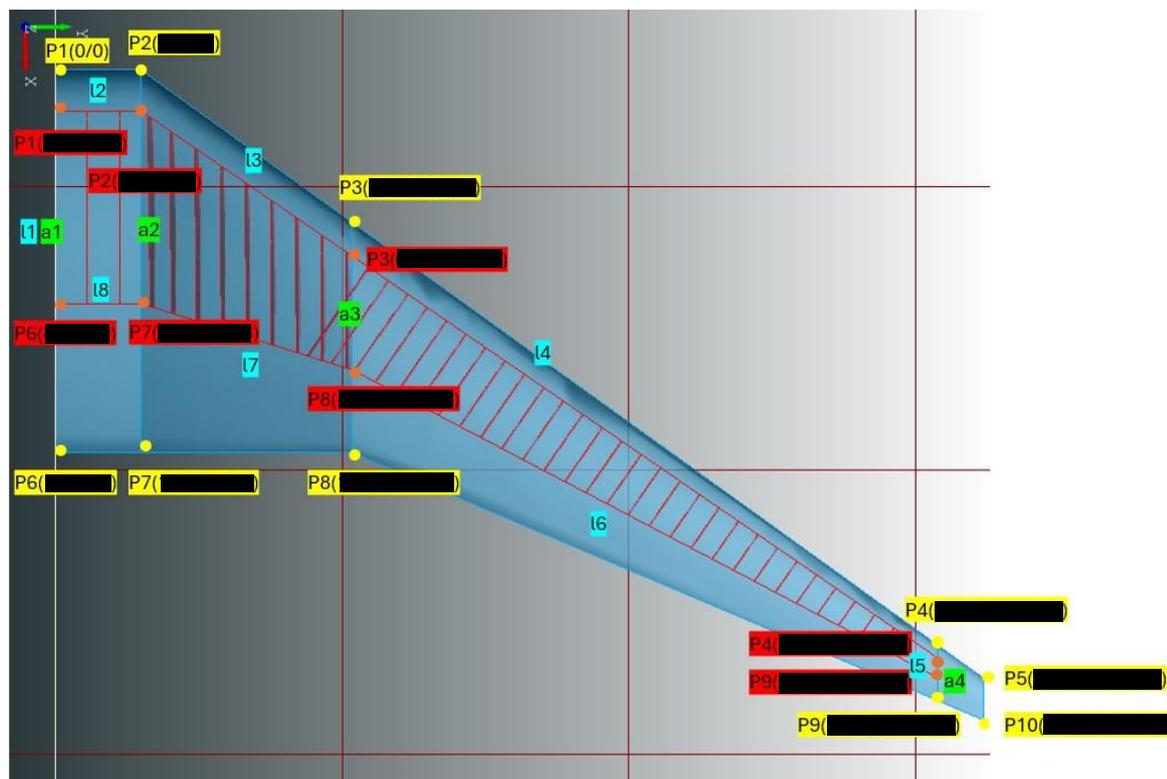


Abbildung 21: TiGL-Viewer Draufsicht des Flügels mit Abmaßen in m

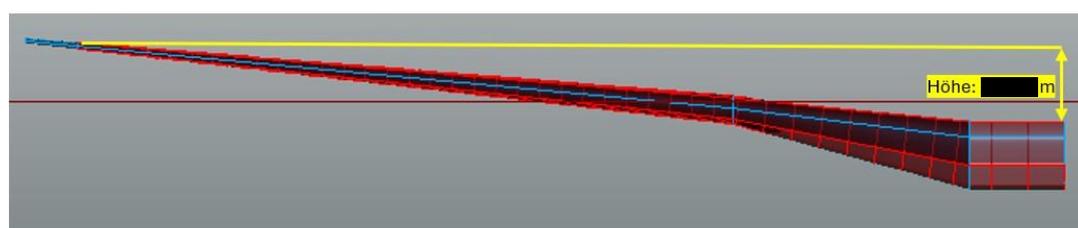


Abbildung 22: TiGL-Viewer Seitenansicht des Flügels mit Abmaßen in m

---

Anhand der geometrischen Daten aus dem TiGL-Viewer und unter Anwendung des Satzes des Pythagoras wird der Umfang der oberen Flügelschale zu 78,06 m berechnet.

### **3.2. Phase 1: Ziel und Untersuchungsrahmen**

Das primäre Ziel dieser Masterarbeit ist die vergleichende ökologische Bewertung von fünf unterschiedlichen Herstellungsverfahren für eine definierte Flügelschale aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff. Die aktuelle Datenlage für Verbundwerkstoffe in der Luftfahrt ist limitiert und weist kaum eine fundierte Differenzierung zwischen den einzelnen Fertigungstechnologien auf. Der Fokus dieser Untersuchung liegt daher auf der detaillierten Analyse und dem Vergleich der jeweiligen Kernprozesse. Dadurch sollen nicht nur die prozessspezifischen Unterschiede herausgearbeitet, sondern auch die Relevanz einer verfahrensspezifischen Differenzierung für die Ökobilanzierung belegt werden.

Die Studie verfolgt dabei folgende Kernziele:

- Quantifizierung der Umweltauswirkungen für jedes Herstellungsverfahren über ausgewählte Wirkungskategorien.
- Identifikation von ökologischen Hotspots, das heißt derjenigen Prozessschritte, Materialien oder Energieflüsse, die maßgeblich zu den Umweltauswirkungen beitragen.
- Aufzeigen von relativen ökologischen Vor- und Nachteilen der Verfahren im direkten Vergleich, um eine fundierte Grundlage für technologische und strategische Entscheidungen zu schaffen und die Notwendigkeit der Differenzierung zwischen den Herstellungsverfahren zu belegen.
- Bewertung der Robustheit der Ergebnisse und der zugrundeliegenden Datenunsicherheiten mittels einer Sensitivitäts- und Unsicherheitsanalyse, um die Verlässlichkeit der gezogenen Schlussfolgerungen zu untermauern.

Als Herstellungsverfahren für den Vergleich werden ATL/AFP, RTI, RTM, VAP und VARTM herangezogen, die in Kapitel 2.3 detailliert beschrieben sind. Die Verfahren ATL und AFP werden hierbei zusammengefasst betrachtet, da der wesentliche Unterschied in der Ablagebreite liegt. Aus diesem Grund wird für die Analyse ein Mittelwert für die Ablagebreite verwendet.

#### **Funktionelle Einheit**

Um faire und aussagekräftige Vergleichbarkeit der unterschiedlichen Herstellungsverfahren zu gewährleisten, müssen alle Input- und Output-Flüsse auf eine klar definierte Referenzgröße bezogen werden.

Die FE ist für diese Studie definiert als:

Die Herstellung einer CFK-Flügelschale des D369 mit einer definierten Masse von ■■■ kg, einer Fläche von ■■■ m<sup>2</sup> und einem Faser-Volumenanteil von 60 % in dem Betrachtungszeitraum „cradle-to-gate“.

Die Festlegung einer einheitlichen Masse und eines festen Faser-Volumenanteils für alle fünf Herstellungsverfahren stellt eine notwendige Vereinfachung für die Vergleichbarkeit dar. Diese Annahme impliziert jedoch, dass verfahrensspezifische Unterschiede im realisierbaren Faservolumengehalt und deren daraus resultierende Auswirkung auf die Ökobilanzierung in der vorliegenden Analyse nicht berücksichtigt werden.

### Systemgrenzen

Die Analyse folgt dem „cradle-to-gate“-Ansatz. Die Systemgrenzen umfassen somit die Prozesse von der Rohstoffgewinnung bis zur Bereitstellung der fertigen, aber nicht montierten Flügelschale. Die Phasen der Nutzung und des End-of-Life werden bewusst von der Betrachtung ausgeschlossen, um den Fokus auf die Fertigungstechnologien zu legen.

Das System lässt sich in das Hintergrund- und das Vordergrundsystem unterteilen. Das Hintergrundsystem umfasst alle vorgelagerten Prozesse, deren Daten aus Sekundärquellen stammen. Dazu zählen insbesondere die Gewinnung von Rohstoffen, die Herstellung der Carbonfasern und des Epoxidharzes sowie die Bereitstellung aller benötigten Energieträger. Für die Modellierung dieser Prozesse wird auf die Ökobilanz-Datenbank Ecoinvent (Version 3.11 cut-off) zurückgegriffen. Eine detaillierte Primärdatenerhebung für diese Vorketten findet im Rahmen dieser Arbeit nicht statt. Das Vordergrundsystem ist der zentrale Untersuchungsgegenstand dieser Arbeit. Hier werden die Herstellungsverfahren der Flügelschale mit Primär- und spezifischen Sekundärdaten modelliert. Die Prozesskette für jedes Verfahren wurde dabei in fünf identische Hauptprozessblöcke unterteilt, um eine strukturierte Analyse zu ermöglichen. Diese Blöcke beinhalten die Vorbereitung, den Ablageprozess, den Prozessaufbau, die Aushärtung und die Entformung. Insgesamt werden in den Prozessen die Herstellung von Kapitalgütern, wie Gebäude und Werkzeuge, sowie geringfügige Verbrauchsgegenstände, wie Schutzhandschuhe, Klemmen und Schläuche, von der Analyse ausgeschlossen, aufgrund ihres erwartbar geringen Beitrags zum Gesamtergebnis. Eine grafische Darstellung der allgemeinen Prozesskette zur Herstellung der Flügelschale ist in Abbildung 23 abgebildet.

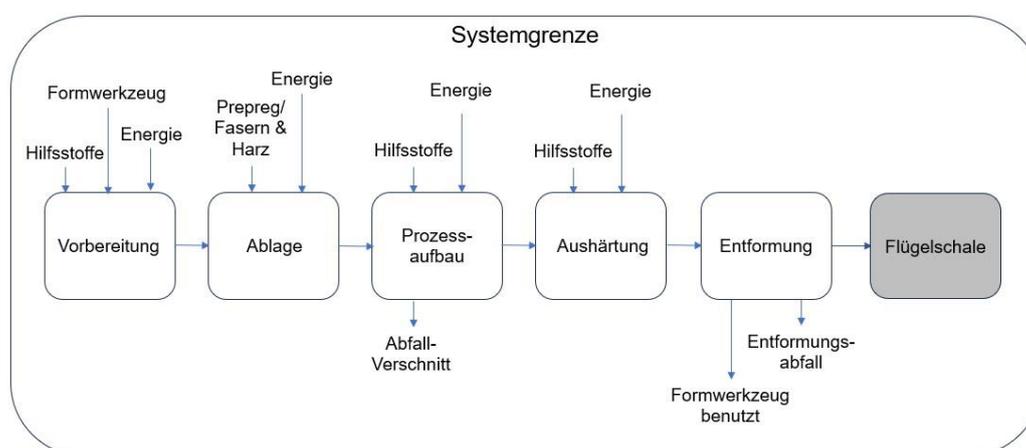


Abbildung 23: Prozesskette zur Herstellung der Flügelschale

---

Die als „Hilfsstoffe“ deklarierten Input in der Abbildung repräsentieren verschiedene LCIs für prozessnotwendige Hilfsmaterialien, wie beispielsweise Trennmittel, Entlüftungsvlies oder Dichtungsband. Der Input „Energie“ fasst jene LCIs zusammen, bei welchen ein Energieaufwand entsteht. Hierzu zählen unter anderem der Energieverbrauch bei der Aushärtung im Ofen oder im Autoklav sowie die automatisierte Ablage von Prepreg durch einen Roboter. Eine detaillierte Aufschlüsselung der spezifischen Sachbilanzdatensätze für jedes Herstellungsverfahren erfolgt in Abschnitt 3.3.

### **Annahmen und Limitationen**

Die Aussagekraft der in dieser Arbeit vorgenommenen Ökobilanzierung unterliegt bestimmten Annahmen und Limitationen die hier transparent dargestellt werden. Die zentrale Annahme ist, dass alle betrachteten Herstellungsverfahren zu einer Flügelchale mit identischer Masse und identischem Faservolumenanteil führen.

Die Vereinfachung, für jedes Verfahren dieselbe Masse und denselben Faservolumenanteil anzunehmen, wurde bewusst getroffen, um die Vergleichbarkeit der Prozesseffizienz des Bauteils in den Vordergrund zu stellen und nicht die Bauteilperformance. Des Weiteren ist zu berücksichtigen, dass die Genauigkeit der Ergebnisse direkt von der Qualität der verwendeten Daten abhängig ist, insbesondere von den Sekundärdaten aus der Ecoinvent-Datenbank für die Vorketten. Darüber hinaus wird die Produktion innerhalb von Europa angenommen, was insbesondere den Strommix für die energieintensiven Prozesse festlegt.

### **3.3. Phase 2: Sachbilanz**

In der Phase der Sachbilanz werden gemäß DIN EN ISO 14044 alle relevanten Input- und Outputflüsse des untersuchten Systems für die definierte funktionelle Einheit quantifiziert. Dies umfasst die Erfassung von Rohstoffen, Hilfsstoffen, Energieverbräuchen sowie der entstehenden Abfälle und Emissionen über den gesamten Betrachtungszeitraum.

Die Sachbilanz der in dieser Arbeit untersuchten Herstellungsverfahren zu der Produktion der Flügeloberchale wurde durch eine Kombination aus Vordergrund- und Hintergrunddaten erstellt. Die Hintergrunddaten für alle vor- und nachgelagerten Prozesse, wie die Bereitstellung von Strom und Wärme, den Transport von Materialien oder die Herstellung von Harzen und Hilfsstoffen, wurden vollständig der Datenbank Ecoinvent (Version 3.11cut-off) entnommen. Die für die Materialien und Energieverbräuche genutzten Ecoinvent-Datensätze sind im Anhang 8.2 aufgelistet. Die Vordergrunddaten, also die spezifischen Stoff- und Energieverbräuche sowie die Emissionen der eigentlichen Herstellungsverfahren wurden durch eine umfassende Literaturrecherche, Herstellerangaben und aus Gesprächen mit Fachexperten des DLRs ermittelt. Diese Primär- und Sekundärdaten wurden anschließend in der Ökobilanz-Software Brightway mit den Hintergrundprozessen aus der Ecoinvent-Datenbank zu einem vollständigen Produktsystem für jedes Herstellungsverfahren verknüpft.

Der Fokus der Datenerhebung lag auf der detaillierten Modellierung der fünf zu vergleichenden Herstellungsverfahren. Tabelle 2 gibt einen vergleichenden Überblick über die wesentlichen Material- und Energie-Inputs, die für die jeweiligen Verfahren charakteristisch sind. Darüber hinaus sind die Inputs den fünf Hauptschritten der Prozesskette zugeordnet.

*Tabelle 2: Vergleichende Übersicht der Inputs für die untersuchten Herstellungsverfahren*

	Material	VARTM	VAP	RTI	RTM	ATL/AFP
Vorbereitung	Isopropanol	x	x	x	x	x
	Formwerkzeug	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[10]</sup>	x <sup>[54]</sup>
	Trennmittel	x	x	x	x <sup>[4]</sup>	x <sup>[10]</sup>
	Tiefkühlschrank					x <sup>[10]</sup>
Ablage	Kohlenstofffasern	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[30, 50]</sup>	
	Harzsystem	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[10]</sup>	
	Prepreg					x <sup>[54]</sup>
	Ablege-Roboter					x <sup>[54]</sup>
Vakuumaufbau/ bauprozessauf-	Entlüftungsvlies		x <sup>[36]</sup>			x <sup>[10]</sup>
	Peel Ply		x <sup>[36]</sup>			x <sup>[10]</sup>
	Dichtungsband	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[36]</sup>	x	x <sup>[30]</sup>	x <sup>[10]</sup>
	Semi-permeable Membran		x <sup>[36, 77]</sup>			
	Vakuumfolie	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[36]</sup>		x <sup>[10]</sup>
	Vakuumpumpe	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[36]</sup>	x	x <sup>[4]</sup>	x <sup>[54]</sup>
Aushärtung	Ofen	x <sup>[36]</sup>	x <sup>[77]</sup>			
	Autoklav			x <sup>[36]</sup>		x <sup>[10]</sup>
	Stickstoff			x <sup>[36]</sup>		x <sup>[10]</sup>
	Beheizte Form				x <sup>[30]</sup>	

Um die Vorgehensweise der Datenerhebung und -berechnung transparent darzustellen, wird nachfolgend die Sachbilanz für das ATL/AFP-Verfahren exemplarisch und detailliert in Tabelle 3 aufgeführt. Die äquivalente Datenerhebung wurde für die anderen Verfahren ebenfalls durchgeführt und ist im Anhang 8.1 dokumentiert.

Tabelle 3: Detaillierte Sachbilanz für das ATL/AFP-Verfahren pro funktionelle Einheit

	Input/Output	Menge	Einheit	Datenquelle	Anmerkungen
Vorbereitung	Isopropanol	■	kg	[D8]	
	Mold/Form	■	kg	[B1]	
	Trennmittel	■	kg	[D1], [75]	
	Tiefkühlschrank	■	kWh	[D2], [B2]	
Ablage	Prepreg	■	kg	[E1]	Informationen aus CPACS, Annahme eines Verschnitts von 10 %
	Ablege-Roboter	■	kWh	[E2]	
Vakuumaufbau/Prozessaufbau	Entlüftungsvlies	■	kg	[D3], [75]	Annahme 20 % Verschnitt
	Dichtungsband	■	kg	[D4], [E3]	Annahme doppelter Vakuumaufbau und je 20 % Verschnitt
	Vakuumfolie	■	kg	[D5],	Annahme doppelter Vakuumaufbau und je 20 % Verschnitt
	Vakuumpumpe	■	kWh	[D6], [B3], [E2], [E3]	
	Abfall-Verschnitt	■	kg	[B4]	
Aushärtung	Autoklav	■	kWh	[B5]	Eigene Messungen des DLRs wurde auf dieses Beispiel skaliert
	Stickstoff	■	kg	[B6]	
Entformung	Abfall-Entformung	■	kg	[B7]	

Die Nachvollziehbarkeit der in der Sachbilanz verwendeten Daten wird durch ein konsistentes System zur Quellenabgabe gewährleistet, welches in der Spalte „Datenquelle“ in Tabelle 3 angewendet wird. Dabei verweist die numerische Zitation auf wissenschaftliche Artikel oder Bücher, die im Literaturverzeichnis aufgeführt sind. Technische Datenblätter von Herstellern werden mit dem Kürzel [D] (für Datenblätter) kodiert, zum Beispiel [D1], und in einem separaten Quellenverzeichnis im Anhang 8.3.1 mit allen relevanten Informationen (Hersteller, Produktname, Datum) aufgelistet. Informationen aus mündlichen oder schriftlichen Mitteilungen von Fachexperten werden mit [E] (für Experte) kodiert, zum Beispiel [E1]. Name, Position des Experten und Datum der Kommunikation sind im Anhang 8.3.2. vertraulich dokumentiert. Werte, die auf eigenen Berechnungen basieren, werden mit [B] (für Berechnung) kodiert, zum Beispiel

[B1]. Aus Gründen der Übersichtlichkeit und Lesbarkeit wird im Hauptteil der Arbeit auf die detaillierte Darstellung aller einzelnen Rechenschritte verzichtet. Komplexere und für das Ergebnis entscheidende Berechnungen sind vollständig und schrittweise im Anhang 8.3.3 dokumentiert sowie in dem im Anhang 8.4 gezeigten Python-Skript. Dies gewährleistet die vollständige Transparenz bei gleichzeitig guter Lesbarkeit des Hauptteils.

### **3.4. Phase 3: Wirkungsabschätzung**

Die Wirkungsabschätzung dient der Bewertung von potentiellen Umweltauswirkungen, die aus den in der Sachbilanz ermittelten Elementarflüssen resultieren. Für die vorliegende Arbeit wurde die Methode des Environmental Footprint (EF) 3.1 ausgewählt. Diese Entscheidung ist auf die Entwicklung dieser Methode durch die Europäische Kommission zurückzuführen, mit dem Ziel, eine harmonisierte, wissenschaftlich fundierte und vergleichbare Grundlage für die Umweltsleistungsbewertung von Produkten und Organisationen im europäischen Binnenmarkt zu schaffen [26]. Die EF 3.1 Methode ist als Midpoint-Ansatz konzipiert und umfasst 16 Wirkungskategorien, welche ein breites Spektrum an Umweltproblemen abdecken und so eine umfassende Bewertung ermöglichen [15].

### **3.5. Methodische Ansätze zur Auswertung und Analyse einer Ökobilanz**

Die Auswertung und Diskussion der Ökobilanzergebnisse erfolgen in einem mehrstufigen Prozess, um eine umfassende und nachvollziehbare Interpretation zu gewährleisten. Die Methodik gliedert sich in die Ergebnisdarstellung, die Identifikation von Hotspots sowie die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse.

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung werden in einer vergleichenden Analyse für alle 16 Wirkungskategorien dargestellt. Für jede einzelne Wirkungskategorie wird die Summe der Umweltauswirkungen aller untersuchten Herstellungsverfahren als Gesamtauswirkung (100 %) definiert. Die Ergebnisse werden anschließend als prozentualer Anteil jedes einzelnen Herstellungsverfahrens an dieser Gesamtbelastung in einem Säulendiagramm visualisiert. Diese Darstellungsform ermöglicht einen direkten Vergleich der relativen Beiträge der einzelnen Verfahren für die Indikatoren jeder Wirkungskategorie.

Zur Einordnung der eigenen Modellergebnisse in einen bereiteren Kontext wird ein Vergleich mit einem generischen Datensatz aus der Ecoinvent-Datenbank in Erwägung gezogen. Hierfür wurde der Datensatz „vacuum infusion moulding for composite production (Rest of Europe - RoE)“ als potenzieller Referenzprozess genommen, wobei das RoE die Länder Europas, bis aus Frankreich, einschließt. Eine genaue Analyse des Datensatzes ist jedoch unerlässlich, um dessen Vergleichbarkeit mit den in dieser Arbeit modellierten Herstellungsverfahren zu bewerten. Bei dem Ecoinvent-Datensatz handelt es sich um einen Datensatz welcher kein physisches Produkt, sondern die

Umformung von Faserverbundwerkstoffen mittels Vakuuminfusion als Prozess abgebildet. Die Daten stammen von drei Unternehmen aus Frankreich und wurden vor Ort zwischen 2019 und 2023 jeweils für 12 Monate erhoben. Der Datensatz enthält dabei nicht die Inputs für Fasern und Harzmatrix, diese müssen vom Anwender separat zum Modell hinzugefügt werden. Somit quantifiziert der Datensatz ausschließlich die Umweltlasten des reinen Transformationsprozesses, wie beispielsweise den Energieverbrauch für die Vakuumpumpe, den Verbrauch von Hilfsstoffen und die Entsorgung von Prozessabfällen. Darüber hinaus spezifiziert der Datensatz, dass für die Herstellung von 0,82 kg Endprodukt ein Input von 1 kg an Fasern und Harz sowie 1 kg der Dienstleistung erforderlich ist. Dies entspricht einem Prozessverlust von 18 %. Des Weiteren betrachtet dieser Datensatz einen Infusionsprozess, bei welchem die Aushärtung unter Raumtemperatur stattfindet und somit kein zusätzlicher Energieaufwand bei diesem Schritt entsteht, anders als bei den in dieser Arbeit modellierten Herstellungsverfahren. Der Ecoinvent-Datensatz kann somit als ein allgemeiner Referenzpunkt für einen grundlegenden Infusionsprozess dienen. Für den Vergleich mit den in dieser Arbeit modellierten Herstellungsverfahren wird für diesen Datensatz dasselbe Faser- und Harzmaterial und derselbe Faservolumengehalt verwendet, unter der Berücksichtigung, dass für 1 kg Endprodukt 1,22 kg Material notwendig ist. [34, 35]

Im Anschluss an die vergleichende Bewertung wird für jedes Herstellungsverfahren eine detaillierte Beitragsanalyse durchgeführt. Ziel ist die Identifikation sogenannter „Hotspots“, also jene Prozessschritte und Materialien, die den größten Anteil an den gesamten Umweltauswirkungen haben. Diese tiefgreifende Analyse ermöglicht es, gezielte Ansatzpunkte für ökologische Optimierungen in den jeweiligen Prozessketten aufzuzeigen.

Um die Robustheit der Ergebnisse zu bewerten, wird eine umfassende Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Im ersten Schritt wird jedem Parameter eine Wahrscheinlichkeitsverteilung zugewiesen. Hierfür kommt vorwiegend die Dreiecksverteilung zur Anwendung, deren Minimal- und Maximalwerte aus der Literatur stammen. Konnte für einen Parameter nur ein diskreter Wert aus Literatur, Datenblättern oder Berechnungen ermittelt werden, dient dieser als Mittelwert, während die Ober- und Untergrenzen auf  $\pm 10\%$  dieses Wertes festgelegt werden. Die detaillierten Wahrscheinlichkeitsverteilungen inklusive der Grenzwerte sind dem Python-Skript in Anhang 8.4 zu entnehmen. Auf dieser Grundlage quantifiziert eine Monte-Carlo-Analyse mit rund 700.000 Iterationen die Ergebnisunsicherheit für ausgewählte Wirkungskategorien. Die resultierenden Wahrscheinlichkeitsverteilungen werden mittels Box Plots visualisiert, welche einen direkten Vergleich der Ergebnisstreuung sowie eine Beurteilung der statistischen Signifikanz der Unterschiede ermöglichen.

Um die einflussreichsten Parameter für die Ergebnisunsicherheit zu identifizieren, wird eine varianzbasierte globale Sensitivitätsanalyse mittels Sobol-Indizes durchgeführt. Für jedes Herstellungsverfahren werden die Sobol-Indizes erster Ordnung und die Sobol-Indizes totaler Ordnung berechnet. Der Vergleich zwischen erster und totaler Ordnung gibt Aufschluss darüber, ob der Einfluss eines Parameters primär auf dem

direkten Betrag beruht oder ob signifikante Wechselwirkungen und Korrelationen mit anderen Parametern bestehen.

## 4. Ergebnisse und Diskussion

In diesem Kapitel werden die Resultate der durchgeführten parametrisierten Ökobilanzierung vorgestellt, analysiert und kritisch diskutiert. Der erste Abschnitt präsentiert die vergleichende Analyse der Umweltauswirkungen für alle 16 Wirkungskategorien aller fünf Herstellungsverfahren. Darüber hinaus werden die Ergebnisse in Relation zu dem generischen Referenzprozess aus der Ecoinvent-Datenbank gesetzt. Darauf aufbauend identifiziert eine detaillierte Beitragsanalyse die dominanten Prozessschritte und Materialien, die maßgeblich zu den Umweltlasten beitragen. Im Zuge dieser Analyse wird zu dem auf die Datenqualität der identifizierten Hotspots eingegangen. Abschließend wird die Robustheit der quantitativen Ergebnisse durch eine umfassende Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse bewertet. Diese mehrstufige Auswertung ermöglicht nicht nur einen direkten Vergleich der Verfahren, sondern auch die Ableitung von Schlussfolgerungen und Handlungsempfehlungen.

### 4.1. Ökobilanzierung

Die Ergebnisse der Wirkungsabschätzung für die modellierten Herstellungsverfahren ATL/AFP, RTI, RTM, VAP und VARTM werden in Abbildung 24 vergleichend dargestellt. Die Visualisierung zeigt für jede der 16 Wirkungskategorien der EF 3.1 Methode die prozentualen Anteile der einzelnen Verfahren an der jeweiligen Gesamtumweltwirkung. Diese normalisierte Darstellung ermöglicht eine direkte Identifikation des dominierenden Herstellungsverfahrens für jeden einzelnen Indikator.

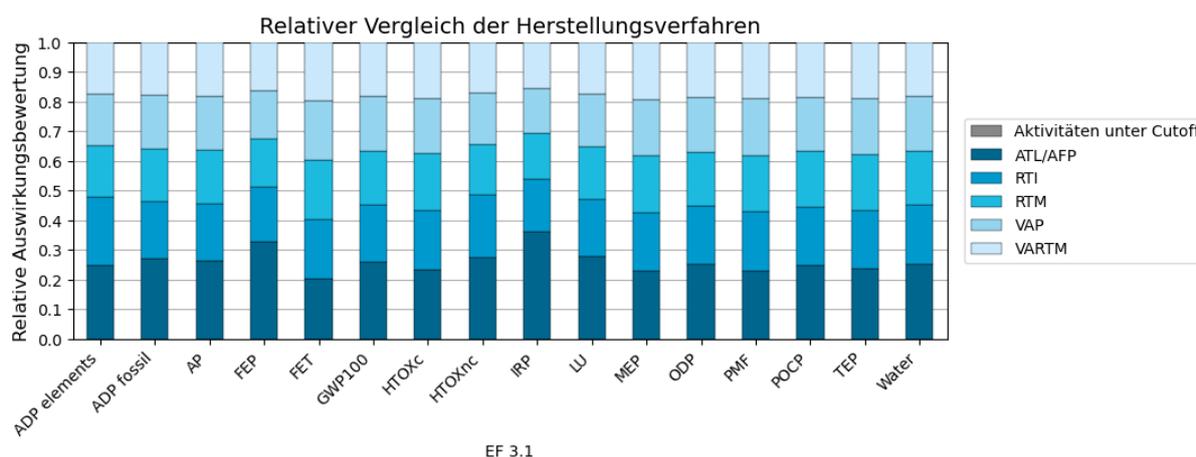


Abbildung 24: Relativer Vergleich der Herstellungsverfahren

Bei der Betrachtung der Ergebnisse wird ersichtlich, dass das ATL/AFP-Verfahren in den meisten Wirkungskategorien die größten Umweltauswirkungen verursacht. Sein Anteil an der Gesamtbelastung liegt in jeder Kategorie über 20 %. Den höchsten Wert erreicht das Verfahren in der Wirkungskategorie IRP mit 36,0 %, was mehr als einem

Drittel der gesamten Umweltwirkungen in dieser Kategorie entspricht. Die Herstellungsverfahren RTM, VAP und VARTM weisen in dem relativen Vergleich minimale Abweichungen von unter 0,5 % zueinander auf, sodass zwischen ihnen kein signifikanter Unterschied feststellbar ist. Ihre Anteile an der Gesamtbelastung bewegen sich je nach Wirkungskategorie zwischen 15,3 % und 19,8 %. Das RTI-Verfahren liegt mit einem prozentualen Anteil zwischen 18,0 % und 23,2 % über alle Wirkungskategorien hinweg unter dem ATL/AFP-Verfahren und über den drei anderen Verfahren.

Diese Resultate zeigen, dass das ATL/AFP-Verfahren die größten Umweltauswirkungen aufweist, was durch die Betrachtung der Sachbilanz zu erwarten war. Es ist zu vermuten, dass die deutlich höheren Energieaufwände, welche durch die Kühlung des Prepregs und den robotergestützten Ablegeprozess entstehen, ursächlich für diese Ergebnisse sind. Generell wird ersichtlich, dass die Verfahren, welche einen Autoklav zur Aushärtung nutzen (ATL/AFP und RTI), höhere Umweltlasten aufweisen. Eine detaillierte Beitragsanalyse wird nachfolgend differenzieren, welche spezifischen Prozesse und Materialien für diese erhöhten Werte verantwortlich sind. Da zwischen den Verfahren RTM, VAP und VARTM in dieser Übersicht keine signifikanten Unterschiede erkennbar sind, ist eine detailliertere Untersuchung notwendig, um die Zusammensetzung der jeweiligen Gesamtbelastung zu analysieren.

Dieser Abschnitt analysiert, inwieweit der in im Abschnitt 3.5 beschriebene Ecoinvent-Datensatz als generischer Referenzprozess für die modellierten Herstellungsverfahren dienen kann. Da die Fasern und das Harz dem Ecoinvent-Datensatz manuell hinzugefügt werden müssen und somit eine identische Datengrundlage für alle Verfahren vorliegt, wurden deren Umweltlasten für diesen Vergleich systematisch exkludiert. Diese Vorgehensweise fokussiert die Analyse ausschließlich auf die prozessspezifischen Unterschiede der Verfahren. Die Ergebnisse des Relativen Vergleichs des Ecoinvent-Datensatzes mit den Herstellungsverfahren sind in Abbildung 25 dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Ecoinvent-Datensatz in jeder Wirkungskategorie deutlich höhere Umweltauswirkungen aufweist als die eigenen Modelle der Herstellungsverfahren. Im Hinblick darauf, dass in dem Ecoinvent-Datensatz die Aushärtung bei Raumtemperatur stattfindet und somit kein zusätzlicher Energieaufwand zur Aushärtung entsteht, wie es bei allen anderen Herstellungsverfahren der Fall ist, ist hier kritisch zu hinterfragen was die Ursachen für die deutlich höheren Umweltauswirkungen des Ecoinvent-Datensatzes sind. Die detaillierte Analyse der Modellierungslogik des Ecoinvent-Datensatzes weist die mögliche Ursache für die Diskrepanz auf. Der Datensatz skaliert sämtliche Prozess-Inputs und Outputs, wie Hilfsstoffe, mit der Masse des Endprodukts, in diesem Fall die ██████ kg der Flügelschale. Diese Methodik steht im Widerspruch zur physikalischen Realität vieler Prozessschritte, deren Material- oder Energiebedarf nicht von der Masse, sondern von der Bauteilfläche abhängt. So ist beispielsweise der Verbrauch von Trennmittel primär eine Funktion der Formwerkzeugoberfläche und nicht des Bauteilgewichts. Da diese flächenbasierte Skalierung im generischen Ecoinvent-Datensatz nicht abgebildet wird, resultieren daraus syste-

matisch verzerrte Ergebnisse, die eine direkte Vergleichbarkeit mit den hier differenziert modellierten Verfahren ausschließen. Dieser Vergleich verdeutlicht die Notwendigkeit, die Skalierungslogik und die zugrundeliegenden Annahmen von Datenbankprozessen kritisch zu prüfen, bevor diese als Referenz herangezogen werden.

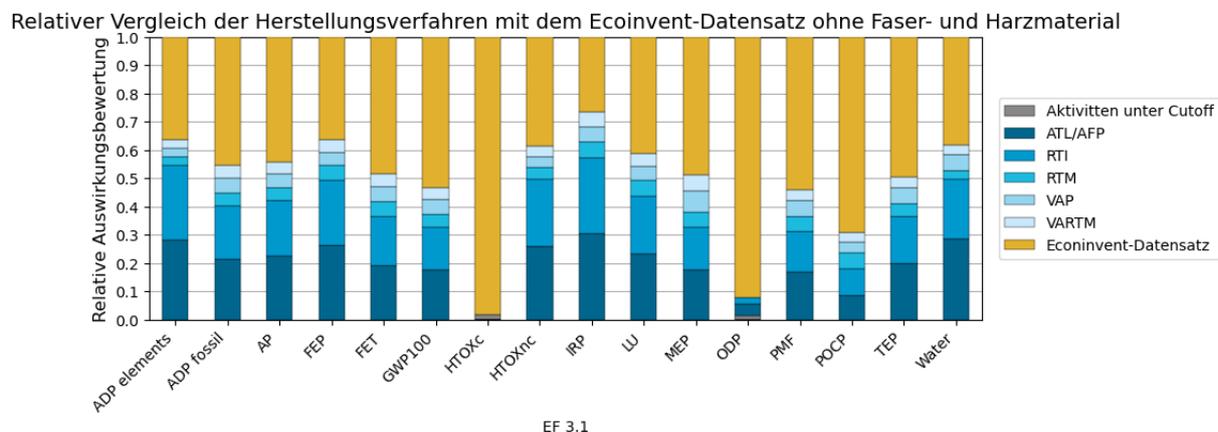


Abbildung 25: Relativer Vergleich der Herstellungsverfahren mit dem Ecoinvent-Datensatz ohne Faser- und Harzmaterial

Insgesamt deckt die Gegenüberstellung der prozessspezifischen Modelle mit dem Ecoinvent-Datensatz eine fundamentale methodische Schwachstelle in der Anwendung von „Black-Box“-Datenbankprozessen auf. Die Analyse zeigt, dass der Ecoinvent-Prozess eine massenbasierte Skalierung aufweist, welche nicht generisch auf alle Prozessinput angewendet werden kann. Bei großen, leichten Strukturen wie einer Flügelschale führt diese falsche Skalierung zu einer maßgeblichen Überschätzung der realen Umweltlasten, was die Ergebnisse des generischen Prozesses für diese Anwendung unbrauchbar macht. Diese Erkenntnis demonstriert, dass eine valide Ökobilanzierung ein tiefes prozesstechnisches Verständnis erfordert, um die Annahmen und Grenzen von Datenbankmodellen bewerten zu können. Die unreflektierte Anwendung generischer Prozess beinhaltet die Gefahr systematischer Fehlerbewertung und verdeutlicht die Notwendigkeit einer differenzierten, prozessspezifischen Modellierung.

Bei der Erstellung der Ergebnisse der Beitragsanalyse der Prozessschritte, welche beispielhaft für das ATL/AFP- und das VARTM-Verfahren im Anhang 8.5.1 dargestellt sind, zeigt sich, dass die Umweltauswirkungen des Faser- und Harzmaterials in dem Prozessschritt „Ablage“ die Beiträge aller anderen Prozessschritte in sämtlichen Wirkungskategorien überlagern. Um die prozessspezifischen Unterschiede der Herstellungsverfahren dennoch detailliert analysieren zu können, wurden die Umweltlasten des Faser- und Harzmaterials aus der vergleichenden Bilanzierung exkludiert. Aufgrund dieser Erkenntnisse wurde vor der eigentlichen Beitragsanalyse der einzelnen LCIs eine weitere Untersuchung des relativen Vergleichs der Herstellungsverfahren ohne das Faser- und Harzmaterial durchgeführt. Die Ergebnisse dieses relativen Vergleichs sind in der Abbildung 26 dargestellt.



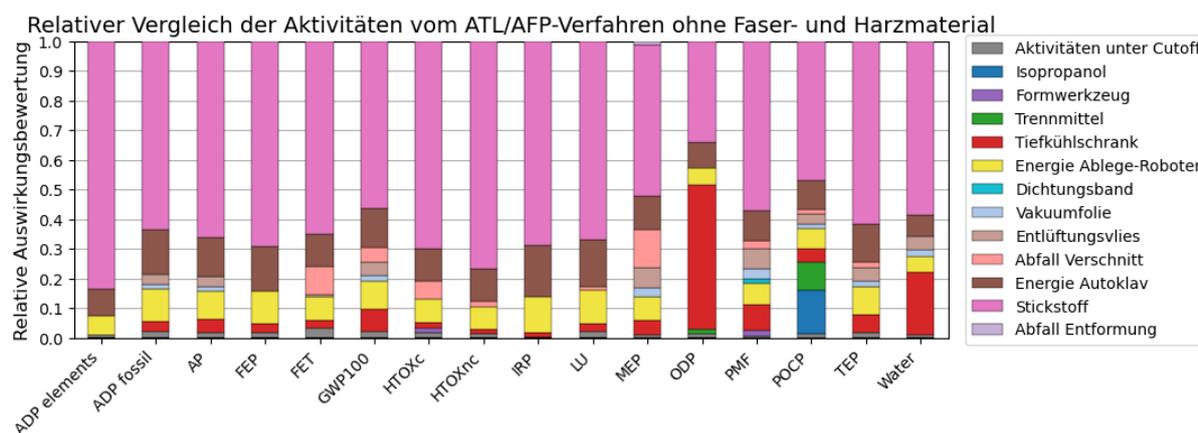
EF 3.1

Abbildung 26: Relativer Vergleich der Herstellungsverfahren ohne Faser- und Harzmaterial

Die Analyse der normalisierten Ergebnisse zeigt, dass das ATL/AFP-Verfahren mit durchschnittlich 37,9 % und das RTI-Verfahren mit durchschnittlich 35,0 % die größten Umweltauswirkungen verursachen. Im Gegensatz dazu weisen die Verfahren RTM, VAP und VRTM zusammen im Durchschnitt weniger als ein Drittel der relativen Umweltbelastung auf. Eine Ausnahme bildet die Wirkungskategorie POCP, bei welcher das RTM-Verfahren einen Anteil von 18,6 % hat. Dennoch weisen auch hier das ATL/AFP-Verfahren mit 26,1 % und das RTI-Verfahren mit 31,7% höhere Umweltauswirkungen auf als die anderen Herstellungsverfahren. Zusammenfassend lässt sich festhalten, dass die prozessspezifischen Unterschiede, durch die Eliminierung des Faser- und Harzmaterials aus der Berechnung der Ökobilanzierung, stärker hervorgehoben und ersichtlicher werden. Es ist ersichtlich, dass das ATL/AFP-Verfahren dennoch die größten Umweltauswirkungen verursacht, gefolgt vom RTI-Verfahren. Die Verfahren RTM, VAP und VARTM verursachen mit durchschnittlich 9,7 %, 9,4 % und 7,9 % eine deutlich geringere Umweltbelastung. In Hinsicht auf die Ergebnisse des Vergleichs der Herstellungsverfahren mit dem Faser- und Harzmaterial in Abbildung 24 ist festzuhalten, dass durch das Faser- und Harzmaterial die größten Umweltauswirkungen entstehen und dies die Umweltlasten der einzelnen Herstellungsverfahren angleicht.

Nachdem durch den relativen Vergleich die Herstellungsverfahren ATL/AFP und RTI als Hauptverursacher der prozessbedingten Umweltlasten identifiziert wurden, muss im nächsten Schritt die Ursache für diese Ergebnisse analysiert werden. Die bisherigen Darstellungen zeigen welche Verfahren in den jeweiligen Wirkungskategorien dominieren, erklären jedoch nicht, warum dies der Fall ist. Nachfolgend wird deswegen die Beitragsanalyse der zugrundeliegenden Sachbilanzen für jedes Herstellungsverfahren vorgenommen. Hierbei wird bewusst, das Faser- und Harzmaterial nicht betrachtet, um die individuellen prozessspezifischen Inputs- und Outputs der Herstellungsverfahren eindeutig differenzieren zu können.

In Abbildung 27 ist der relative Vergleich der Aktivitäten des ATL/AFP-Verfahrens ohne das Faser- und Harzmaterial, also ohne das Prepreg, dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Stickstoff in jeder Wirkungskategorie mit Ausnahme von ODP die größten Umweltwirkungen aufweist und Werte von 34,1 % bis 83,3 % annimmt. In der Kategorie ODP weist der Tiefkühlschrank mit 48,7 % die größte Umweltbelastung auf. Neben dem Stickstoff und dem Tiefkühlschrank weisen die Energieaufwände des Autoklavs und des Ablege-Roboters signifikante Einflüsse auf, die prozentuale Anteile zwischen 5,2 % bis 17,2 % in den verschiedenen Wirkungskategorien ausmachen. In der Kategorie POCP fallen Isopropanol mit 14,6 % und das Trennmittel mit 9,4 % ins Gewicht. In den anderen Wirkungskategorien ist die Umweltauswirkung des Isopropanols so gering, dass es in die Aktivitäten unter Cutoff fällt. Der Verschnitt Abfall weist in der Wirkungskategorie MEP mit 12,9 % eine relevante Umweltauswirkung auf. Die weiteren Aktivitäten wie das Dichtungsband, das Formwerkzeug und die Vakuumfolie fallen in einigen Wirkungskategorien in die Aktivitäten unter Cutoff und erreichen maximal einen prozentualen Anteil von 3,5 % in einzelnen Kategorien, sodass ihre Relevanz für die gesamten Umweltauswirkungen des Herstellungsverfahrens marginal ist.



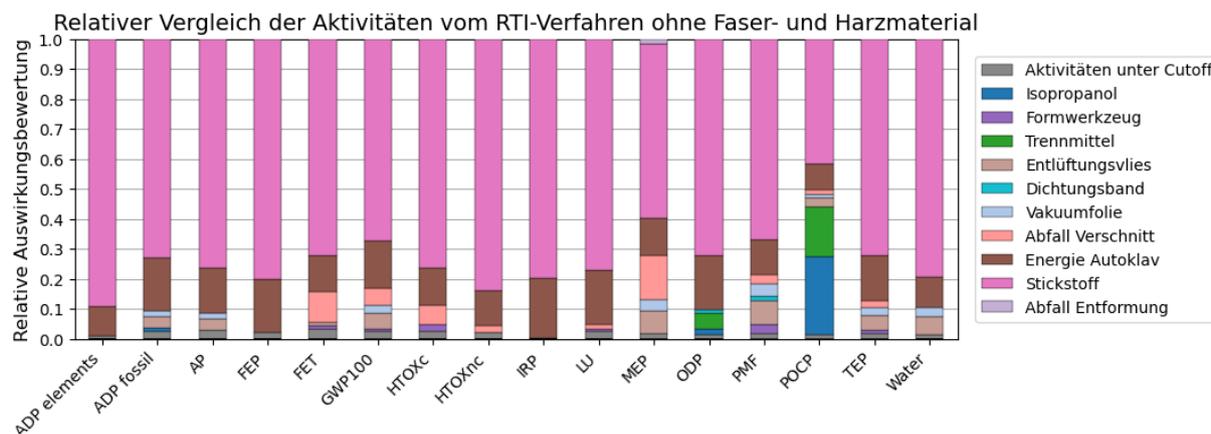
EF 3.1

Abbildung 27: Relativer Vergleich der Aktivitäten vom ATL/AFP-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial

Diese Ergebnisse verdeutlichen, dass ohne das Faser- und Harzmaterial die Aushärtung mit dem Autoklav durch den hohen Stickstoffverbrauch und den Energieaufwand im Mittel für 74 % der Umwelteinwirkungen verantwortlich ist. Auffällig ist jedoch der hohe Anteil von 48,7 % des Tiefkühlschranks in der Wirkungskategorie ODP. Bei der genaueren Betrachtung des genutzten Ecoinvent-Datensatzes für die Sachbilanz ist festzustellen, dass insbesondere die Produktion des Tiefkühlmittels R134a und das daraus entstehende Tetrafluoroethan Auswirkungen auf die Umweltbelastung im Bereich Ozonabbau haben.

Der relative Vergleich der Aktivitäten des RTI-Verfahrens ohne Faser- und Harzmaterial ist in Abbildung 28 dargestellt. Ähnlich wie bei dem ATL/AFP-Verfahren ist ersichtlich, dass der Stickstoff mit durchschnittlich 72,8 % den größten Einfluss auf die Um-

weltauswirkungen des Verfahrens hat, gefolgt von dem Autoklav mit einem durchschnittlichen Wert von 14,1 % über die Wirkungskategorien hinweg. Auffällig an diesen Ergebnissen ist außerdem die Umweltauswirkung von Isopropanol und dem Trennmittel auf die Wirkungskategorie POCP mit den Werten 25,8 % und 16,7 %.

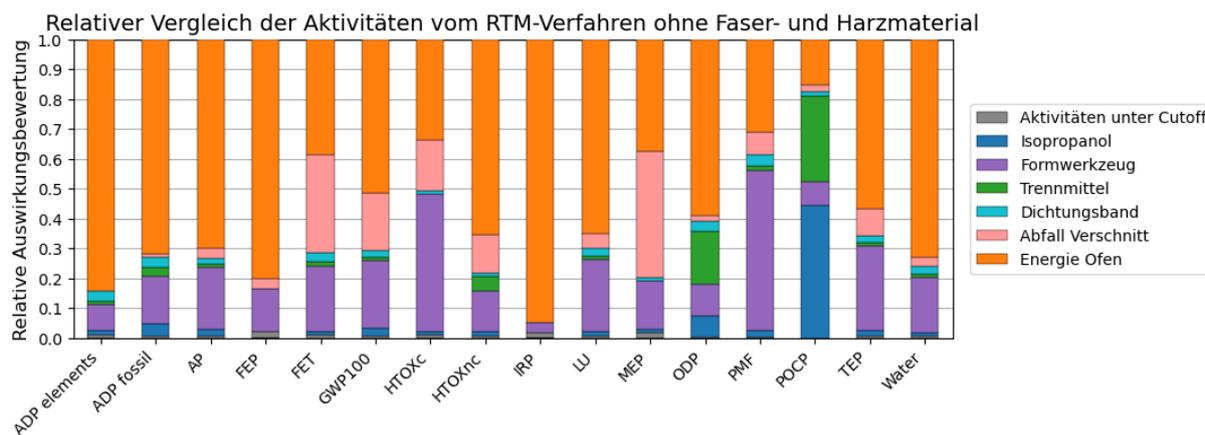


EF 3.1

*Abbildung 28: Relativer Vergleich der Aktivitäten vom RTI-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial*

Insgesamt zeigen die Ergebnisse der detaillierten Betrachtung des RTI-Verfahrens, dass alle Aktivitäten mit der Ausnahme des Stickstoffs und der Energie des Autoklavs im Durchschnitt unterhalb von 3 % liegen und somit keinen maßgeblichen Einfluss auf die Umweltwirkung des Verfahrens haben. Die Ausnahme bilden das Isopropanol und das Trennmittel in der Wirkungskategorie POCP. Ihr Anteil an der Umweltwirkung dieses Wirkungsindikators ist nahezu doppelt so hoch wie beispielsweise bei dem ATL/AFP-Verfahren. Dies ist unter anderem darin begründet, dass bei dem RTI-Verfahren zusätzlich zu dem Formwerkzeug auch das Werkzeugelement mit Isopropanol gereinigt und mit dem Trennmittel bearbeitet werden muss und der Verbrauch somit doppelt so hoch ist.

Im folgenden wird der relative Vergleich der Aktivitäten vom RTM-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial betrachtet. Im direkten Vergleich zu den vorherigen Verfahren wird deutlich, dass eine deutlich geringere Zahl an Aktivitäten Auswirkungen auf die Umweltwirkung des Verfahrens haben. Bei dem RTM-Verfahren macht die Energie des Ofens durchschnittlich 57,8 % der Umweltauswirkungen aus. Insbesondere in den Kategorien IRP mit 94,8 % und ADP elements mit 84,3 % ist der Ofen die ausschlaggebende Umweltbelastung. In den Kategorien HTOXc und PMF dominieren die Umweltauswirkungen des Formwerkzeugs mit 45,9 % und 53,6 %. Insgesamt verursacht das Formwerkzeug beim RTM-Verfahren mit einem durchschnittlichen Wert von 20,3 % neben dem Ofen die größten Umweltauswirkungen. Weitere Auffälligkeiten sind der hohe Anteil von 42,3 % des Verschnittabfalls in der Kategorie MEP und der hohe Anteil von Isopropanol und dem Trennmittel in der Kategorie POCP mit Werten von 44,4 % und 28,7 %.

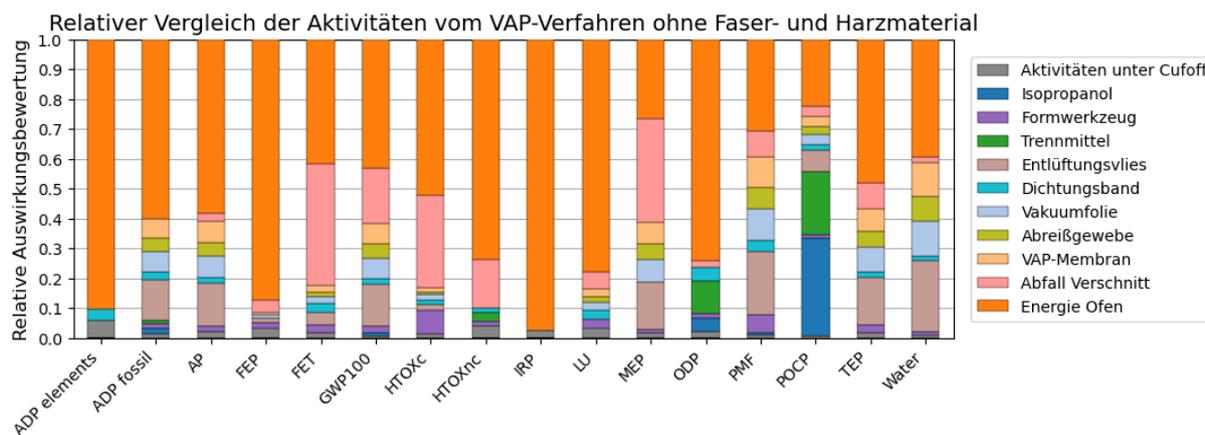


EF 3.1

Abbildung 29: Relativer Vergleich der Aktivitäten vom RTM-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial

Die Analyse macht deutlich, dass der Energieverbrauch des Ofens für die Aushärtung der Flügelschale der mit Abstand dominanteste Faktor bei diesem Herstellungsverfahren ist. Ein weiterer signifikanter Beitrag über alle Wirkungskategorien stammt vom Formwerkzeug. Das Isopropanol und das Trennmittel tragen als flüchtige organische Verbindungen maßgeblich zur Bildung von bodennahem Ozon bei, was die Ergebnisse in der Kategorie POCP widerspiegeln.

Nachfolgend sind in Abbildung 30 die Ergebnisse des relativen Vergleichs der Aktivitäten vom VAP-Verfahren dargestellt. Es ist zu erkennen, dass der Energieverbrauch des Ofens mit durchschnittlich 57,5 % die signifikante Ursache für die Umweltbelastung ist. Insbesondere in den Kategorien ADP elements mit 90,2 % und IRP mit 97,4 % dominieren dessen Umweltwirkungen. Der Verschnitt Abfall wirkt sich insbesondere in den Kategorien FET mit 40,9 %, MEP mit 34,7 % und HTOXnc mit 30,9 % auf die Gesamtbelastungen in diesen Kategorien aus. Des Weiteren sind die Umweltwirkungen vom Isopropanol und dem Trennmittel, ähnlich wie bei den anderen Verfahren, in der Kategorie POCP mit 32,8 % und 21,2 % bedeutsam hoch. Das Entlüftungsvlies weist in den Kategorien PMF und Water mit den Werten 21,1 % und 23,7 % relevante Umweltauswirkungen auf. Alle weiteren Aktivitäten liegen im Durchschnitt unterhalb von 5 % und haben somit keinen bedeutsamen Einfluss auf die Gesamtbelastung des Verfahrens.

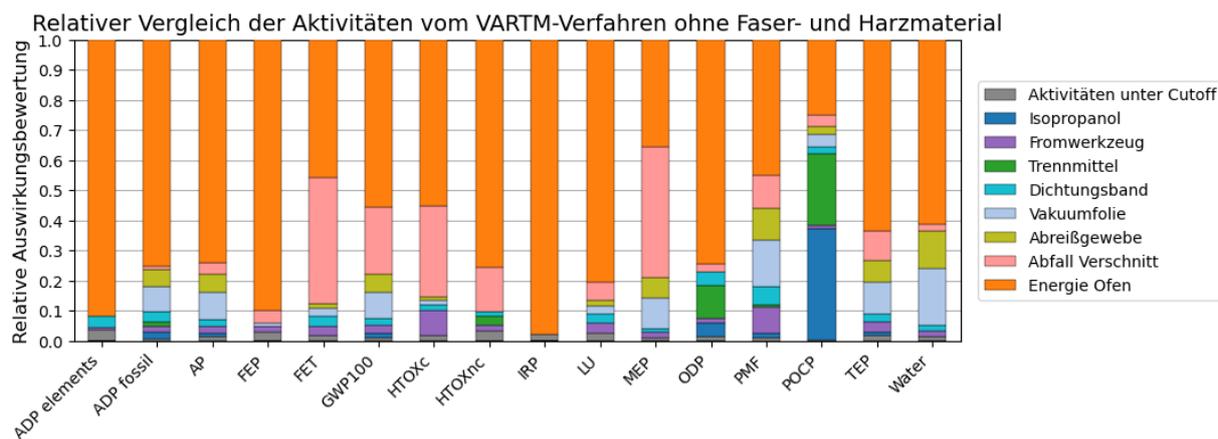


EF 3.1

Abbildung 30: Relativer Vergleich der Aktivitäten vom VAP-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial

Anhand der Ergebnisse vom VAP-Verfahren wird deutlich, dass auch hier, wie bei dem RTM-Verfahren der Energieverbrauch des Ofens die höchste Umweltbelastung verursacht. Es ist des Weiteren zu erkennen, dass die Hilfsmittel, wie das Abreißgewebe und die VAP-Membran nur geringfügige Umweltwirkungen aufweisen, sie jedoch indirekt über den Verschnitt Abfall eine erhebliche Umweltrelevanz besitzen.

In Abbildung 31 ist der Vergleich der LCI vom VARTM-Verfahren dargestellt. Ähnlich wie bei dem RTM-, und VAP-Verfahren geht aus der Grafik hervor, dass der Energieverbrauch des Ofens mit durchschnittlich 65,3 % der dominante Faktor für die Umweltbelastung ist. In nahezu allen Wirkungskategorien, macht diese Aktivitäten den größten Teil der Gesamtbelastung aus. Als zweitgrößter Faktor lässt sich der Verschnitt Abfall identifizieren, dessen Anteil insbesondere in den Kategorien HTOXc und MEP mit 30,2 % und 43,1 % relevant ist. Wie in den Verfahren zuvor bildet die Kategorie POCP eine Ausnahme in der Verteilung der Umweltwirkungen, da das Isopropanol und das Trennmittel mit prozentualen Anteilen von 36,7 % und 23,8 % mehr als die Hälfte der Gesamtbelastung ausmachen. In allen weiteren Wirkungskategorien sind die Einflüsse dieser Aktivitäten marginal.



EF 3.1

Abbildung 31: Relativer Vergleich der Aktivitäten vom VARTM-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial

Die Analyse der gesammelten Ergebnisse verdeutlicht, dass insbesondere der Stickstoff gefolgt von dem Energiebedarf des Autoklavs die dominanten Umweltauswirkungen bei den Verfahren ATL/AFP und RTI verursachen, welche als die Verfahren mit der höchsten Umweltbelastung identifiziert wurden. Der signifikant hohe Betrag des ATL/AFP-Verfahrens in der Wirkungskategorie ODP lässt sich auf die Nutzung eines Kühlschranks zur gekühlten Lagerung des Prepregs zurückführen. Dieses Ergebnis unterstreicht die Notwendigkeit, bei einer umfassenden Ökobilanzierung sämtliche Wirkungsindikatoren einer Wirkungsabschätzungsmethode zu berücksichtigen, um ein vollständiges Bild der Umweltlasten in den unterschiedlichen Kategorien zu erhalten.

Des Weiteren ist bei einer umfassenden Beobachtung festzustellen, dass die Verfahren RTM, VAP und VARTM im Vergleich der Herstellungsverfahren ähnliche Umweltauswirkungen aufweisen, die Hotspot-Analyse jedoch zeigt, dass sich diese aus unterschiedlichen Beiträgen der Aktivitäten zusammensetzen. Eine Gemeinsamkeit ist der dominierende Einfluss des Aushärteofens bei allen drei Verfahren. Diese Beobachtung muss jedoch kritisch reflektiert werden, da zur Vereinfachung und aufgrund fehlender spezifischer Daten die Annahme getroffen wurde, dass der Ofen denselben Energieaufwand aufweist wie der Autoklav. Insbesondere bei dem RTM-Verfahren, bei dem die Aushärtung in einem geschlossenen, beheizten Formwerkzeug stattfindet, ist diese Annahme mit einer wesentlichen Unsicherheit behaftet. Eine ähnliche Unsicherheit resultiert aus den Annahmen zu den Gewichten der Formwerkzeuge. Da in der Literatur keine detaillierten Informationen über die Dimensionierung der Formwerkzeuge, insbesondere bei dem RTM-Verfahren, verfügbar waren, mussten generalisierte Annahmen getroffen werden, welche die Endergebnisse potenziell beeinflussen. Zur Quantifizierung dieser Einflüsse auf das Gesamtergebnis folgt die Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse.

## 4.2. Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse

In diesem Abschnitt werden die Ergebnisse der Monte-Carlo-Analyse für unterschiedliche Wirkungsindikatoren grafisch dargestellt. Wie bei der Beitragsanalyse werden bei der Monte-Carlo-Analyse das Faser- und Harzmaterial nicht berücksichtigt um die prozessspezifischen Unterschiede stärker hervorzuheben und insbesondere die individuellen Wahrscheinlichkeitsverteilungen in den Box Plots abbilden zu können.

In der Abbildung 32 sind die Ergebnisse der fünf Herstellungsverfahren zum GWP100 in der Form von Box Plots dargestellt. Die roten Punkte zeigen dabei den absoluten Wert, welcher für die Vergleichs- und Beitragsanalysen verwendet wurde. Anhand dieser Darstellung ist zu erkennen, dass die Verfahren ATL/AFP mit etwa 5700 kg CO<sub>2</sub>-Äq. und RTI mit etwa 4800 kg CO<sub>2</sub>-Äq. signifikant höhere Treibhausemissionen aufweisen als die übrigen Verfahren. Zudem weisen diese Verfahren eine deutlich größere Streuung in den Ergebnissen auf, was durch die breiteren Interquartilsbereiche und die längeren Whisker verdeutlicht wird. Im Gegensatz dazu liegen die Verfahren RTM, VAP und VARTM mit GWP100-Werten im Bereich von etwa 1300 bis 1900 kg CO<sub>2</sub>-Äq. deutlich niedriger. Bei diesen Verfahren weisen die Box Plots deutlich geringere Variabilität auf. Insbesondere beim RTM- und VARTM-Verfahren liegen die Interquartilsbereiche vergleichsweise eng am Median. Insgesamt sind geringe Ausreißer über und unter dem Maximum und Minimum bei jedem Verfahren zu erkennen. Außerdem ist zu beobachten, dass die Box Plots der einzelnen Verfahren symmetrisch zum Median sind, auf welchem der rote Punkt und somit der Ist-Wert liegt.

Boxplot mit absoluten Vergleichswerten zum GWP100 ohne Faser- und Harzmaterial

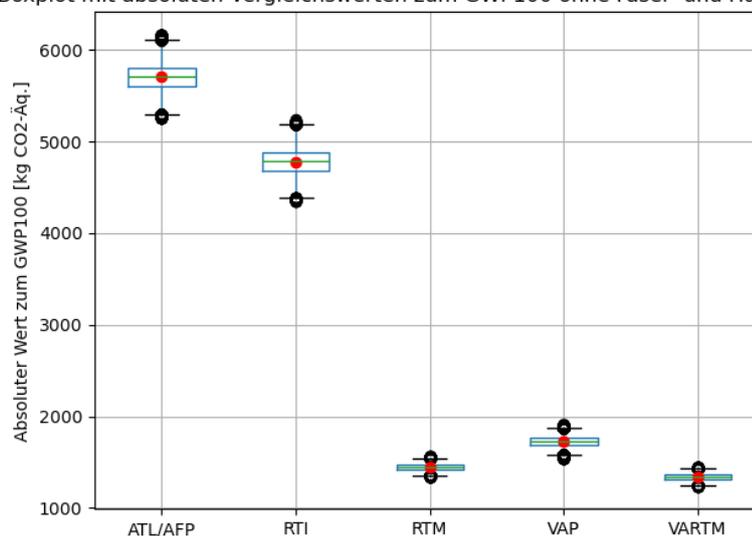


Abbildung 32: Box Plot mit absoluten Vergleichswerten des GWP100 ohne Faser- und Harzmaterial

Die Beobachtung, dass die Boxplots symmetrisch um den Median verteilt sind, lässt sich durch die zugrunde gelegten Wahrscheinlichkeitsverteilungen der einzelnen Sachbilanzeinträge erklären. Wurde nur ein einzelner Wert angegeben, so wurde die-

---

ser als Modus einer Dreiecksverteilung definiert, während Minimum und Maximum proportional um diesen Wert festgelegt wurden. Bei einer Angabe von Wertebereichen wurde der kleinste Wert als Minimum und der größte Wert als Maximum definiert, der Modus wurde in diesem Fall als arithmetisches Mittel dieser beiden Grenzen angesetzt. Dadurch ergeben sich für alle Parameter der Sachbilanz symmetrische Dreiecksverteilungen, was sich entsprechend in den Ergebnissen, insbesondere in der Symmetrie der Box Plots, widerspiegelt. Diese Analyse liefert somit Informationen über die Streuung der Ergebnisse, erlaubt jedoch keine differenzierte Aussage darüber, welche Eingangsparameter maßgeblich zur Unsicherheit beitragen. Die weiteren Box Plot Ergebnisse zu den anderen Wirkungsindikatoren bieten somit keine neuen Erkenntnisse über den schon vorgenommen relativen Vergleich der Herstellungsverfahren und die Beitragsanalyse hinaus und werden im Weiteren nicht betrachtet.

Um diese Frage zu beantworten, welche Eingangsparameter maßgeblich zur Unsicherheit beitragen, wurde im Anschluss eine globale Sobol-Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Dieses Verfahren ermöglicht eine Zerlegung des Gesamtausgabeverianz in einzelne Beiträge der LCIs sowie deren Interaktion. Auf diese Weise lassen sich die einflussreichsten Parameter der Verfahren identifizieren, was nicht nur für die Interpretation der Ergebnisse, sondern auch für potenzielle Optimierungsansätze und zukünftige Datenerhebungen von zentraler Bedeutung ist.

In den folgenden zwei Grafiken in Abbildung 33 sind die Sobol-Indizes totaler und erster Ordnung in der Form von Heatmaps für das ATL/AFP-Verfahren dargestellt. Bei dem Vergleich der Ergebnisse ist zu erkennen, dass die Sobol-Indizes erster Ordnung mit den Sobol Indizes totaler Ordnung identisch sind. Dasselbe Verhalten ist auch bei allen weiteren Verfahren zu beobachten (siehe beispielhaft Anhang 8.5.2). Diese Übereinstimmung deutet darauf hin, dass die Aktivitäten das Modellverhalten unabhängig und ohne signifikante Wechselwirkungen mit anderen Parametern beeinflussen, was für eine additive Modellstruktur spricht. Hierbei ist kritisch zu betrachten, dass im zugrundeliegenden Sachbilanzmodell keine direkten Wechselwirkungen zwischen den Aktivitäten berücksichtigt wurden. Diese Struktur geht auf die Annahme zurück, dass alle Aktivitäten unabhängig voneinander variieren. In der Realität bestehen jedoch funktionale Zusammenhänge, etwa zwischen der Größe des Formwerkzeugs und dem damit verbundenen Verbrauch an Reinigungsmittel. Die Analyse der Sobol-Indizes dient somit neben der Quantifizierung der einflussreichsten Parameter auch als Validierungsinstrument und konnte aufdecken, dass in der Sachbilanzmodellierung eine maßgebliche Abstraktion der Realität durch die Parameterunabhängigkeit vorliegt. Die derzeitige Modellstruktur erlaubt daher ausschließlich Aussagen über direkte Einflüsse einzelner Parameter auf das Ergebnis, jedoch nicht über deren kombinierte Wirkung.

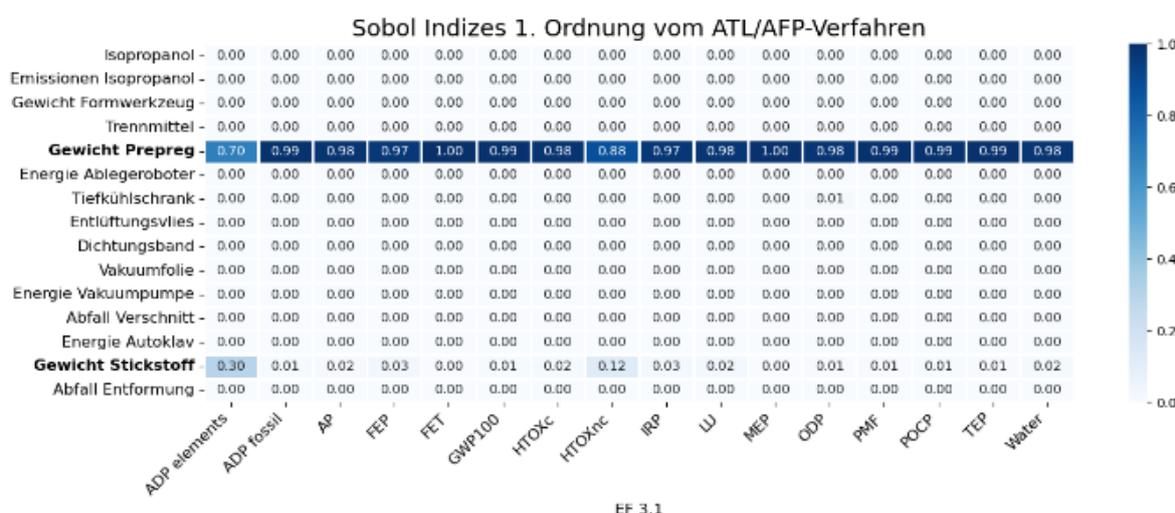
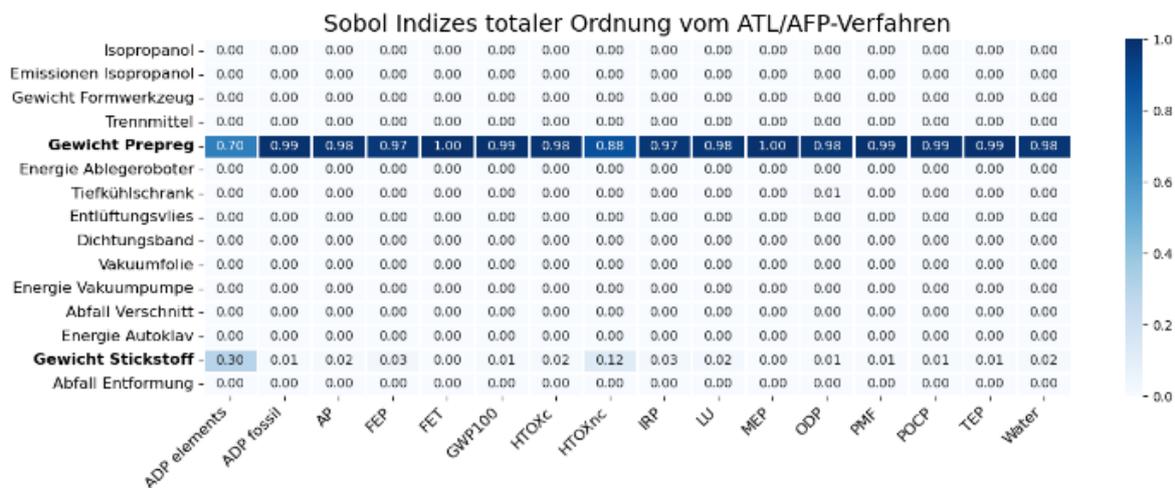


Abbildung 33: Sobol Indizes totaler und 1. Ordnung vom ATL/AFP-Verfahren

Im Folgenden werden die Sobol-Indizes totale Ordnung für jedes Herstellungsverfahren ohne Faser- und Harzmaterial betrachtet. Ziel ist es, prozessspezifisch zu identifizieren, welche Aktivitäten einen signifikanten Einfluss auf die Umweltwirkungen der jeweiligen Verfahren ausüben.

Abbildung 34 zeigt die Sobol-Indizes totaler Ordnung des ATL/AFP-Verfahrens. Hier lässt sich erkennen, dass insbesondere der Tiefkühlschrank, das Entlüftungsvlies und der Stickstoff die Varianz der Umweltauswirkungen maßgeblich beeinflussen. Der Stickstoff ist mit Werten zwischen 0,7 und 0,98, ausgenommen des Indikators ODP, der dominanteste Einflussfaktor für die Umweltindikatoren. Der Tiefkühlschrank trägt insbesondere zur Variabilität des ODP-Indikators mit einem Wert von 0,65 bei, während das Entlüftungsvlies moderate Beiträge in den Kategorien MEP (0,19) und PMF (0,17) zeigt. Die weiteren Aktivitäten weisen mit Sobol-Indizes unter 0,08 nahezu keine relevanten Varianzbeiträge auf, was auf deren geringe Relevanz oder fehlende Koppelung im Modell hindeutet.

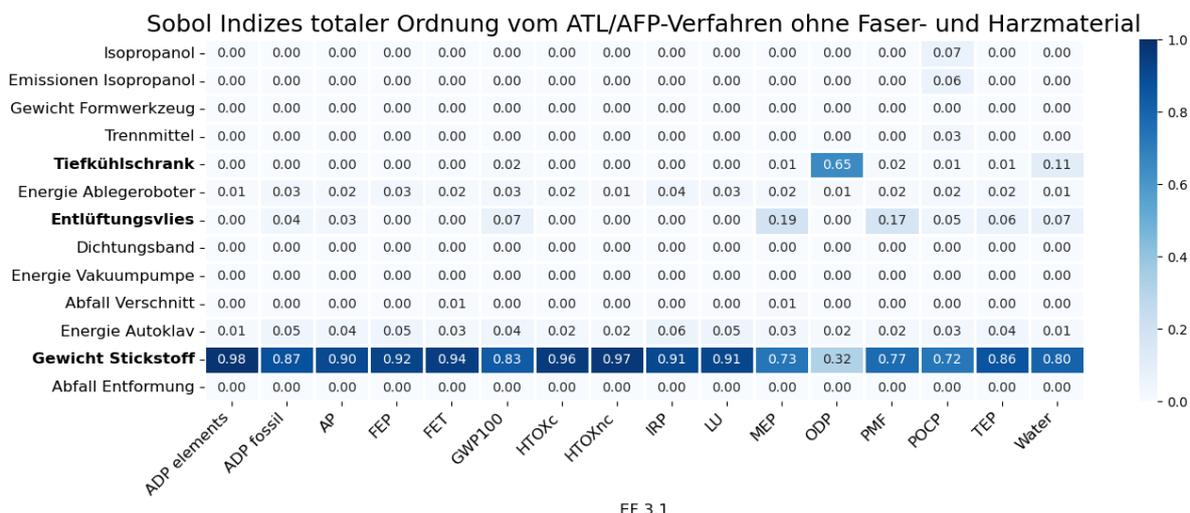


Abbildung 34: Sobol Indizes totaler Ordnung vom ATL/AFP-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial

Abbildung 35 präsentiert die Sobol-Indizes für das RTI-Verfahren. Analog zum ATL/AFP-Verfahren dominiert der Stickstoff mit Werten zwischen 0,75 und 0,99, ausgenommen des POCP, die Varianz der Umweltindikatoren. Darüber hinaus sind das Entlüftungsvlies mit Beiträgen von jeweils 0,19 bei MEP und 0,18 beim PMF sowie das Isopropanol und dessen Emissionen für die Wirkungskategorie POCP mit 0,19 und 0,18 als weitere relevante, jedoch deutlich geringere, Einflussgrößen zu identifizieren.

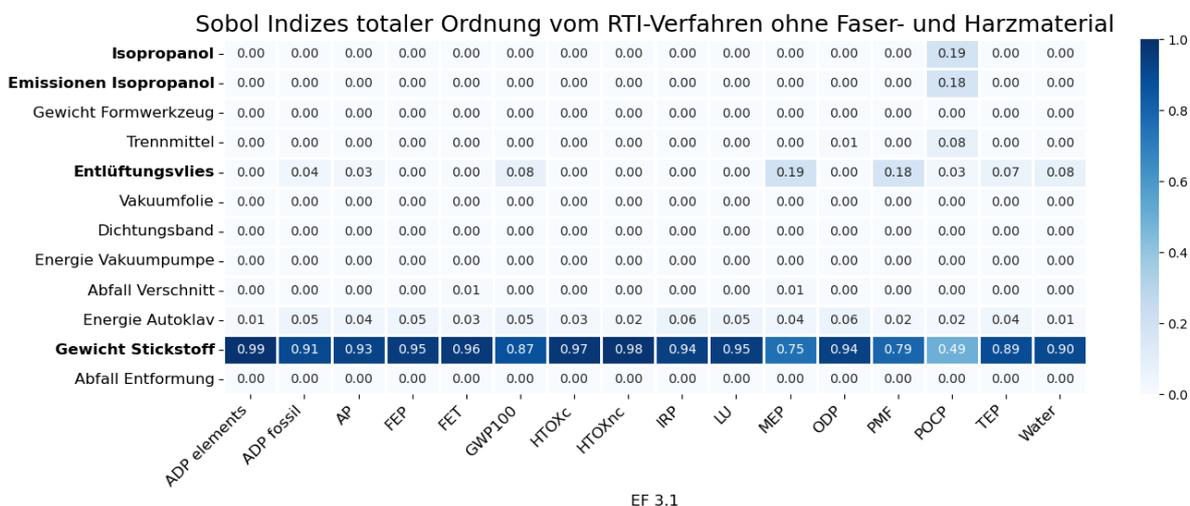
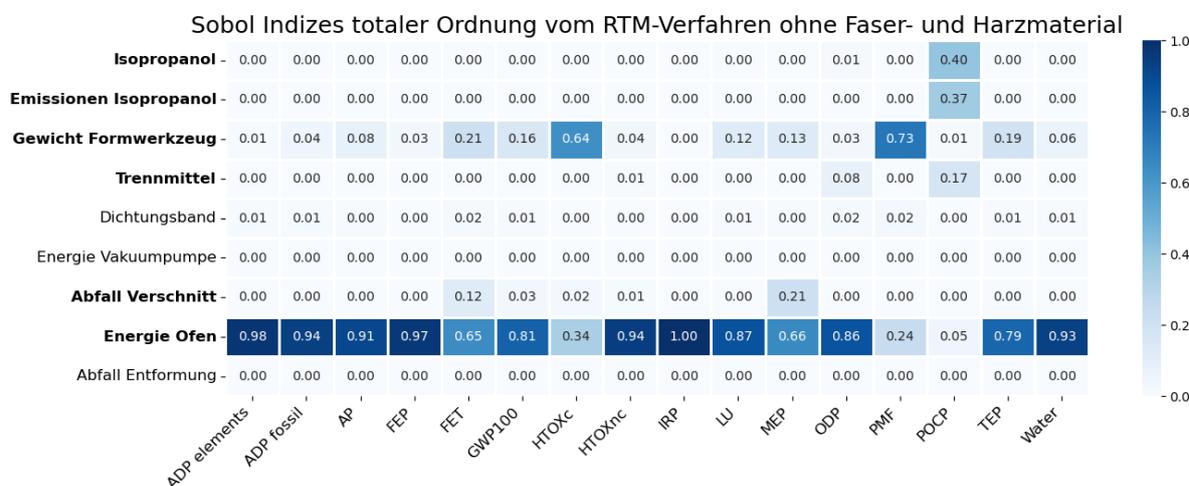


Abbildung 35: Sobol Indizes totaler Ordnung vom RTI-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial

Die Ergebnisse für das RTM-Verfahren in Abbildung 36 zeigen eine andere Einflussstruktur, als die vorherigen Verfahren. Bei dem RTM-Verfahren ist der Energieverbrauch des Ofens mit Sobol Indizes von 0,79 bis 0,98 bei den meisten Indikatoren der dominierende Faktor. Dies verdeutlicht, dass die Unsicherheiten im Energiebedarf des Ofens die Varianz der Ökobilanzergebnisse maßgeblich bestimmen. Zudem weist das

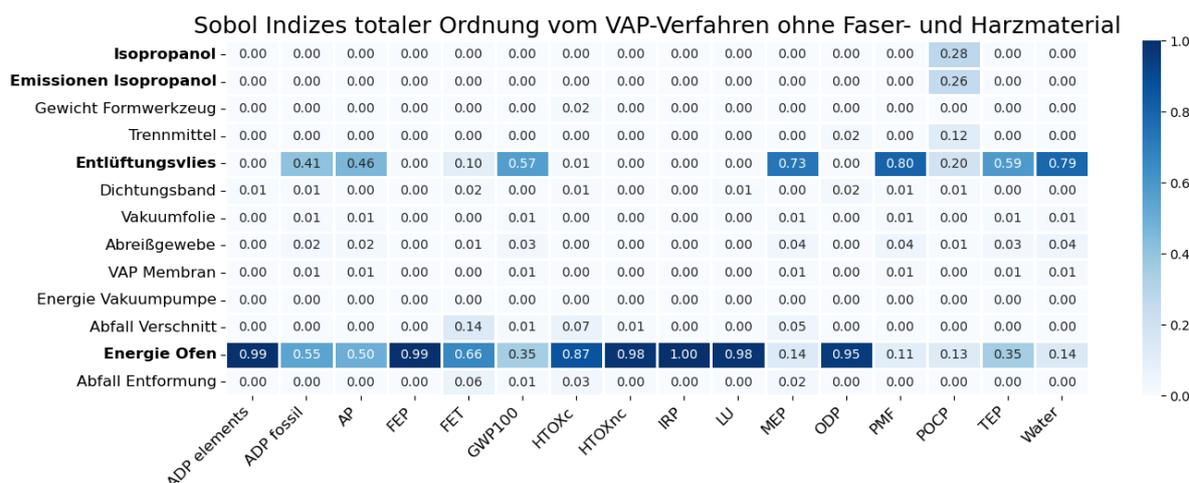
Formwerkzeug bei den Indikatoren HTOXc mit 0,64 und PMF mit 0,73 signifikante Beiträge auf, was einen deutlichen Unterschied zu den zuvor betrachteten Verfahren darstellt, bei denen das Formwerkzeug keine relevanten Effekte zeigt.



EF 3.1

Abbildung 36: Sobol Indizes totaler Ordnung vom RTM-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial

Die Sobol-Indizes totaler Ordnung des VAP-Verfahrens sind in der Headmap in Abbildung 37 dargestellt. Für diese Verfahren ist ebenfalls der Energieverbrauch des Ofens die dominierende Einflussgröße auf die Varianz der Umweltauswirkungen. Allerdings zeigt bei bestimmten Indikatoren wie dem GWP100, MEP, PMF, TEP und Water auch das Entlüftungsvlies erhöhte Sobol-Indizes mit Werten zwischen 0,59 und 0,80, was auf einen maßgeblichen Einfluss in bei diesen Indikatoren hindeutet. Das Isopropanol und dessen Emissionen tragen mit Werten von 0,28 und 0,26 signifikant zur Variant im POCP-Indikator bei.



EF 3.1

Abbildung 37: Sobol Indizes totaler Ordnung vom VAP-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial

Die Heatmap der Sobol-Indizes für das VARTM-Verfahren in Abbildung 38 bestätigen das Muster der vorherigen Verfahren. Der Energieverbrauch des Ofens ist für nahezu

alle Indikatoren der dominierende Einflussfaktor, mit Ausnahme vom POCP, wo Isopropanol und dessen Emissionen die Varianz maßgeblich bestimmen. Im Vergleich zu den anderen Verfahren weisen alle weiteren Aktivitäten Sobol-Indizes unter 0,25 auf, sodass sich die Varianz der Umweltauswirkungen bei dem VARTM-Verfahren auf zwei zentrale Aktivitäten konzentrieren.

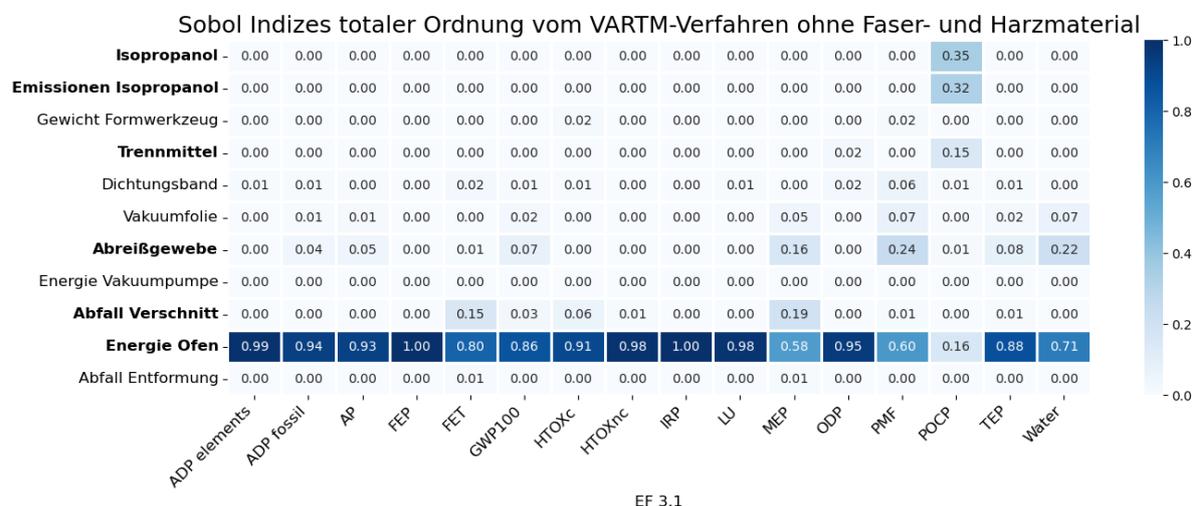


Abbildung 38: Sobol Indizes totaler Ordnung vom VARTM-Verfahren ohne Faser- und Harzmaterial

Die Analyse der Sobol-Indizes verdeutlicht, dass der Energieverbrauch des Ofens bei den Herstellungsverfahren mit Aushärtung im Ofen (RTM, VAP, VARTM) als zentraler Unsicherheitsfaktor die Varianz der Ökobilanzergebnisse dominiert. Bei den Verfahren ATL/AFP und RTI ist dagegen der Stickstoffverbrauch die prägende Einflussgröße. Als weitere Einflussgrößen wurden das Isopropanol und dessen Emissionen, der Tiefkühlschrank, das Formwerkzeug und das Entlüftungsvlies identifiziert. Insgesamt wird die durch die Sobol-Analyse identifizierte strukturelle Limitation des Modells durch die inhärenten Unsicherheiten der einflussreichsten Aktivitäten verstärkt. Eine kritische Bewertung der Datenqualität dieser identifizierten Hotspots ist daher unerlässlich, um die Robustheit der Gesamtergebnisse korrekt einordnen zu können.

### 4.3. Datenqualitätsbewertung und Limitationen der Sachbilanz

Im Rahmen der vorliegenden Ökobilanz wurden für die einzelnen Parameter der Sachbilanz Unsicherheiten berücksichtigt, deren Quantifizierung jedoch mit erheblichen Herausforderungen verbunden ist. Die Datenbasis beruht überwiegend auf Informationen aus Datenblättern, Expertenabschätzungen sowie Annahmen, da direkte Messungen für die Herstellung einer Flügelschale nicht vorlagen.

Über alle betrachteten Herstellungsverfahren hinweg wurden sechs Aktivitäten identifiziert, welche die Umweltauswirkungen maßgeblich beeinflussen: Stickstoff, Isopropanol, der Tiefkühlschrank, das Formwerkzeug, das Entlüftungsvlies sowie der Ofen. Aus diesem Grund wird die Datenqualität dieser Aktivitäten im Folgenden detailliert und kritisch reflektiert.

Die Masse des Stickstoffs wurde unter Anwendung des idealen Gasgesetzes ermittelt. Dabei fließen Volumen, Temperatur und Druck des Autoklavs während des Aushärtungszyklus als variable Parameter in die Berechnung ein. Der Autoklav und die damit verbundenen Werte wurden anhand der Dimensionierung der Flügelschale approximiert, wobei die Aushärtetemperatur aus Datenblättern des gewählten Harzes mit 180 °C festgelegt wurde. Der Druck wurde auf Basis von Messungen an einem Autoklav des DLR bestimmt. Somit hängt das Gewicht des Stickstoffes von drei Einzelparametern ab, die jeweils eigene Unsicherheiten aufweisen, welche die Unsicherheit des Ergebnisses potenzieren. Aufgrund fehlender belastbarer Informationen konnten die individuellen Unsicherheiten jedoch nicht separat modelliert werden.

Der Verbrauch von Isopropanol basiert auf Angaben aus Datenblättern und der Dimensionierung der Oberfläche des Formwerkzeugs. Ähnlich verhält es sich mit dem Energieverbrauch des Tiefkühlschranks. Neben den Angaben aus Datenblätter wurden jedoch zusätzlich Annahmen zu der Lagerdauer des Prepregs im Tiefkühlschrank getroffen, da keine öffentlich verfügbaren Informationen vorlagen. Diese Annahme wirkt sich direkt auf den Energieverbrauch aus und ist mit schwer quantifizierbaren Unsicherheiten behaftet.

Für die Bestimmung des Gewichts der Formwerkzeuge mussten eigene Annahmen getroffen werden, da keine spezifischen Literaturdaten zur Dimensionierung der Formwerkzeuge für die jeweiligen Herstellungsverfahren vorliegen. Die Gewichte wurden anhand der Bauteilfläche, der Dichte von Stahl und unterschiedlichen Dicken berechnet, um die Unterschiede zwischen den Verfahren, wie das zweiseitige Formwerkzeug des RTM-Verfahrens, zu berücksichtigen. Außerdem wurde das Gewicht mit einer Anzahl von 1000 Verwendungen verrechnet, wobei die Anzahl der Verwendungen auch auf eigenen Annahmen beruht. Diese Schätzungen sind mit erheblichen Unsicherheiten behaftet, die in der vorliegenden Modellierung nicht explizit quantifiziert wurden.

Das Entlüftungsvlies wurde anhand von Herstellerangaben aus Datenblättern und der Oberfläche des Bauteils bestimmt. Der Energieverbrauch des Ofens entspricht dem des Autoklavs. Der Energieverbrauch des Ofen wurde aufgrund fehlender spezifischer Primärdaten für einen Ofen dieser Dimension, in Anlehnung an die skalierten Messdaten des Autoklavs modelliert. In der Realität ist davon auszugehen, dass ein druckloser Ofenprozess einen geringeren Energiebedarf ausweist als ein Autoklavprozess. Die Annahme gleicher Energiewerte beeinflusst somit die Ofen-basierten Verfahren (RTM, VAP, VARTM) in der ökologischen Bewertung mit tendenziell höheren Umweltauswirkungen. Die Tatsache, dass die Autoklav-Verfahren, dennoch signifikant höhere Umweltauswirkungen aufweisen, stärkt die Robustheit der Ergebnisse des relativen Vergleichs.

Trotz der sorgfältigen Modellierung der Sachbilanzparameter beruhen die Aktivitäten insgesamt auf eigene Annahmen und Informationen aus Datenblättern, die zum Teil nicht speziell für die betrachteten Herstellungsverfahren erhoben wurden. Dies führt zwangsläufig zu Unsicherheiten, deren Ausmaß und Verteilung nur unzureichend

quantifiziert werden können. Auf diesen Grundlagen aufbauend wurden symmetrische Dreiecksverteilungen für die Wahrscheinlichkeitsverteilungen der Parameter gewählt, da belastbare Informationen zur Form der Verteilungen fehlen. Insgesamt schränkt die mangelnde Verfügbarkeit von Primärdaten die Aussagekraft der Analyse ein und kann die Validität der abschließenden Ökobilanzergebnisse beeinträchtigen.

Insbesondere die Vernachlässigung möglicher Zusammenhänge und Korrelationen zwischen Parametern, bedingt durch die Modellierung unabhängiger symmetrischer Wahrscheinlichkeitsverteilungen, ist eine Form der Modellunsicherheit und stellt eine maßgebliche Limitation der Unsicherheitsmodellierung dar. Diese Vernachlässigung führt dazu, dass Wechselwirkungen in der Sensitivitätsanalyse nicht angezeigt werden. Dies hat zur Folge, dass die Bedeutung einzelner Aktivitäten möglicherweise überschätzt oder unterschätzt wird.

Vor diesem Hintergrund sollten die Ergebnisse kritisch betrachtet werden. Die gewonnenen Erkenntnisse über die Umweltauswirkungen der unterschiedlichen Aktivitäten auf die modellierten Herstellungsverfahren stellen eine erste Abschätzung dar, deren Genauigkeit durch die Qualität der Sachbilanzmodellierung limitiert ist. Es ist daher notwendig eine erweiterte Modellierung vorzunehmen, um die Abhängigkeiten zwischen den einzelnen Aktivitäten abbilden zu können und eine realistischere Unsicherheitsquantifizierung zu gewährleisten.

## 5. Ausblick

Die vorliegende Arbeit liefert eine detaillierte ökologische Differenzierung von Herstellungsverfahren im Flugzeugbau und unterstreicht die Notwendigkeit prozessspezifische Ökobilanzen. Aus den Ergebnissen und den identifizierten Limitationen der vorgenommenen Modellierung leiten sich weiterführende Handlungsempfehlungen ab, welche im Folgenden erläutert werden.

Die größte Limitation der modellierten Ökobilanzen ist die ausschließliche Verwendung von Sekundärdaten. In nächsten Schritten sollte der Fokus auf der Erhebung von Primärdaten, insbesondere bei der Bestimmung des Stickstoffverbrauchs und des Energieverbrauchs des Ofens, in Kooperation mit Industrie- und Forschungspartnern liegen. Direkte Messungen des Energie- und Materialverbrauchs an realen Produktionsanlagen würde die Validität der Sachbilanzen erheblich steigern und eine robustere Bewertungsgrundlage schaffen. Des Weiteren lag der Fokus dieser Arbeit bewusst auf der Herstellungsphase. Für eine ganzheitliche Bewertung ist die Analyse des gesamten Produktlebenszyklus jedoch unerlässlich. Zukünftige Studien sollten neben der differenzierten Herstellungsphase auch die Nutzungsphase, insbesondere den Einfluss möglicher fertigungsbedingter Gewichtsunterschiede auf den Treibstoffverbrauch, sowie die End-of-Life-Phase untersuchen. Eine weitere Limitation dieser Arbeit, die Unabhängigkeit der Aktivitäten und ihre symmetrischen Wahrscheinlichkeitsverteilungen, sind ein Punkt an dem in Zukunft angesetzt werden muss, um eine realistischere Unsicherheitsquantifizierung zu erreichen. In künftigen Modellen sind die Korrelationen

zwischen Parametern, wie beispielsweise die Menge an Trennmittel in Korrelation zu der Oberfläche des Formwerkzeug, zu realisieren und individuelle Wahrscheinlichkeitsverteilungen anzunehmen, idealerweise auf der Grundlage von Primärdaten. Dies würde die Aussagekraft der Ergebnisse, insbesondere bei geringen Unterschieden zwischen den Verfahren, weiter schärfen. Dennoch liefert die durchgeführte Hotspot-Analyse bereits jetzt schon konkrete Ansatzpunkte zur Optimierung bestehender Prozesse, wie die Steigerung der Energieeffizienz von Autoklaven und Öfen oder die Reduzierung des Stickstoffverbrauchs.

## 6. Zusammenfassung

Die zunehmende Verwendung von CFK in der Luftfahrt, insbesondere in Primärstrukturen wie der Flügelschale des D369, erfordert eine detaillierte ökologische Bewertung der damit verbundenen Herstellungsverfahren. Bisherige LCAs greifen oft auf generische Daten zurück, die die signifikanten Unterschiede zwischen den einzelnen Fertigungstechnologien vernachlässigen. Ziel dieser Masterarbeit ist daher die vergleichende Ökobilanzierung von fünf Herstellungsverfahren für eine CFK-Flügelschale, um prozessspezifische Umweltauswirkungen zu identifizieren und die Notwendigkeit einer differenzierten Datenbasis aufzuzeigen. Eine LCA erfordert dabei eine qualitativ hochwertige Datenbasis, um aussagekräftige und vergleichbare Ergebnisse zu erzielen. Aus diesem Grund wird über die Ökobilanzierung hinaus eine umfassende Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse durchgeführt, mit dem Ziel die Aussagekraft der definierten Modelle zu überprüfen.

Die methodische Grundlage bildet die Vorgehensweise nach ISO 14040/44. Als Fallbeispiel dient die obere Flügelschale des D369, deren Geometrie und Masse mittels des Open-Source-Tool CPACS und TiGL approximiert wurden. Auf Grundlage einer umfassenden Recherche zu Faserverbundwerkstoffen in Flugzeugbauteilen und deren Herstellungsverfahren wurden die Verfahren ATL/AFP, RTI, RTM, VAP und VARTM als relevante Verfahren identifiziert und für den Vergleich ausgewählt. Anschließend wurden detaillierte Sachbilanzen für die Herstellungsverfahren erstellt und die Modellierung im Python-basierten Brightway-Framework unter Nutzung der lca\_algebraic-Bibliothek vorgenommen. Als Datenbasis dienten Literaturwerte, Datenblätter und Expertenabschätzungen, ergänzt durch Hintergrunddaten aus der Ecoinvent-Datenbank. Die Wirkungsabschätzung wurde mit der Methode Environmental Footprint (EF 3.1) durchgeführt. Die Auswertung umfasst neben einer vergleichenden Analyse und einer Hotspot-Analyse, zur Identifikation der treibenden Aktivitäten, auch die umfassende Unsicherheits- und Sensitivitätsanalyse mittel Monte-Carlo-Simulation und globaler Sensitivitätsanalyse mit varianzbasierten Sobol-Indizes. Darüber hinaus wurden die Ergebnisse der Ökobilanzierung der modellierten Herstellungsverfahren dem gegnerischen Ecoinvent-Datensatz „vacuum infusion moulding“ gegenübergestellt, um die Vergleichbarkeit mit generischen Datensätzen zu untersuchen.

Die Ergebnisse zeigen, dass die Autoklav-basierten Verfahren (ATL/AFP, RTI) in den meisten Wirkungskategorien die höchsten Umweltauswirkungen aufweisen, dominiert

---

durch den Energie- und Schickstoffverbrauch des Autoklavs. Die Ofen-Aushärteverfahren (RTM, VAP, VARTM) weisen eine geringere und untereinander ähnliche Umweltlasten auf, wobei hier der Energieverbrauch des Ofens die Hauptursache für die Umweltauswirkungen darstellt. Insgesamt konnten der Stickstoff, der Energieverbrauch des Tiefkühlschranks, der Energieverbrauch des Ofens, das Isopropanol und dessen Emissionen, das Formwerkzeug und das Entlüftungsvlies als relevante Aktivitäten für die Umweltauswirkungen der unterschiedlichen Herstellungsverfahren identifiziert werden. Die globale Sensitivitätsanalyse bestätigt diese Hotspots als maßgebliche Treiber für die Ergebnisunsicherheit. Eine weitere zentrale Erkenntnis ist, dass die Umweltauswirkungen des Rohmaterials, also der Fasern und des Harzes, die prozessbedingten Unterschiede überlagern, weshalb eine separate Analyse der Aktivitäten der Herstellungsverfahren ohne die Berücksichtigung des Faser- und Harzmaterials zur Differenzierung der Verfahren notwendig war. Der Ecoinvent-Datensatz weist bei der Gegenüberstellung mit den prozessspezifischen Modellen signifikant höhere Umweltauswirkungen auf, obwohl dieser Datensatz keinen energieintensiven Aushärteprozess aufweist. Die Analyse des Datensatzes zeigt auf, dass alle Hilfsstoffe massenbasiert skaliert werden, dies jedoch nicht der Realität entspricht und es zu einer systematischen Fehlbewertung der Umweltauswirkungen mit dem gegnerische Datensatz kommt.

Die kritische Diskussion der Ergebnisse zeigt, dass die Aussagekraft der Studie durch die Qualität der verfügbaren Sekundärdaten und die getroffenen Annahmen limitiert ist. Insbesondere die Modellierung der Unsicherheiten unabhängiger symmetrischer Dreiecksverteilungen stellt eine Vereinfachung dar, welche Wechselwirkungen zwischen einzelnen Aktivitäten nicht berücksichtigt. Dennoch demonstriert die Arbeit, dass sich die Herstellungsverfahren ökologisch signifikant unterscheiden und eine pauschale Bewertung mittels generische Datenbankprozesse zu verzerrten Ergebnissen führt. Die Studie zeigt somit die Notwendigkeit der Erhebung und Nutzung prozessspezifische LCI-Daten auf, um eine valide ökologische Bewertung im Flugzeugbau durchführen zu können und stellt eine Methodik zur Identifikation der entscheidenden Prozessparameter bereit.

Zusammenfassend zeigt die Arbeit, dass der Weg zu einer nachhaltigen Luftfahrt eine transparente und datengestützte Bewertung aller Lebenszyklusphasen erfordert. Dabei muss die hier dargelegte Grundlage durch gezielte Forschung und industrielle Kooperationen weiter ausgebaut werden, um den ökologischen Fußabdruck zukünftiger Flugzeuggenerationen wirksam zu reduzieren.

---

## 7. Literaturverzeichnis

- [1] Al-Mamun A.-M., Hossain M. R., Iqbal M. A., Haque M. Z., and Sharmin M. M. 2024. Recent developments in the synthesis of composite materials for aerospace: case study. *MSEIJ* 8, 3, 109–116. DOI: <https://doi.org/10.15406/mseij.2024.08.00243>.
- [2] Almushaikeh A. M., Alaswad S. O., Alsuhybani M. S., AlOtaibi B. M., and Alarifi I. M.; Alqahtani; Aldosari; Alsaleh; Haidyrah; Alolyan; Alshammari. 2023. Manufacturing of carbon fiber reinforced thermoplastics and its recovery of carbon fiber: A review. *Polymer Testing* 122, 108029. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.polymertesting.2023.108029>.
- [3] Aparecido Lopes Silva D., Aparecida da Silva Moris V., Oliveira Nunes A., and Moro Piekarski C. 2017. How important is the LCA software tool you choose Comparative results from GaBi, openLCA, SimaPro and Umberto. *CILCA 2017*.
- [4] AVK–Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e. V. 2013. Handbuch Faser-verbundkunststoffe/Composites. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [5] Barahmand Z. and Eikeland M. S. 2022. Life Cycle Assessment under Uncertainty: A Scoping Review. *World* 3, 3, 692–717. DOI: <https://doi.org/10.3390/world3030039>.
- [6] Barke A., Thies C., Pinheiro Melo S., Cerdas F., and Herrmann C; Spengler. 2020. Socio-economic life cycle assessment of future aircraft systems. *Procedia CIRP*, Volume 90, 262–267.
- [7] Batz M. 2021. Nachhaltigkeit in der Sozialwirtschaft. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [8] Brandt L. 2017. Automated handling and positioning of large dry carbon fibre cut-pieces with cooperating robots in rear pressure bulkhead production.
- [9] Brasington A., Sacco C., Halbritter J., Wehbe R., and Harik R. 2021. Automated fiber placement: A review of history, current technologies, and future paths forward. *Composites Part C: Open Access* 6, 1–18. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jcomc.2021.100182>.
- [10] Breuer U. P. 2016. Commercial Aircraft Composite Technology (1st ed. 2016). Springer International Publishing; Imprint: Springer, Cham.
- [11] Chemnitz university of Technology, Ed. 2023. Conference Proceedings of the Advanced Manufacturing Student Conference (Issue 3). DOI: <https://doi.org/10.51382/2748-9337i03>.
- [12] Cirot A. 2012. Mathematical analysis ofecoinvent data.
- [13] Cirot A. and Arvidsson R. 2021. Life Cycle Inventory Analysis. Springer International Publishing, Cham.
- [14] Cirot A., Muller S., Weidema B., and Lesage P. 2016. Empirically based uncertainty factors for the pedigree matrix in ecoinvent. *Int J Life Cycle Assess* 21, 9, 1338–1348. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-013-0670-5>.

- 
- [15] Damiani M., Ferrara N., and Ardente F. 2022. Understanding Product Environmental Footprint and Organisation Environmental Footprint methods. *JRC Technical Report*. DOI: <https://doi.org/10.2760/11564>.
- [16] Deutsche Norm. DIN-EN-ISO-14040-Februar-2021, ICS 13.020.10; 13.020.60.
- [17] Deutsche Norm. DIN-EN-ISO-14042-Juli-2000, ICS 13.020.10; 13.202.60.
- [18] Deutsche Norm. DIN-EN-ISO-14044-Februar-2021, ICS 13.020.10; 13.020.60.
- [19] Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. Erforschung von Konzepten und Technologien für Elektroflugzeuge. Retrieved from <https://www.dlr.de/de/tt/forschung-transfer/projekte/laufende-projekte/exact>.
- [20] Dissanayake N. 2023. Guidelines and recommendations for data collection in life cycle inventory (LCI) for composites. DOI: <https://doi.org/10.47120/npl.MAT121>.
- [21] Dolganova I., Bach V., Rödl A., Kaltschmitt M., and Finkbeiner M. 2022. Assessment of Critical Resource Use in Aircraft Manufacturing. *Circ.Econ.Sust.* 2, 3, 1193–1212. DOI: <https://doi.org/10.1007/s43615-022-00157-x>.
- [22] Ecoinvent. Guidance on IPCC Methods. Retrieved September 7, 2025 from <https://support.ecoinvent.org/guidance-on-ipcc-methods>.
- [23] Ecoinvent. Impact Assessment. Retrieved September 8, 2025 from <https://support.ecoinvent.org/impact-assessment>.
- [24] Ehsani F. 2022. Automated Dry Fiber Placement and Resin Infusion. Department of Mechanical, Industrial & Aerospace Engineering, Montreal, Quebec, Kanada.
- [25] Europäische Kommission. 2011. Flightplan 2050. *Europe's vision for aviation; maintaining global leadership and serving society's needs; report of the high-level group on aviation research*. policy. Publ. Off. of the Europ. Union, Luxembourg.
- [26] Europäische Union. 2021. Publications Office. Commission Recommendations on the use of the Environmental Footprint methods to measure and communicate the life cycle environmental performance of products and organisations. *Official Journal of the European Union*.
- [27] Fakher Chaari, Francesco Gherardini, Vitalii Ivanov, Mohamed Haddar, Francisco Cavas-Martínez, Francesca di Mare, Young W. Kwon, Tullio A. M. Tolio, Justyna Trojanowska, Robert Schmitt, and Jinyang Xu. 2025. Proceedings of the 7th China Aeronautical Science and Technology Conference. Springer Nature Singapore, Singapore.
- [28] Frischknecht R. 2020. Lehrbuch der Ökobilanzierung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [29] Frischknecht R. and Jungbluth N. Implementation of Life Cycle Impact Assessment Methods.
- [30] George A. Optimization of Resin Infusion Processing for Composite Materials. Institute of Aircraft Design. University of Stuttgart.
- [31] Gialanella S. 2020. Aerospace Alloys. Topics in Mining, Metallurgy and Materials Engineering Ser. Springer International Publishing AG, Cham.

- 
- [32] Guo J., Li R., Zhang R., Qi J., and Li N; Xu; Chiu; Wang; Tanikawa; Xu. 2025. Shedding light on the shadows: Transparency challenge in background life cycle inventory data. *J of Industrial Ecology*. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.70010>.
- [33] Hänsch A. 2021. VAP® Patent- und Patentverletzungs-Management (2021). Retrieved July 26, 2025 from [https://www.trans-textil.de/wp-content/uploads/2021/05/AIRBUS\\_TransTextil\\_VAP\\_PatentInfringement\\_ENG\\_20210304-1.pdf](https://www.trans-textil.de/wp-content/uploads/2021/05/AIRBUS_TransTextil_VAP_PatentInfringement_ENG_20210304-1.pdf).
- [34] Harvey T. 2023. Vacuum Infusion Moulding for Composite Product (2023). Retrieved September 29, 2025 from <https://ecoquery.ecoinvent.org/3.11/cutoff/dataset/93212/documentation>.
- [35] Harvey T., Cheikh Y., and Leclercq J. 2024. Life Inventory of composite forming processes.
- [36] Hindersmann A. 2019. Confusion about infusion: An overview of infusion processes. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 126, 1–11. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2019.105583>.
- [37] Hintze W. 2021. CFK-Bearbeitung. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [38] Huberty W., Roberson M., Cai B., and Hendrickson M. 2024. State of the Industry – Resin Infusion: A Literature Review DOT/FAA/TC-23/3. Mississippi State University Advanced Composite Institute.
- [39] Huijbregts M. A., Steinmann Z. J., Elshout P. M., Stam G., and Verones F; Vieira; Zijp; Hollander; van Zelm. 2017. ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level. *Int J Life Cycle Assess* 22, 2, 138–147. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-016-1246-y>.
- [40] Jolivet R., Clavreul J., Brière R., Besseau R., and Prieur Vernat A; Sauze; Blanc; Douziech; Pérez-López. 2021. lca\_algebraic: a library bringing symbolic calculus to LCA for comprehensive sensitivity analysis. *Int J Life Cycle Assess* 26, 12, 2457–2471. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-021-01993-z>.
- [41] Jolliet O., Margin M., Charles R., Humbert S., and Payet J; Rebitzer; Rosenbaum. IMPACT 2002+: A new life cycle impact assessment methodology.
- [42] Kim A. Global Sensitivity Analysis of Life Cycle Assessment.
- [43] Kollien J. 2024. Digitale Nachhaltigkeit als Leitmotiv für Kommunikationsplattformen. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [44] Krebs F., Larsen L., Braun G., and Dudenhausen W. 2016. Design of a multifunctional cell for aerospace CFRP production. *Int J Adv Manuf Technol* 85, 1-4, 17–24. DOI: <https://doi.org/10.1007/s00170-014-6022-1>.
- [45] Kropp A. 2019. Grundlagen der Nachhaltigen Entwicklung. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [46] Kuşhan M. C., Gürgen S., and Sofuoğlu M. A. 2022. Materials, Structures and Manufacturing for Aircraft. Springer International Publishing, Cham.
- [47] Lengsfeld H., Lacalle Muerza J., Neumeyer T., and Altstädt V. 2020. Faserverbundwerkstoffe. *Prepregs und ihre Verarbeitung* (2., aktualisierte und erweiterte Auflage). Hanser eLibrary. Hanser, München.
-

- 
- [48] Lopes Silva D. A., Nunes A. O., Piekarski C. M., Da Silva Moris V. A., and Souza L. S. de; Rodrigues. 2019. Why using different Life Cycle Assessment software tools can generate different results for the same product system? A cause–effect analysis of the problem. *Sustainable Production and Consumption* 20, 304–315. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.spc.2019.07.005>.
- [49] M. Alder, E. Moerland, J. Jepsen, and B. Nagel. 2020. Recent Advances in Establishing a Common Language for Aircraft Design with CPACS. *Aerospace Europe Conference 2020*.
- [50] Mazlan N., Sapuan S. M., and Ilyas R. A. 2022. *Advanced Composites in Aerospace Engineering Applications*. Springer International Publishing, Cham.
- [51] Mendoza Beltran A., Prado V., Font Vivanco D., Henriksson P. J., and Guinée J. B; Heijungs. 2018. Quantified Uncertainties in Comparative Life Cycle Assessment: What Can Be Concluded? *Environmental science & technology* 52, 4, 2152–2161. DOI: <https://doi.org/10.1021/acs.est.7b06365>.
- [52] Nguyen C. D., Kromholz C. U., and Ucan H. Vergleich von Legetechnologien für die Automatisierte Glasfaserablage in der Glare-Bauteilfertigung. DLRK2018, Stade.
- [53] Nuzzo R. L. 2016. The Box Plots Alternative for Visualizing Quantitative Data. *PM & R : the journal of injury, function, and rehabilitation* 8, 3, 268–272. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.pmrj.2016.02.001>.
- [54] Pantelakis, S. and Tserpes, K., Eds. 2020. *Revolutionizing aircraft materials and processes*. Springer, Cham.
- [55] Park D.-C., Yu T., Park S.-J., Shin D.-H., and Kim Y.-H. 2021. Improvement of impregnation quality on out-of-autoclave processed CFRP aircraft wing spar through resin flow simulation. *Funct. Compos. Struct.* 3, 2, 25001. DOI: <https://doi.org/10.1088/2631-6331/abf480>.
- [56] Parveez B., Kittur M. I., Badruddin I. A., Kamangar S., and Hussien M; Umar-farooq. 2022. Scientific Advancements in Composite Materials for Aircraft Applications: A Review. *Polymers* 14, 22. DOI: <https://doi.org/10.3390/polym14225007>.
- [57] Pehlken A., Kalverkamp M., and Wittstock R. 2019. *Cascade Use in Technologies 2018*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg.
- [58] Pfingsten S. von. 2021. Uncertainty analysis in matrix-based life cycle assessment.
- [59] Pierrejean E. 2025. JEC Observer - Overview of the global composites market 2024-2029. *JEC Composites Magazine*.
- [60] Potter K. 2006. Methods for presenting statistical information: The box plot.
- [61] Rahn A., Dahlmann K., Linke F., Kühlen M., and Sprecher B; Dransfeld; Wende. 2025. Quantifying climate impacts of flight operations: A discrete-event life cycle assessment approach.
- [62] Robert Samuel Wilson, Mark Anthony Braniff, and William James Trevor Millar. Bagging blanket and method for forming a fibre reinforced composite component.
-

- [63] Ross S. A. and Cheah L. 2019. Uncertainty Quantification in Life Cycle Assessments: Exploring Distribution Choice and Greater Data Granularity to Characterize Product Use. *J of Industrial Ecology* 23, 2, 335–346. DOI: <https://doi.org/10.1111/jiec.12742>.
- [64] Sacchi R., Terlouw T., Siala K., Dirnaichner A., and Bauer C; Cox; Mutel; Daiglou; Luderer. 2022. PRospective EnvironMental Impact asSEment (premise): A streamlined approach to producing databases for prospective life cycle assessment using integrated assessment models. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 160, 112311. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112311>.
- [65] Saltelli A., Annoni P., Azzini I., Campolongo F., and Ratto M; Tarantola. 2010. Variance based sensitivity analysis of model output. Design and estimator for the total sensitivity index. *Computer Physics Communications* 181, 2, 259–270. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cpc.2009.09.018>.
- [66] Samir S., Gewali J. P., Singh T., Debbarma K., and Mazumdar S; Lone; Daniella. 2024. Introduction to Polymer Composites in Aerospace. *CNS&E* 1, 4, 329–339. DOI: <https://doi.org/10.63015/4E-2431.1.4>.
- [67] Schebek L., Herrmann C., and Cerdas F. 2019. Progress in Life Cycle Assessment. Springer International Publishing, Cham.
- [68] Schmitz S. and Paulini I. 1999. Bewertung in Ökobilanzen - Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043 (Version ´99).
- [69] Schürmann H. 2007. Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden. *Mit 39 Tabellen* (2., bearb. und erw. Aufl.). VDI-/Buch]. Springer, Berlin, Heidelberg.
- [70] Scrucca F., Baldassarri C., Baldinelli G., Bonamente E., and Rinaldi S; Rotili; Barbanera. 2020. Uncertainty in LCA: An estimation of practitioner-related effects. *Journal of Cleaner Production* 268, 122304. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.122304>.
- [71] Siggel M., Kleinert J., Stollenwerk T., and Maierl R. 2019. TiGL: An Open Source Computational Geometry Library for Parametric Aircraft Design. *Math.Comput.Sci.* 13, 3, 367–389. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11786-019-00401-y>.
- [72] Song M. 2025. Life Cycle Assessment: Form theory to practice. The Company.
- [73] Steubing B., Koning D. de, Haas A., and Mutel C. L. 2020. The Activity Browser — An open source LCA software building on top of the brightway framework. *Software Impacts* 3, 100012. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.simpa.2019.100012>.
- [74] Talabi S. I., Tobin J., Strom B., Brownstein I., and Kunc V; Hassen. 2024. Recent and future developments in pultrusion technology with consideration for curved geometries: A review. *Composites Part B: Engineering* 283, 111678. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compositesb.2024.111678>.

- 
- [75] Wang T., Huang K., Guo L., Zheng T., and Zeng F. 2023. An automated vacuum infusion process for manufacturing high-quality fiber-reinforced composites. *Composite Structures* 309, 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2023.116717>.
- [76] Wiedemann M. 2022. Systemleichtbau für die Luftfahrt. Springer Fachmedien Wiesbaden, Wiesbaden.
- [77] Witik R. A., Gaille F., Teuscher R., Ringwald H., and Michaud V; Manson. 2012. Economic and environmental assessment of alternative production methods for composite aircraft components. *Journal of Cleaner Production* 29-30, 91–102. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.02.028>.
- [78] Wu M., Sadhukhan J., Murphy R., Bharadwaj U., and Cui X. 2023. A novel life cycle assessment and life cycle costing framework for carbon fibre-reinforced composite materials in the aviation industry. *The international journal of life cycle assessment* 28, 5, 566–589. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11367-023-02164-y>.
- [79] Xu Y., Zhu J., Wu Z., Cao Y., and Zhao Y; Zhang. 2018. A review on the design of laminated composite structures: constant and variable stiffness design and topology optimization. *Adv Compos Hybrid Mater* 1, 3, 460–477. DOI: <https://doi.org/10.1007/s42114-018-0032-7>.
- [80] Vincenzo Nugnes, *EXACT2 Digital Hangar*, 2024

## 8. Anhang

### 8.1. Sachbilanzen der Herstellungsverfahren

#### Sachbilanz vom RTI-Verfahren

	Input/Output	Menge	Einheit	Datenquelle	Anmerkungen
Vorbereitung	Isopropanol	████	kg	[D8]	
	Mold/Form	████	kg	[B1]	
	Trennmittel	████	kg	[D1], [75]	
Ablage	Kohlenstofffasern	████	█	[E1]	Informationen aus CPACS, Annahme eines Verschnitts von 10 %
	Epoxid-Harz	████	████	[E2]	
Vakuumaufbau/Prozessaufbau	Entlüftungsvlies	████	kg	[D3], [75]	Annahme 20 % Verschnitt
	Dichtungsband	████	kg	[D4], [E3]	Annahme doppelter Vakuumaufbau und je 20 % Verschnitt
	Vakuumfolie	████	kg	[D5],	Annahme doppelter Vakuumaufbau und je 20 % Verschnitt
	Vakuumpumpe	████	kWh	[D6], [B3], [E2], [E3]	
	Abfall-Verschnitt	████	kg	[B4]	
Aushärtung	Autoklav	████	kWh	[B5]	Eigene Messungen des DLRs wurde auf dieses Beispiel skaliert
	Stickstoff	5048	kg	[B6]	
Entformung	Abfall-Entformung	████	kg	[B7]	

#### Sachbilanz vom RTM-Verfahren

	Input/Output	Menge	Einheit	Datenquelle	Anmerkungen
Vorbereitung	Isopropanol	████	kg	[D8]	
	Mold/Form	████	kg	[B1]	
	Trennmittel	████	kg	[D1], [75]	
Ablage	Kohlenstofffasern	████	█	[E1]	Informationen aus CPACS, Annahme eines Verschnitts von 10 %
	Epoxid-Harz	████	████	[E2]	

Vakuumaufbau/Prozessaufbau	Dichtungsband	■	kg	[D4], [E3]	Annahme doppelter Vakuumaufbau und je 20 % Verschnitt
	Vakuumpumpe	■	kWh	[D6], [B3], [E2], [E3]	
	Abfall-Verschnitt	■	kg	[B4]	
Aushärtung	Ofen	■	kWh	[B5]	Eigene Messungen des DLRs wurde auf dieses Beispiel skaliert
Entformung	Abfall-Entformung	■	kg	[B7]	

### Sachbilanz vom VAP-Verfahren

	Input/Output	Menge	Einheit	Datenquelle	Anmerkungen
Vorbereitung	Isopropanol	■	kg	[D8]	
	Mold/Form	■	kg	[B1]	
	Trennmittel	■	kg	[D1], [75]	
Ablage	Kohlenstofffasern	■	■	[E1]	Informationen aus CPACS, Annahme eines Verschnitts von 10 %
	Epoxid-Harz	■	■	[E2]	
Vakuumaufbau/Prozessaufbau	Abreißgewebe	■	kg	[D8]	Verschnitt 10 % Verschnitt
	Entlüftungsvlies	■	kg	[D3], [75]	Annahme eines Verschnitts von 20 %
	Vakuumfolie	■	kg	[D5],	Annahme doppelter Vakuumaufbau und je 20 % Verschnitt
	Semi-permeable Membran	■	kg	[D7]	Annahme 20 % Verschnitt
	Dichtungsband	■	kg	[D4], [E3]	Annahme doppelter Vakuumaufbau und je 20 % Verschnitt
	Vakuumpumpe	■	kWh	[D6], [B3], [E2], [E3]	
	Abfall-Verschnitt	■	kg	[B4]	
Aushärtung	Ofen	■	kWh	[B5]	Eigene Messungen des DLRs wurde auf dieses Beispiel skaliert

Entfor- mung	Abfall-Entformung	█	kg	[B7]	
-----------------	-------------------	---	----	------	--

### Sachbilanz vom VARTM-Verfahren

	Input/Output	Menge	Einheit	Datenquelle	Anmerkungen
Vorberei- tung	Isopropanol	█	kg	[D8]	
	Mold/Form	█	kg	[B1]	
	Trennmittel	█	kg	[D1], [75]	
Ablage	Kohlenstofffasern	█	█	[E1]	Informationen aus CPACS, Annahme eines Verschnitts von 10 %
	Epoxid-Harz	█	█	[E2]	
Vakuumaufbau/Prozessaufbau	Abreißgewebe	█	kg	[D8]	Annahme 10 % Verschnitt
	Vakuumfolie	█	kg	[D5],	Annahme doppelter Vaku- umaufbau und je 20 % Verschnitt
	Dichtungsband	█	kg	[D4], [E3]	Annahme doppelter Vaku- umaufbau und je 20 % Verschnitt
	Vakuumpumpe	█	kWh	[D6], [B3], [E2], [E3]	
	Abfall-Verschnitt	█	kg	[B4]	
Aus- här-	Ofen	█	kWh	[B5]	Eigene Messungen des DLRs wurde auf dieses Beispiel skaliert
Entfor- mung	Abfall-Entformung	█	kg	[B7]	

## 8.2. Ecoinvent Datensätze

LCI	Ecoinvent-Datensatz
Isopropanol	Market for isopropanol
Formwerkzeug	Market for steel, unalloyed; market for metal working, average for steel product manufacturing; market for hot rolling, steel
Trennmittel	Market for solvent, organic
Tiefkühlschrank	Market for cooling energy, at -15°C
Kohlenstofffasern	Carbon Fiber, high strength {RER} production  Cut-off, U – esa-Datensatz
Harzsystem	Market for epoxy resin, liquid

---

Prepreg	Carbon Fiber, high strength {RER} production  Cut-off, U – esa-Datensatz; Market for epoxy resin, liquid; market group for electricity, high voltage
Ablege-Roboter	Market group for electricity, low voltage
Entlüftungsvlies	Market for nylon 6-6
Abreißgewebe	Market for nylon 6-6; market for extrusion, plastic film
Dichtungsband	Market group for synthetic rubber
Semi-permeable Membran	Market for nylon 6-6; market for extrusion, plastic film
Vakuumfolie	Market for nylon 6-6; market for extrusion, plastic film
Vakuumpumpe	Market group for electricity, low voltage
Abfall-Verschnitt	Market group for municipal solid waste
Ofen	Market group for electricity, low voltage
Autoklav	Market group for electricity, low voltage
Stickstoff	Market group for electricity, low voltage; market for nitrogen, liquid; market for compressed air, 800 kPa gauge
Abfall-Entformung	Market group for municipal solid waste
Ecoinvent Datensatz zu Vacuum Infusion Moulding	Market for vacuum infusion moulding for composite product

---

### 8.3. Hintergrunddaten für die Sachbilanzen

#### 8.3.1. Datenblätter

- [D1] Produktname: Chemlease® PMR EZ  
 Hersteller: Chem-Trend  
 Datenblatt: [SDS\\_Chemlease\\_PMR\\_EZ\\_111952\\_GB\\_EN.pdf](#)  
 Zugriff: 08.07.2025
- [D2] Produktname: LAUDA Versafreeze VF 70040  
 Hersteller: LAUDA Dr. R. Wobser GmbH & CO. KG  
 Datenblatt: [LAUDA\\_VF70040\\_L003343\\_de\\_20241219\\_101114.pdf](#)  
 Zugriff: 01.08.2025
- [D3] Produktname: CVB190  
 Hersteller: Sky Composites  
 Datenblatt: [Vacuum bagging materials - Sky Composites](#)  
 Zugriff: 01.07.2025
- [D4] Produktname: Sealant Tapes No. 1157  
 Hersteller: AIRTECH  
 Datenblatt: [AIRTECH\\_FS\\_Sealant\\_Tapes\\_MN1027\\_EN.pdf](#)  
 Zugriff: 10.08.2025
- [D5] Produktname: WRIGHTLON®7400  
 Hersteller: AIRTECH  
 Datenblatt: [wrightlon-7400.pdf](#)



### 8.3.3. Berechnungen

#### [B1] Berechnung der Masse der Mold/Form:

Material=Stahl	VARTM	VAP	RTI	RTM	ATL/AFP
Dichte [kg/m <sup>3</sup> ]	7850	7850	7850	7850	7850
Abmaße [m <sup>2</sup> * m]	████████	████████	████████ ████████	████████ ████████	████████
Volumen [m <sup>3</sup> ]	████	████	████	████	████
Gewicht [kg]	████	████	████	████	████
Anzahl der Verwendun- gen	1000	1000	1000	1000	1000
Gewicht für die Betrach- tung [kg]	7,93	7,93	11,89	79,29	7,93

#### [B2] Berechnung des Energieverbrauchs des Tiefkühlschranks:

Volumen vom zu lagernden Prepreg: █████ m<sup>3</sup>

Innenraumvolumen: 731 L = 0,731 m<sup>3</sup>

Energieverbrauch: 8 kWh/d bei -40°C

Lagerzeitraum: 15 Tage

Verbrauch für einen Kühlschrank = 8 kWh/d \* 15 d = 120 kWh

Es werden █████ m<sup>3</sup> / 0,731 m<sup>3</sup> = █████ ≈ █ Tiefkühlschränke benötigt

Gesamtverbrauch: 120 kWh \* █ = █████ kWh

#### [B3] Berechnung des Energieverbrauchs der Vakuumpumpen:

Laut [E3]: █ Vakuumpumpen für den Flügel der A220 (████ m \* █ m)

→ Skalierung auf D369 Flügel (████ m \* █ m), annähernd die doppelten Dimen-  
sionen → doppelte Anzahl der Pumpen (████ Pumpen)

Aus [D5]: Nennleistung = 745 W, Laufzeit = 24 h

Laut [E2]: Energieaufwand = Nennleistung \* Laufzeit \* 0,1 \* Pumpenanzahl

(0,1 als Richtwert, da die Pumpen nur einen Bruchteil der Zeit aus Höchstleistung lau-  
fen)

$$\rightarrow \text{Energieaufwand, Pumpen} = \frac{745}{1000} \text{ kW} * 24 \text{ h} * 0,1 * 10 = 17,88 \text{ kWh}$$

#### [B4] Berechnung Abfall-Verschnitt

ATL/AFP: (Entlüftungsvlies + Vakuumfolie + Prepreg) \* 0,1 =  kg

RTI: (Entlüftungsvlies + Vakuumfolie + Fasern+Harz) \* 0,1 =  kg

RTM: (Fasern+Harz) \* 0,1 =

VAP: (Entlüftungsvlies+ Vakuumfolie +VAP-Membran + Abreißgewebe + Fasern + Harz) \* 0,1 =

VARTM: (Vakuumfolie + Abreißgewebe + Fasern + Harz) \* 0,1 =  kg

#### [B5] Berechnung des Energieverbrauchs des Autoklavs

Aus den Messwerten vom DLR Autoklav mit dem Aushärtungsprozess 1:27 Stunden aufheizen auf 180 °C, Haltephase bei 180 °C für 3:00 Stunden und Abkühlen für 2:53 Stunden ergibt sich ein Energieverbrauch von  kWh.

DLR Autoklav 787,2 m<sup>2</sup>, benötigtes Volumen  m<sup>3</sup>

→ Skalieren: Energieaufwand:  $\frac{\text{ kWh } \cdot \text{ m}^3}{787,2 \text{ m}^2} * \text{ m}^3 = \text{ kWh}$

→ In den Autoklaven können zwei Flügelschalen auf einmal ausgehärtet werden:

$$E_A = \frac{\text{ kWh }}{2} = \text{ kWh}$$

#### [B6] Berechnung der Masse des benötigten Stickstoffs

Ideales Gasgesetz:  $m = \frac{M \cdot p \cdot V}{R \cdot T}$ ,

$$m_N = \frac{M \cdot p \cdot V}{R \cdot T} = \frac{28,0134 \frac{\text{g}}{\text{mol}}}{1000} * 900\,000 \text{ Pa} * 1508,91 \text{ m}^3 = 10097,03 \text{ kg}$$

In den Autoklaven können zwei Flügelschalen auf einmal ausgehärtet werden:

$$m_N = \frac{10097,03 \text{ kg}}{2} = 5048,52 \text{ kg}$$

#### [B7] Berechnung Abfall-Entformung

ATL/AFP: (Entlüftungsvlies + Vakuumfolie + Dichtungsband) \* 0,9 =  kg

RTI: (Entlüftungsvlies + Vakuumfolie + Dichtungsband) \* 0,9 =  kg

RTM: Dichtungsband =  kg

VAP: (Entlüftungsvlies+ Vakuumfolie +VAP-Membran + Abreißgewebe + Dichtungsband) \* 0,9 =  kg

VARTM: (Vakuumfolie + Abreißgewebe + Dichtungsband) \* 0,9 =  kg

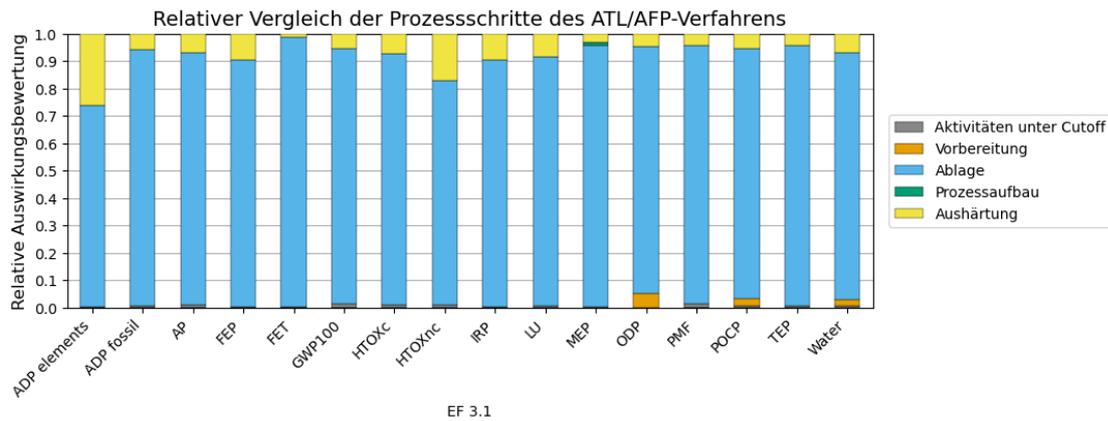
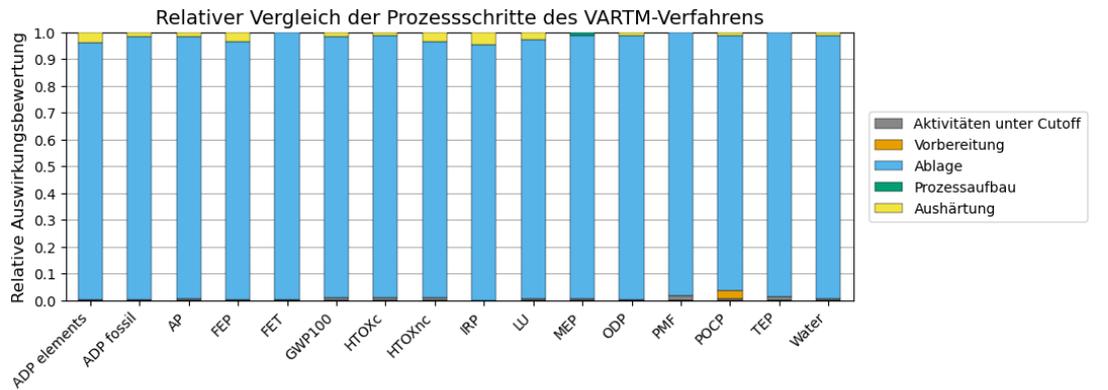
### 8.4. Programmierter Code

Über den folgenden Link ist das Python-Skript auf Git-Lab zu erreichen:

[https://gitlab.dlr.de/fa\\_sw/ecolab\\_students/masterarbeit\\_tenbrock/-/tree/main](https://gitlab.dlr.de/fa_sw/ecolab_students/masterarbeit_tenbrock/-/tree/main)

## 8.5. Ergebnis Grafiken

### 8.5.1. Prozessschritte der Herstellungsverfahren



### 8.5.2. Sobol Indizes

#### 1. Ordnung

#### Totaler Ordnung

