



Technische
Universität
Braunschweig



Deutsches Zentrum
für Luft- und Raumfahrt



Modellierung und ökologische Bewertung der Fertigung einer CFK-Flügelrippe mit Umberto

Masterarbeit

an der Technischen Universität Braunschweig

Verfasser: Sebastian Riech

im Studiengang: Maschinenbau – Master of Science

Matr.-Nr.:4020077

Erstprüfer:

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius

Institut für Adaptronik und Funktionsintegration (IAF), TU Braunschweig

Betreuer:

Dr.-Ing. Henning Schlums

Dr.-Ing. Naser Al Natsheh

Institut für Adaptronik und Funktionsintegration (IAF), TU Braunschweig

Betreuer:

Dipl.-Ing. Philipp Hilmer

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR)

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik (FA), Braunschweig

Bearbeitungszeitraum: 6 Monate

Abgabedatum am: 24.11.2015



Masterarbeit

für

Herrn Sebastian Riech

Matr.-Nr.: 4020077

Thema: Modellierung und ökologische Bewertung der Fertigung einer CFK-Flügelrippe mit Umberto

Umfeld/ Überblick:

Ein zunehmender Bedarf an Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen erfordert den Einsatz angepasster Fertigungsprozesse, die schnell, effizient und ressourcenschonend sein müssen. Das Leichtbaupotenzial von Faserverbundbauteilen und damit einhergehende Kraftstoffeinsparungen während der Nutzungsphase werden zumeist in den Vordergrund gestellt. Entlang des gesamten Lebenszyklus existieren jedoch auch Phasen und Prozesse, die Ressourcen verbrauchen oder die Umwelt belasten können. Dies betrifft insbesondere die Bauteilherstellung und das Lebensende von Faserverbundkomponenten. Zuverlässige computerunterstützte Modelle und Bilanzierungen von Teilprozessen der Fertigung bis hin zu einer vollständigen Ökobilanz sind notwendig, um in der Zukunft Fertigungsverfahren zur Herstellung von Faserverbundbauteilen unter ökologischen Aspekten zu vergleichen und Optimierungspotentiale aufzuzeigen. Auf diese Weise wird es möglich Fertigungsprozesse insbesondere hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz weiterzuentwickeln.

Ziel der Arbeit/ Aufgabenstellung:

Im Rahmen dieser Masterarbeit soll zunächst der Lebenszyklus eines repräsentativen Bauteils aus Faserverbundwerkstoffen dargestellt und eine Literaturrecherche zu ökologischen Bewertungsmethoden sowie deren Computerunterstützung durchgeführt werden. Mit der Ökobilanzierungssoftware Umberto wird im Folgenden ein Prozessmodell mit allen Teilprozessschritten einer seriennahen Fertigung eines komplexen Bauteils aus Faserverbundwerkstoffen erstellt. Der zu betrachtende Fertigungsprozess einer CFK-Flügelrippe im autoklavunterstützten SLI-Verfahren wurde in der Vergangenheit bereits am DLR Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik mit Fertigungszeiten, Material- sowie Energieverbräuchen aufgenommen und in einem MS Excel Modell abgebildet. Das bestehende Modell soll zunächst in Umberto überführt werden, um das Modell anschließend um die in Umberto verfügbaren Vorketten aus der ecoinvent Datenbank zu erweitern.

Nach einem Vergleich der Ergebnisse aus dem vorhandenen MS Excel Modell mit den nun aus Umberto verfügbaren Ergebnissen, sollen die umfangreichen Auswertungsmöglichkeiten von Umberto dargestellt werden.

Folgende Teilaspekte/ Teilaufgaben sind in der Masterarbeit zu behandeln:

- Darstellung des Lebenszyklus eines komplexen Bauteils aus Faser-verbundwerkstoffen nach dem aktuellen Stand der Technik
- Literaturrecherche zu Bewertungsmethoden von Fertigungsprozessen und Produkt-Lebenszyklen unter ökologischen Aspekten sowie deren Computerunterstützung
- Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens mit zu betrachtenden Umweltfaktoren
- Modellierung des Fertigungsprozesses in Umberto mit bestehenden Daten zu Material- sowie Energieverbräuchen aus vorangegangenen Prozessaufnahmen
- Erweiterung des Umberto-Modells um vorgelagerte Prozesse und Materialien aus der softwareintegrierten, kommerziellen Umweltdatenbank „ecoinvent“ für verwendete Hilfs- und Betriebsstoffe, sowie Energieverbräuche
- Auswertung und Vergleich der Kohlenstoffdioxid-Äquivalente sowie weiterer Umweltfaktoren der Umberto-Modelle mit bestehendem Prozessmodell für den Fertigungsprozess
- Darstellung und Diskussion der Ergebnisse
- Zusammenfassung und Dokumentation aller Ergebnisse in Form einer schriftlichen Arbeit und Präsentation im Rahmen eines Vortrags

Die Masterarbeit wird am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR) in Braunschweig durchgeführt. Hierfür können die Einrichtungen und die Software-Lizenzen des DLR-Instituts genutzt werden. Die Betreuung im Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik übernimmt Herr Dipl.-Ing. Philipp Hilmer.

Änderungen der Aufgabenstellung sind nur mit Zustimmung des Institutes möglich.

Hiermit bestätige ich den Empfang der Aufgabenstellung:

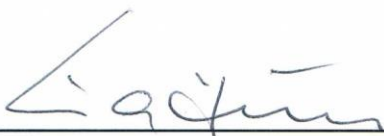


Sebastian Riech

Bearbeitungszeit: 6 Monate

Ausgegeben am: 28.04.2015

Abgegeben am:



Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius



Eidesstattliche Erklärung

Masterarbeit

„Modellierung und ökologische Bewertung der Fertigung einer CFK-Flügelrippe mit Umberto“

von: Sebastian Riech

Matrikelnummer.: 4020077

Ich versichere durch meine Unterschrift an Eides statt, dass ich die Arbeit selbständig und ohne Benutzung anderer als der angegebenen Hilfsmittel angefertigt 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.

Ich weiß, dass bei Abgabe einer falschen Versicherung die Prüfung als nicht bestanden zu gelten hat.

Braunschweig, 24.11.2015

Unterschrift (Sebastian Riech)



Abstract

An increasing demand for components made of fiber composite (fiber reinforced plastics) requires the use of adapted and efficient production processes. Reliable computer-aided models and analyses of the discrete production phases up to a complete life-cycle assessment are necessary to compare manufacturing processes for fiber composites from an ecological perspective. Thereby production processes with a higher resource-efficiency can be developed.

Within this thesis, the life-cycle assessment software Umberto NXT Universal is used for modelling the production process of a complex carbon composite structure using the example of two wing ribs. Based on an Excel model with CO₂-equivalents a reference model is constructed. The results will be compared to the results of a second model using data out of software integrated environmental databases. In addition, other potential environmental effects of processing carbon fibre composites will be investigated with the evaluation method "ReCiPe". Further analysis options with the software Umberto are presented and used.

Key words:

Life-cycle assessment (LCA), global warming potential (GWP), modelling, software Umberto, ReCiPe, carbon fiber reinforced plastic (CRFP), composite



Kurzfassung

Ein zunehmender Bedarf an Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen erfordert den Einsatz angepasster Fertigungsprozesse, die schnell, effizient und ressourcenschonend sein müssen. Zuverlässige computerunterstützte Modelle und Bilanzierungen von Teilprozessen der Fertigung bis hin zu einer vollständigen Ökobilanz sind notwendig, um in der Zukunft Fertigungsverfahren zur Herstellung von Faserverbundbauteilen unter ökologischen Aspekten zu vergleichen und Optimierungspotentiale aufzeigen zu können.

In dieser Masterarbeit wird mit der Ökobilanzierungssoftware Umberto NXT Universal der Herstellungsprozess eines komplexen CFK-Bauteils am konkreten Beispiel zweier Flügelrippen modelliert. Aufbauend auf einem Excel Modell mit CO₂-Äquivalenten wird ein Referenzmodell aufgebaut und dessen CO₂-Äquivalente mit den Ergebnissen verglichen, die unter Zuhilfenahme softwareintegrierter Umweltdatenbanken entstehen. Zusätzlich werden weitere potentielle Umweltwirkungen von CFK mit der Bewertungsmethode „ReCiPe“ dargestellt und die umfangreichen Auswertungsmöglichkeiten der Software Umberto genutzt.



Danksagung

Zuerst möchte ich mich bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius in seiner Funktion als Erstprüfer für die Möglichkeit bedanken, diese Masterarbeit an dem Institut für Adaptronik und Funktionsintegration der Technischen Universität Braunschweig zu schreiben sowie für die persönliche Betreuung.

Besonderer Dank gilt Herrn Philipp Hilmer für seine Betreuung am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des deutschen Zentrums für Luft und Raumfahrt in Braunschweig. Als Ansprechpartner leistete er durch fachliche Unterstützung, Vorschlägen und Anregungen einen wichtigen Beitrag zur dieser Arbeit.

Weiterhin danke ich allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des DLR am Standort in Braunschweig, die mir hilfreich zur Seite standen, insbesondere Herrn Manuel Buggisch und Herrn Ali Mahmood Al-Lami für ihre Zusammenarbeit und Hilfsbereitschaft.

Des Weiteren möchte ich hier meine Dankbarkeit wichtigen Begleitern während meines Studiums und dieser Abschlussarbeit zeigen und somit ihren Anteil zu meinem Studienabschluss würdigen:

„Danke“ sagen möchte ich allen unterstützend wirkenden sowie begleitenden nicht weiter genannten Freunden und Kommilitonen. Im Besonderen möchte ich einerseits meine Mitbewohner Simon und Rebecca sowie meinen ehemaligen Mitbewohner Christian erwähnen. Des Weiteren war für mich mir die freundschaftliche Unterstützung von Dominik, Madeleine, Hinrich, Jan, Dirk und zuletzt auch Fabian sehr wichtig.

Für die Möglichkeit des Studiums und die durchgehende Unterstützung in allen Situationen bin ich meinen Eltern und meiner Schwester zutiefst dankbar.

Abschließend möchte ich noch von ganzem Herzen meiner Freundin Teresa für ihr Verständnis, ihre Zuversicht und viel Geduld – vor allem in der letzten Zeit – bedanken.

Für den erlebten Rückhalt in Höhen und Tiefen gilt ihr und meiner Familie besondere Anerkennung und Dank.

Sebastian Riel

Braunschweig, 24.11.2015

I Inhaltsverzeichnis

I	Inhaltsverzeichnis.....	I
II	Abbildungsverzeichnis.....	IV
III	Tabellenverzeichnis.....	VI
IV	Abkürzungsverzeichnis.....	VII
V	Symbolverzeichnis	IX
1	Einleitung	1
2	Ökologische Aspekte im Produkt-Lebenszyklus eines CFK-Bauteils für den Leichtbau..	4
2.1	Stand der Technik: Methodisches Vorgehen ökologischer Bewertungen mit Softwareunterstützung.....	7
2.2	Stand der Forschung: Ökobilanzierung von CFK-Bauteilen.....	8
2.3	Handlungsbedarf und Forschungshypothese	13
3	Grundlagen zur Modellierung und ökologischen Bewertung mit der Software Umberto.	14
3.1	Methodische Grundlagen einer Ökobilanzierung	14
3.1.1	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	15
3.1.2	Sachbilanz	16
3.1.3	Wirkungsabschätzung	18
3.1.4	Auswertung	20
3.2	Modellierung mit der Software Umberto	20
3.2.1	Modellbegriff und Modellierung.....	21
3.2.2	Theoretischer Hintergrund: Petri-Netze	22
3.2.3	Modellierung mit Stoffstromnetzen in Umberto	24
3.3	Ökologische Bewertungsverfahren.....	28
4	Modellierung und ökologische Bilanzierung der Fertigung von zwei CFK-Flügelrippen in Umberto	35
4.1	Die Flügelrippe als Beispiel eines komplexen CFK-Bauteils	36
4.2	Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens	38
4.3	Sachbilanzierung.....	42

4.3.1	Prozessaufnahme und Datensammlung.....	43
4.3.2	Modellierung eines Grundmodells in Umberto mit Prozessdaten.....	46
4.3.3	Erweiterung des Grundmodells um generische Daten aus der Umweltdatenbank.....	49
4.4	Wirkungsabschätzung mit Aufbau des Referenzmodells	52
5	Ergebnisse aus der ökologischen Bewertung der CFK-Flügelrippen	55
5.1	Vergleich der CO ₂ -Äquivalente zwischen beiden Modellen	55
5.2	Potentielle Umweltwirkungen von CFK aus der Umberto-Modellierung	59
5.2.1	„Verschiebung“ der Auswirkungen zwischen den Teilprozessen	59
5.2.2	Vergleich potentieller Umweltwirkungen zu Aluminium	62
5.3	Szenario zur Steigerung der Öko-Effizienz.....	64
5.4	Einordnung der CO ₂ -Äquivalente mit „Extrem-Szenarien“	66
6	Fazit und kritische Würdigung	70
7	Ausblick.....	74
8	Literaturverzeichnis	76
VI	Anhang.....	81
VI.I	Auszüge aus dem Life Data Sheet zur Herstellung der CFK-Rippen	81
VI.II	Zuschnitt-Abmessungen & Lagenaufbau Rippe 2.....	82
VI.III	Prozessdaten Grundmodell & CO ₂ -Äquivalente Referenzmodell: TP 1 Cutting	83
VI.IV	Prozessdaten Grundmodell & CO ₂ -Äquivalente Referenzmodell: TP 2 Preforming	84
VI.V	Prozessdaten Grundmodell & CO ₂ -Äquivalente Referenzmodell: TP 3 Preparing	85
VI.VI	Prozessdaten Grundmodell & CO ₂ -Äquivalente Referenzmodell: TP 4 Infusion	87
VI.VII	Prozessdaten Grundmodell & CO ₂ -Äquivalente Referenzmodell: TP 5 Tempering.....	88
VI.VIII	Prozessdaten Grundmodell & CO ₂ -Äquivalente Referenzmodell: TP 6 Demolding.....	89
VI.IX	Simulation eines Zuschnitts mit Rollenbreite 1270 mm.....	90
VI.X	Darstellung Grund- und Referenzmodell: TP 1 Cutting.....	91
VI.XI	Darstellung Grund- und Referenzmodell: TP 2 Preforming.....	92
VI.XII	Darstellung Grund- und Referenzmodell: TP 3 Preparing.....	93
VI.XIII	Darstellung Grund- und Referenzmodell: TP 4 Infusion.....	94
VI.XIV	Darstellung Grund- und Referenzmodell: TP 5 Tempering & TP 6 Demolding.....	95

VI.XV	UDF des Grund- und Referenzmodells.....	96
VI.XVI	Übersicht Aufbau und verwendete Materialien bei einer Vakuuminfusion.....	102
VI.XVII	Verwendete Vorketten & Vergleich der CO ₂ -Äquivalente: TP 1 Cutting	103
VI.XVIII	Verwendete Vorketten & Vergleich der CO ₂ -Äquivalente: TP 2 Preforming ...	104
VI.XIX	Verwendete Vorketten & Vergleich der CO ₂ -Äquivalente: TP 3 Preparing	105
VI.XX	Verwendete Vorketten & Vergleich der CO ₂ -Äquivalente: TP 4 Infusion.....	107
VI.XXI	Verwendete Vorketten & Vergleich der CO ₂ -Äquivalente: TP 5 Tempering	108
VI.XXII	Verwendete Vorketten & Vergleich der CO ₂ -Äquivalente: TP 6 Demolding ...	109
VI.XXIII	Darstellung Vorkettenmodell: TP 1 Cutting.....	110
VI.XXIV	Darstellung Vorkettenmodell: TP 2 Preforming.....	111
VI.XXV	Darstellung Vorkettenmodell: TP 3 Preparing – Oberer Ausschnitt.....	112
VI.XXVI	Darstellung Vorkettenmodell: TP 3 Preparing – Unterer Ausschnitt.....	113
VI.XXVII	Darstellung Vorkettenmodell: TP 4 Infusion.....	114
VI.XXVIII	Darstellung Vorkettenmodell: TP 5 Tempering.....	115
VI.XXIX	Darstellung Vorkettenmodell: TP 6 Demolding	116
VI.XXX	UDF des Vorkettenmodells.....	117
VI.XXXI	Informationen zum GaBi-Datensatz der Kohlenstofffasern	123
VI.XXXII	Prozentuale Verteilung der Umweltindikatoren METP & WDP.....	124
VI.XXXIII	Modellierung des Referenzbauteils aus Aluminium.....	125
VI.XXXIV	Ergebnisse von AI und CFK aus den Wirkungsindikatoren der Methode „ReCiPe“ 126	
VI.XXXV	Simulation eines Zuschnitts mit Rollenbreite 1500 mm.....	127

II Abbildungsverzeichnis

Abbildung 1-1: Entwicklung des globalen ökologischen Fußabdruckes (Reinhardt 2013, S. 2)	1
Abbildung 2-1: Vereinfachter Lebenszyklus eines Produkts (in Anlehnung an Klöpffer, Grahl 2009, S. 3 sowie Ehrenberger et al. 2013, S. 728)	4
Abbildung 2-2: Qualitative Darstellung der Umweltwirkung – Leichtbau aus Lebenszyklus Sicht (in Anlehnung an Leohold 2011, S. 34 sowie Deng 2014, S. 19).....	6
Abbildung 2-3: Vereinfachter Lebensweg & Wertschöpfungskette eines endlosfaserverstärkten Composite Bauteils (in Anlehnung an Deng 2014, S. 5 sowie Lässig et al. 2012, S. 10).....	8
Abbildung 2-4: Einordnung wesentlicher Herstellungsverfahren endlosfaserverstärkter Composite-Bauteile nach der Bauteilgeometrie (Lässig et al. 2012, S. 11)	10
Abbildung 2-5: Literaturwerte - Treibhausgas- Emissionen bei der Herstellung von CFK- Bauteilen [kg CO ₂ -eq.]	11
Abbildung 3-1: Rahmen und Phasen einer Ökobilanz (nach DIN EN ISO 14040 2006, S. 16)	15
Abbildung 3-2: Prozessmodul ohne Koppelproduktion (Klöpffer, Grahl 2009, S. 67).....	17
Abbildung 3-3: Modellbegriff und Modellbildungsprozess (in Anlehnung an Lambrecht 2011, S. 13 sowie Krcmar 2015, S. 32)	21
Abbildung 3-4: Exemplarische Darstellung eines Stellen-Transitions-Netzes; links vor und rechts nach einem Schaltvorgang (Becker et al. 2009, S. 79).....	22
Abbildung 3-5: Elemente eines Stoffstromnetzes in Umberto (Dyckhoff, Souren 2008, S. 172)	25
Abbildung 3-6: Zusammenhang zwischen Midpoint- und Endpoint- Bewertungsansätzen (in Anlehnung an Goedkoop et al. 2013, S. 2 sowie Klöpffer, Grahl 2009, S. 224).....	29
Abbildung 3-7: Zusammenhang der 18 midpoint-Indikatoren (mittig) und 3 endpoint- Indikatoren (rechts) in der Bewertungsmethode „ReCiPe 2008“ (Goedkoop et al. 2013, S. 3)	33
Abbildung 4-1: Struktur und wesentliche Inhalte der Abschnitte 4.2-4.4 in Kapitel 4	35
Abbildung 4-2: Rippe 2 & 3 im LOCOMACHS-Flügelkasten	36

Abbildung 4-3: Rippe 2 als Beispiel eines komplexen CFK-Bauteils	37
Abbildung 4-4: Hierarchische Ebenen in Wertschöpfungsketten und ihr Einfluss auf die Energieeffizienz (Heinemann et al. 2013, S. 279).....	40
Abbildung 4-5: Systemgrenzen im Lebenszyklus und Untergliederung der Fertigung in Teilprozesse	41
Abbildung 4-6: Ausschnitt aus dem Grund- und Referenzmodell in Umberto - Teilprozess 1 Cutting.....	48
Abbildung 4-7: Berücksichtigung von Vorketten in der Sachbilanz über generische Datensätze (in Anlehnung an Klöpffer, Grahl 2009, S. 133).....	50
Abbildung 5-1: Vergleich der CO ₂ -Äquivalente zwischen dem Vorketten- und dem Referenzmodell (fE 10kg).....	56
Abbildung 5-2: Vergleich des Vorketten- und des Referenzmodells mit C-Faser-Werten von 20,12 & 50 kg (fE 10kg).....	58
Abbildung 5-3: Prozentuale Verteilung der CO ₂ -Äquivalente auf die Teilprozesse nach dem GWP ₁₀₀	60
Abbildung 5-4: Prozentuale Verteilung der 1,4-DCB-Äquivalente auf die Teilprozesse nach dem HTP	61
Abbildung 5-5: Vergleich der CO ₂ -Äquivalente aus der Herstellung eines Bauteils aus CFK und Aluminium.....	63
Abbildung 5-6: Verschnitt-Optimierungen (VO) bei dem Vorkettenmodell mit C-Faser-Werten von 20,12 & 50 kg (fE 10kg)	65
Abbildung 5-7: Vergleich der „Extremszenarien“ zu Literaturquellen (fE 1 kg).....	68

III Tabellenverzeichnis

Tabelle 2-1: Quellen und Erläuterungen zu den Literaturwerten in Abbildung 2-5	11
Tabelle 3-1: Prinzip der Klassifizierung und Charakterisierung in der Wirkungsabschätzung (in Anlehnung an Klöpffer, Grahl 2009, S. 206).....	19
Tabelle 3-2: Übersicht der 18 Wirkungskategorien auf Midpoint-Ebene in der Bewertungsmethode „ReCiPe“ (vgl. Goedkoop et al. 2013, S.7)	31
Tabelle 4-1: Exemplarischer Ausschnitt der Prozessdaten: TP 1 Cutting	44
Tabelle 4-2: Exemplarischer Ausschnitt zur Berechnung des LCIA-Faktors für das Referenzmodell	53
Tabelle 5-1: „Positives und negatives Extremszenario“ aus den Modellvarianten	67

IV Abkürzungsverzeichnis

Al	Aluminium
CAD	rechnerunterstütztes Konstruieren (engl. computer-aided design)
C	Kohlenstoff
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CML	Institut für Umweltwissenschaften, Universität Leiden, Niederlande
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
CO ₂ -Eq.	Kohlenstoffdioxid-Äquivalent (engl. equivalent)
DCB	Dichlorbenzol
DE	Deutschland (Bezugsregion generischer Daten)
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt
el.	elektrisch
EoL	Lebensende (engl. End of Life)
fE	funktionelle Einheit
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
GLO	Globale Welt (Bezugsregion generischer Daten)
GWP	Treibhauspotential (engl. global warming potential)
GWP ₁₀₀	Wirkungsindikator „Global Warming Potential“ bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren
ID	Identifikator/ Kennung
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg
ifu	Institut für Umweltinformatik Hamburg
KEA	Kumulierter Energieaufwand
LCA	ökologische Lebenszyklusanalyse (engl.: Life Cycle Assessment)
LCC	Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life Cycle Costing)

LCSA	lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsanalyse (engl. Life Cycle Sustainability Assessment)
LCIA	Wirkungsabschätzung (engl. Life Cycle Impact Assessment)
LDS	(begleitendes) technisches Datenblatt (engl. life data sheet)
LOCOMACHS	Low Cost Manufacturing and Assembly of Composite and Hybrid Structures
P	Stelle (engl. place; in Abbildungen der Software Umberto)
PRé	Pré Consultants, Amersfoort, Niederlande
Prepreg	vorimprägniertes Faserhalbzeug (engl. pre-impregnated)
RIVM	niederländisches Institut für Gesundheit und Umwelt
RER	Region Europa (Bezugsregion generischer Daten)
RM	Referenzmodell
RTM	Harzinjektionsverfahren (engl. resin transfer molding)
RUN	Radboud Universität Nijmegen, Niederlande
S	Stelle
SLCA	produktbezogene Sozialbilanz (engl. social Life Cycle Assessment)
SLI	Infusionsverfahren mit nur einer Zuleitung (engl. single line injection)
SMC	Formpress-Verfahren (engl. Sheet molding compound)
T	Transition
TGA	technische Gebäudeausstattung
therm.	thermisch
TP	Teilprozess
UDF	benutzerdefinierte Funktion (engl. user defined function)
VM	Vorkettenmodell
VO	Verschnitt-Optimierung

V Symbolverzeichnis

Lateinische Symbole

E Gesamtenergie eines Systems

1 Einleitung

„Wenn die Welt, in der knapp sieben Milliarden Menschen leben, drei- oder 300-mal größer wäre, würden wir dieses Buch nicht schreiben. Aber sie ist so klein, wie sie ist. Entweder lernt die Menschheit, ihr Wissen und ihre Fähigkeiten dieser Begrenzung anzupassen und *nachhaltig* mit der Erde umzugehen, oder die Umwelt schlägt zurück [...]“ (von Weizsäcker et al. 2010, S. 11).

Mit diesem zugegeben populistisch wirkenden Zitat wird dennoch treffend auf die Relevanz bzw. Notwendigkeit des Umweltschutzes und der Ressourcenschonung als Lebensgrundlage sowie potentieller Gefahren einer Überbeanspruchung der Umwelt hingewiesen. Dahinter steht die Erkenntnis, dass die natürliche Lebensgrundlage (natürliche Ressourcen der Erde) zunehmend über ihre Regenerationsfähigkeit hinaus genutzt wird (vgl. ebd. sowie Reinhardt 2013, S. 1).

Dies lässt sich am Beispiel der Entwicklung des globalen ökologischen Fußabdruckes (Abbildung 1-1) veranschaulichen. Dabei ist der ökologische Fußabdruck ein Maß für die menschliche Inanspruchnahme der Biokapazität der Erde und spiegelt biologisch produktive und für die Aufnahme von Abfällen und Emissionen benötigte Fläche wieder (vgl. Reinhardt 2013, S. 2). Dieser Einschätzung folgend wurde bereits im Jahr 2010 die Erde um das 1,5-Fache überbeansprucht (vgl. ebd.). Unter Beibehaltung aktueller Konsum- und Produktionsgewohnheiten der Weltbevölkerung wird sich das Verhältnis bis zum Jahr 2050 auf das 2,8-Fache verschlechtern (vgl. ebd.).

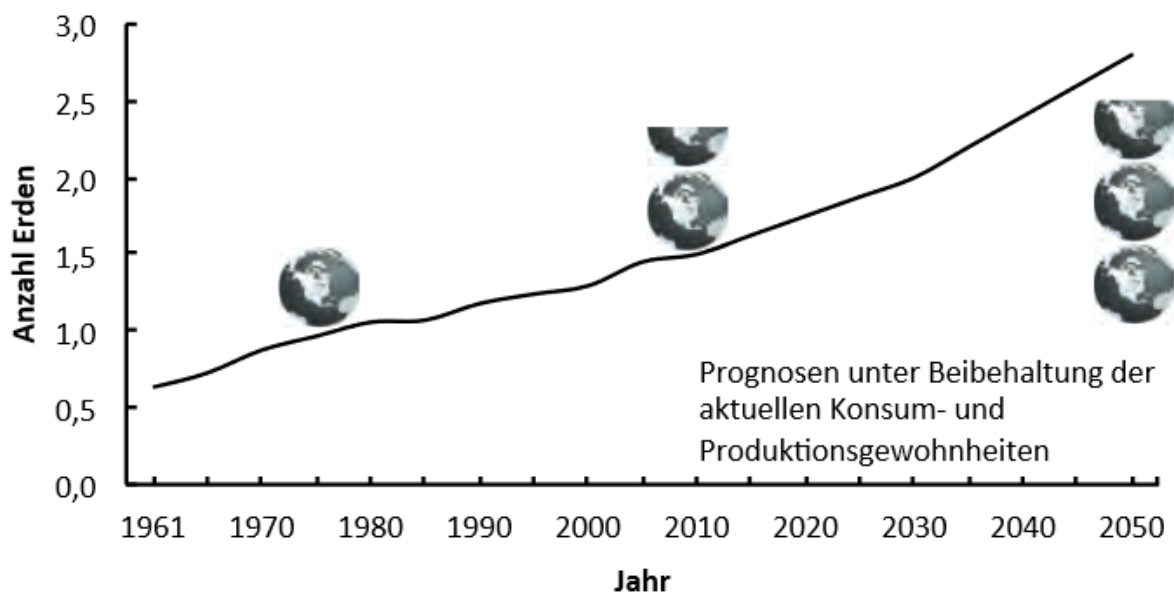


Abbildung 1-1: Entwicklung des globalen ökologischen Fußabdruckes (Reinhardt 2013, S. 2)

Ein nachhaltiger Umgang – wie im Zitat gefordert – bedeutet die Bedürfnisse heutiger Generationen zu befriedigen, ohne die Möglichkeiten zukünftiger Generationen zu beeinträchtigen. Er berücksichtigt sowohl ökologische und ökonomische als auch soziale Aspekte. Einen nachhaltigen Weg zu bestreiten, erfordert angesichts ansteigender Zahlen der Weltbevölkerung neben weiteren Veränderungen insbesondere technologische Innovationen zur effizienten Nutzung von natürlichen Ressourcen und die Minimierung von schädlichen Umwelteinflüssen (vgl. Reinhardt 2013, S. 1ff. sowie Herrmann 2010, S. 1).

Im Bereich der Werkstoff- und Fertigungstechnik werden dazu Materialien für gewichtsoptimierte Bauteilstrukturen entwickelt. Klassische Konstruktionswerkstoffe scheinen dabei immer häufiger an ihre Grenzen zu stoßen. Als Hoffnungsträger im Leichtbau gilt hierbei insbesondere der Werkstoff CFK mit sehr hohen spezifischen Materialeigenschaften. Aber auch neue Konstruktionsfreiräume und Möglichkeiten zur Funktionsintegration erhöhen das Leichtbaupotential, sodass der Werkstoff CFK in den Segmenten Automobil- und Luftverkehr sowie Windenergie vermehrt angewendet wird. Auch für die Zukunft wird von einer steigenden Nachfrage nach CFK ausgegangen (vgl. Eickenbusch, Krauss 2014, S. 6 sowie Lässig et al. 2012, S. 22ff.). Sowohl Gesetze zur Reduzierung von Schadstoffemissionen als auch ein steigendes ökologisches Bewusstsein oder Imagegründe auf Seiten der Hersteller fördern diesen Trend.

Bei der Verwendung von CFK werden dabei vor allem die mit dem Leichtbaupotential einhergehenden Kraftstoffeinsparungen während der Nutzungsphase eines Automobils oder eines Flugzeuges in den Vordergrund gestellt. Entlang des gesamten Lebenszyklus existieren jedoch auch Phasen und Prozesse, die vermehrt Ressourcen verbrauchen und die Umwelt belasten. Dies betrifft insbesondere die ressourcenintensive Herstellung kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe.

Zuverlässige, computerunterstützte Modelle und Bilanzierungen von Teilprozessen der Fertigung bis hin zu einer vollständigen Ökobilanz sind notwendig, um in der Zukunft Fertigungsverfahren zur Herstellung von Faserverbundbauteilen unter ökologischen Aspekten zu vergleichen. Auf diese Weise wird es möglich, die Fertigungsprozesse von Faserverbundbauteilen hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz weiterzuentwickeln.

Die vorliegende Arbeit setzt an dieser Stelle mit einer computerunterstützten Modellierung der Fertigung einer CFK-Flügelrippe und der ökologischen Bewertung mit der Ökobilanzierungssoftware Umberto NXT Universal an. Aufbauend auf einem Excel Modell mit CO₂-Äquivalenten verfolgt diese Arbeit das Ziel, ein Referenzmodell aufzubauen und dessen CO₂-Äquivalente mit den Ergebnissen zu vergleichen, die unter Zuhilfenahme softwareintegrierter Umweltdatenbanken (Vorkettenmodell) entstehen.

Zusätzlich werden weitere potentielle Umweltwirkungen von CFK dargestellt und umfangreiche Auswertungsmöglichkeiten der Software Umberto genutzt. Nachfolgend wird der Aufbau bzw. die Struktur der Arbeit erläutert.

In Kapitel 2 wird weitergehend in die Thematik eingeführt, der gegenwärtige Stand der Technik beim methodischen Vorgehen zu einer ökologischen Bewertung sowie der Stand der Forschung zur Ökobilanzierung von CFK-Bauteilen dargestellt. Hieraus ergeben sich der Handlungsbedarf und die Formulierung der Forschungshypothese.

Die Grundlagen zum methodischen Vorgehen nach der Norm zur Ökobilanzierung, zu der Modellierung mit der Software Umberto sowie zu ökologischen Bewertungsverfahren werden in Kapitel 3 erläutert

Mit Kapitel 4 beginnt die praktische Anwendung an dem konkreten Beispiel der Herstellung der CFK-Flügelrippen. Innerhalb der einzelnen Abschnitte des Kapitels, die dem Ablauf der Norm der Ökobilanzierung entsprechen, findet der Aufbau der zwei unterschiedlichen Modelle statt und wird erläutert. Die Auswertung und Diskussion der Ergebnisse folgt in Kapitel 5.

In Kapitel 6 werden die Ergebnisse zu einem Fazit kurz zusammengefasst und in Bezug zur formulierten Forschungshypothese kritisch gewürdigt. Die Arbeit schließt in Kapitel 7 mit einem Ausblick auf die Möglichkeiten zu weiterführenden Untersuchungen ab.

Der Lebensweg eines Produktes endet nach der Nutzungsphase mit einer „End-of-Life“-Behandlung (EoL), durch die ein Produkt auf verschiedene Art und Weise weiter verwertet werden kann oder entsorgt werden muss. Dabei ist im Sinne der Nachhaltigkeit das Beseitigen durch Verbrennen oder das Nicht-Nutzen durch Deponieren zu vermeiden. Mit Recycling oder anderen Aufbereitungsmethoden ist eine Zyklusstruktur und somit ein Materialkreislauf anzustreben, sodass genutzte Rohstoffe oder Halbzeuge ökologisch sinnvoll in den Herstellungsprozess zurückgeführt werden. Zwischen den einzelnen Phasen liegende Transportprozesse sind in der Abbildung nur einmal angedeutet (vgl. ebd., S. 457f. sowie Ehrenberger et al. 2013, S. 727f.). Entlang des **gesamten Lebenszyklus** eines Produkts kommt es dabei zu **Auswirkungen auf die Umwelt** (vgl. Herrmann 2010, S. 150).

Für die Entwicklung sparsamerer Verkehrs- und Transportmittel, wie Flugzeuge oder Automobile, werden zunehmend die Vor- und Nachteile verschiedener Leichtbaumaterialien diskutiert (vgl. Ehrenberger et al. 2013, S. 727). Dabei besitzen auf Grund ihrer Eigenschaften faserverstärkte Kunststoffe (FVK) mit Kohlenstoffasern als Verstärkungskomponenten das größte Leichtbaupotential. Dieser Carbonfaserverstärkter Kunststoff (CFK) wird als das wichtigste Material im Leichtbau zur Substituierung konventioneller Materialien wie Stahl und Aluminium angesehen. Dazu werden in der Literatur je nach Anwendungsfall Gewichtseinsparungen um bis zu 80% gegenüber Stahl und um bis zu 50% gegenüber Aluminium angegeben (vgl. Neitzel et al. 2014, S.14).

Im **Leichtbau** werden folglich **Treibstoffeinsparungen während der Nutzungsphase** angestrebt und in der aktuellen Diskussion häufig in den Vordergrund gestellt. Im Automobil- und Flugzeugbau führt die Einsparung bewegter Massen zu einem geringeren Kraftstoff- bzw. Kerosinverbrauch. Beispielsweise bewirkt die Verminderung der Strukturmasse eines Mittelstreckenflugzeuges um ein Kilogramm eine Treibstoffersparnis von bis zu 2000 Liter Kerosin über das gesamte Flugzeugleben (vgl. ebd., S. 5). Des Weiteren führen geringere Verbrauchswerte auch zu geringeren Schadstoff-Emissionen aus diesen Verbrennungsprozessen, sodass in der Nutzungsphase eines Transportmittels das Klima entlastet und fossile Ressourcen geschont werden (vgl. ebd., S. 8 & 14 sowie Ehrenberger et al. 2013, S. 727).

Abbildung 2-2 soll die bessere Umweltwirkung einer leichteren Struktur aus CFK gegenüber Stahl in der Nutzungsphase durch die geringere Steigung der Umweltbelastung bezogen auf die Nutzungsdauer qualitativ skizzieren. Beispielsweise sind bei in Leichtbauweise hergestellten Produkten die Schadstoffemissionen in CO₂-Äquivalenten (CO₂-eq.) pro Kilometer Laufleistung geringer.

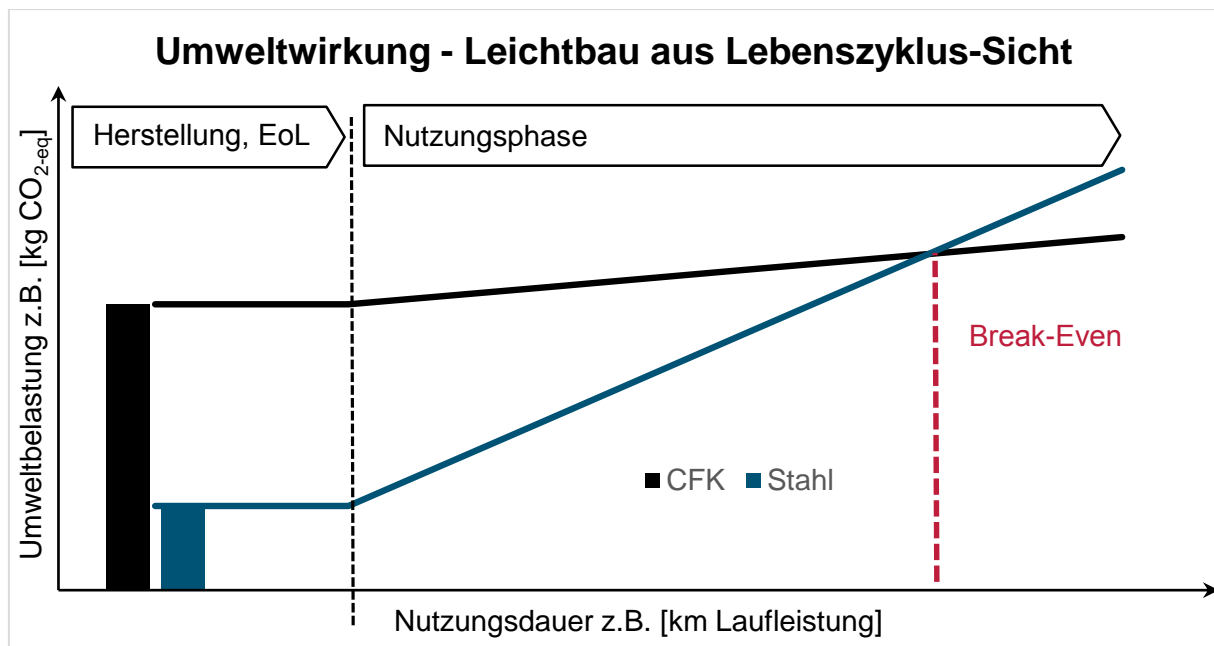


Abbildung 2-2: Qualitative Darstellung der Umweltwirkung – Leichtbau aus Lebenszyklus Sicht (in Anlehnung an Lehold 2011, S. 34 sowie Deng 2014, S. 19)

Allerdings unterscheiden sich Leichtbaumaterialien aus ökologischer Sicht in ihrer Herstellung und Verwertung maßgeblich von den herkömmlichen Materialien, wie zum Beispiel Stahl im Automobilbau, und sind in der Regel mit einem deutlich **höheren Produktions- und Entsorgungsaufwand** verbunden. Dies betrifft insbesondere die Bauteilherstellung und das Lebensende von **Faserverbundkomponenten** und soll in der Abbildung 2-2 durch die qualitativ deutlich höhere Umweltbelastung in den Phasen zur Herstellung und End-of-Life-Behandlung ausgedrückt werden (vgl. Ehrenberger et al. 2013, S. 727 sowie Neitzel et al. 2014, S. 457f.).

Damit einher geht auch eine Verschiebung der Emissionen bzw. Umweltbelastung von der Nutzungsphase in andere Phasen des Lebenszyklus. Der Punkt in der Nutzungsphase, in der sich in Abbildung 2-2 beide Geraden schneiden, wird auch als „break-even“-Punkt (Nutzenschwelle) bezeichnet und repräsentiert den Zeitpunkt in der Nutzungsphase, ab dem der Leichtbau in der Summe positivere Umweltbilanz über den gesamten Lebenszyklus besitzt und sich somit eine leichtere Struktur aus ökologischer Sicht „lohnt“. Folglich reicht nur die Betrachtung der reinen Nutzungsphase nicht aus, um Aussagen über den ökologischen Vorteil eines Leichtbauteils zu treffen. Für eine fundierte Aussage über die ökologische Vorteilhaftigkeit verschiedener Werkstoffe muss vielmehr eine **ganzheitliche Betrachtung** des Lebensweges erfolgen und die Umweltwirkungen eines Produktes während des **gesamten Lebenszyklus systematisch analysiert werden** (vgl. ebd.; Ehrenberger et al. 2013, S. 727; Lehold 2011, S. 34 sowie Deng 2014, S. 18ff.). Dazu wird im folgenden Abschnitt der aktuelle Stand der Technik zum methodischen Vorgehen erläutert.

2.1 Stand der Technik: Methodisches Vorgehen ökologischer Bewertungen mit Softwareunterstützung

Für die Ermittlung und Bewertung potenzieller Umweltwirkungen eines Produkts existieren generell verschiedene Verfahren und Methoden (vgl. Herrmann 2010, S. 151 sowie Walther 2010, S. 59). Eine systematische Methode ist die genormte **Ökobilanzierung DIN EN ISO 14040 und 14044**, die „die einzig international genormte Methode zur Analyse der Umweltaspekte und potentiellen Wirkungen von Produktsystemen“ ist (Klöpffer, Grahl 2009, S. 17). Diese Norm spielt daher nicht nur eine wesentliche Rolle im Bereich der ökologieorientierten Lebensweganalysen, sondern spiegelt durch ihr Alleinstellungsmerkmal in der Anwendung den aktuellen Stand der Technik zur ökologischen Bewertung und der Ableitung potenzieller Umweltwirkungen von Produkten wieder. Auf Grund der Relevanz dieser Methode wird sich im weiteren Verlauf der Arbeit an der Norm zur Ökobilanzierung orientiert und im Kapitel 3.1 die Grundlagen zu dem methodischen Vorgehen nach DIN EN ISO 14040 erläutert.

Um ein Produktionssystem mit seinen vielfältigen Abhängigkeiten zu beschreiben und zu analysieren, werden häufig Modelle verwendet (vgl. Lambrecht 2011, S. 10). Für die Modellierung und zur Unterstützung im Umgang mit den Datenmengen aus der Vielzahl an beteiligten Prozessschritten sowie umfangreichen Lebenszyklen komplexer Produkte werden computerunterstützte Werkzeuge eingesetzt. Es existieren verschiedene Softwarelösungen, wobei die **Software Umberto NXT** als **marktführend** in dem Bereich zur Stoffstromanalyse und Ökobilanzierung angesehen wird (vgl. Lüdemann, Feig 2014, S. 4 & 15). Zur Vollständigkeit werden an dieser Stelle die weiteren in diesem Bereich gängigen und kommerziellen Programme GaBi und SimaPro genannt. Ein ausführlicher Vergleich verschiedener Softwarelösungen (auch frei bzw. kostenlos erhältliche Software) für die Ökobilanzierung findet sich bei LÜDEMANN & FEIG 2014. Die Software Umberto wurde vom ifu-Institut für Umweltinformatik Hamburg und dem ifeu-Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg zusammen entwickelt und wird im Kapitel 3.2 grundlegend beschrieben (vgl. Schmidt, Keil 2002, S. 35).

Neben vielfältigen Anwendungsfällen in unterschiedlichen Bereichen wird die Methode der Ökobilanzierung mit entsprechender Computer- bzw. Softwareunterstützung auch aktuell in der Forschung für Life-Cycle-Assessments von CFK-Bauteilen bzw. als Entscheidungshilfe im Leichtbau eingesetzt, um verschiedene Leichtbauwerkstoffe und –Bauteilen über den gesamten Lebenszyklus ökologisch zu bewerten (vgl. Ehrenberger et al. 2013, S. 727f.).

Im dazu nun folgenden Abschnitt 2.2 wird der aktuelle Stand der Forschung aus der Literatur zur Ökobilanzierung von CFK-Bauteilen wiedergespiegelt.

2.2 Stand der Forschung: Ökobilanzierung von CFK-Bauteilen

Für die ökologische Bewertung von CFK-Bauteilen ist in Abbildung 2-3 der vereinfachte Lebensweg eines Bauteils aus Verbundwerkstoff (engl. composite) dargestellt. Diese Abwandlung des allgemeinen Produktlebenszyklus ist in der Literatur bei der ökologischen Betrachtung von Composites zu finden. Er besteht aus den Phasen zur Herstellung der Fasern & Matrix, der Herstellung des Verbund-Bauteils, der Nutzungsphase und schließt mit entsprechenden End-of-Life-Behandlungen ab. Am Lebensende werden CFK-Bauteile verbrannt, einer Deponie zugeführt oder zu verkürztem Fasermaterial recycelt. Entlang der verschiedenen Lebensphasen kommt es dabei zu Ressourcenverbräuchen und Emissionen, die mit potentiellen Auswirkungen auf die Umwelt verbunden sind (vgl. Deng 2014, S. 5 sowie Herrmann 2010, S. 150).

In einigen Publikationen sind ökologische Betrachtung der weiteren Lebensphasen zur Nutzung und zu verschiedenen End-of-Life- Verwertungen zu finden. Dazu wird an dieser Stelle auf weiterführende Literatur¹ verwiesen. Im Rahmen dieser Arbeit steht dagegen die Herstellung eines CFK-Bauteils (in Abbildung 2-3 blau umrandet) im Fokus und wird im Folgenden näher betrachtet.

Vereinfachter Lebensweg & Wertschöpfungskette eines endlosfaserverstärkten Composite Bauteils

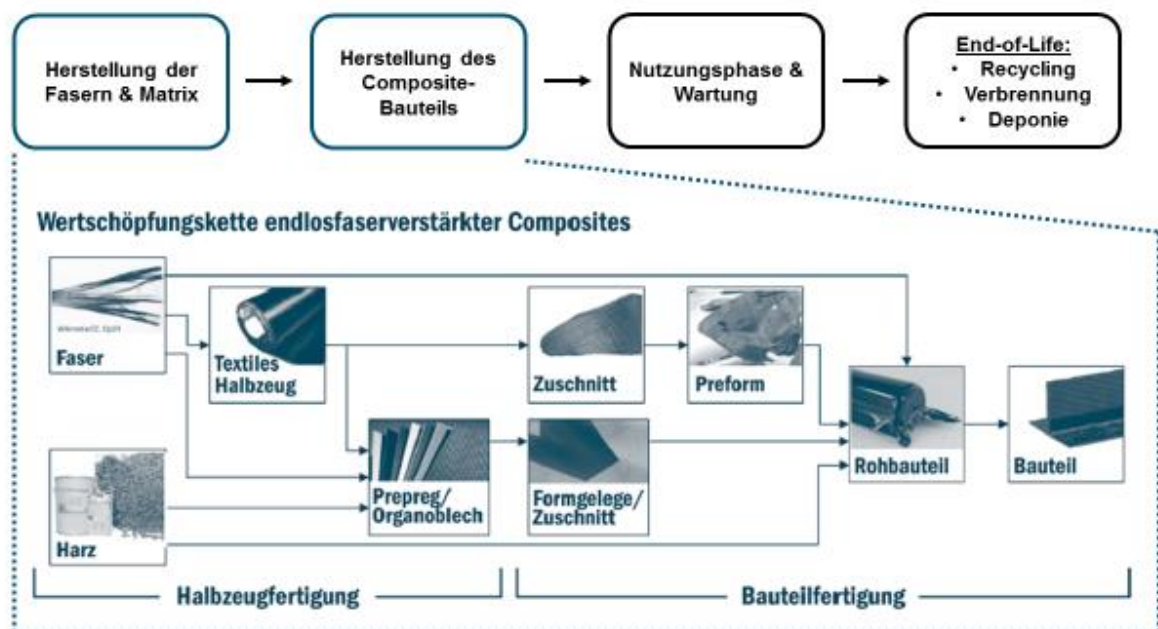


Abbildung 2-3: Vereinfachter Lebensweg & Wertschöpfungskette eines endlosfaserverstärkten Composite Bauteils (in Anlehnung an Deng 2014, S. 5 sowie Lässig et al. 2012, S. 10)

¹ Literaturbeispiele: Achternbosch et al. 2003; Das 2011; Deng 2014; Duflou et al. 2012; Engels et al. 2012; Witik et al. 2011 sowie Witik et al. 2012

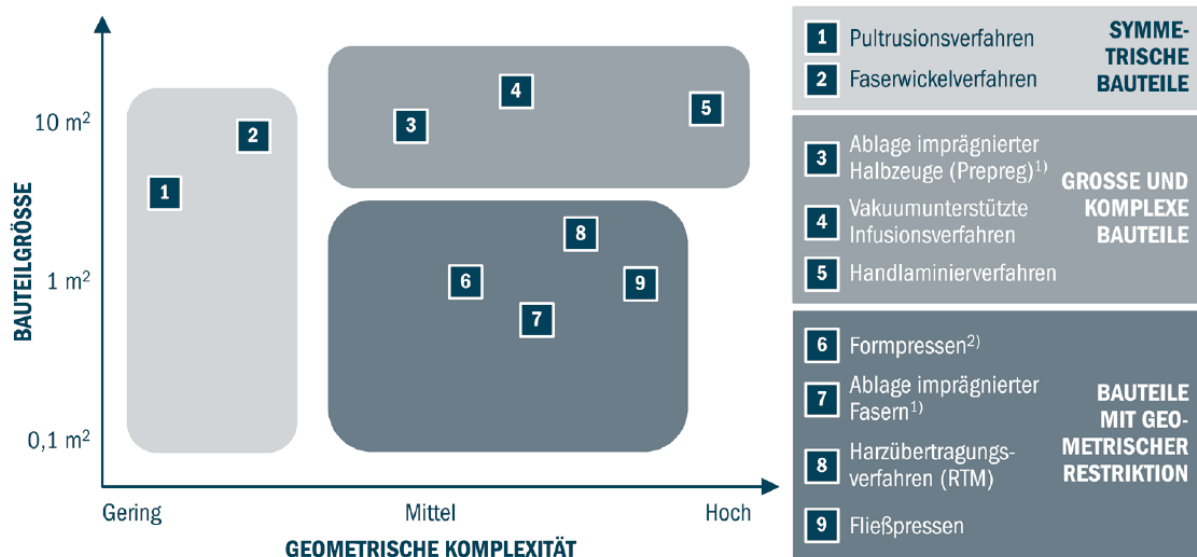
Zunächst ist zu FVK zu erwähnen, dass es den „einen“ faserverstärkten Kunststoff als Werkstoff nicht gibt, sondern es sich dabei eher um eine Werkstoffgruppe mit einer Vielzahl an Varianten handelt (vgl. Neitzel et al. 2014, S. 462).

Neben vielen Parametern zu den Materialeigenschaften selbst existiert auch eine Vielzahl an verschiedenen Prozessketten, Verfahren sowie Verfahrensvarianten zur Erzeugung eines finalen Verbundbauteils aus Fasern und Harz-Matrix (vgl. Lässig et al. 2012, S. 10).

Abbildung 2-3 zeigt weiterhin als Untergliederung der beiden Phasen zur Herstellung eines Composite-Bauteils die Wertschöpfungskette für endlosfaserverstärkter Composite-Bauteile mit grundsätzlich verschiedenen Prozessketten. Zum Einen gibt es die Möglichkeit, Faser und Matrix z.B. durch Wickelverfahren direkt zum Rohbauteil zu verarbeiten (vgl. Lässig et al. 2012, S. 10).

Häufiger werden allerdings die Fasern auf der anderen Seite zu Halbzeugen weiterverarbeitet. Dabei existieren reine textile Halbzeuge, wie zum Beispiel Faser-Gelege. Diese werden in der Regel im weiteren Prozessverlauf zugeschnitten, zu einer Vorform (Preform) umgeformt und am Ende der Prozesskette mit Harz getränkt und ausgehärtet. Weiterhin können Fasermaterialien bereits als Halbzeug mit Harz getränkt werden. Bei Duromer-Harzen wird dann von vorimprägnierten Fasertextilien (Prepregs; engl. pre-impregnated) gesprochen. Thermoplastbasierende Halbzeuge werden als Organoblech bezeichnet. Für die Fertigung eines Bauteils werden die Halbzeuge zu Rohbauteilen weiterverarbeitet und erfahren abschließend eine Endbearbeitung (vgl. ebd.).

Dabei können verschiedene Herstellungsverfahren bzw. Prozesswege nach der zu realisierenden Bauteilgröße und geometrischer Formkomplexität eingeteilt werden (vgl. ebd., S. 11). Abbildung 2-4 zeigt eine Einordnung wesentlicher Verfahren zur Herstellung endlosfaserverstärkter Composite-Bauteile nach der Bauteilgeometrie. Die beiden Beurteilungskriterien Bauteilgröße und geometrische Formkomplexität gelten in der Regel als die wesentlichen Kriterien bei der Auswahl eines Fertigungsverfahrens (vgl. Neitzel et al. 2014, S. 203). Auf die einzelnen Verfahren und Verfahrensvarianten wird an dieser Stelle nicht weiter eingegangen. Die Abbildung soll im weiteren Verlauf der Arbeit zur Orientierung dienen.

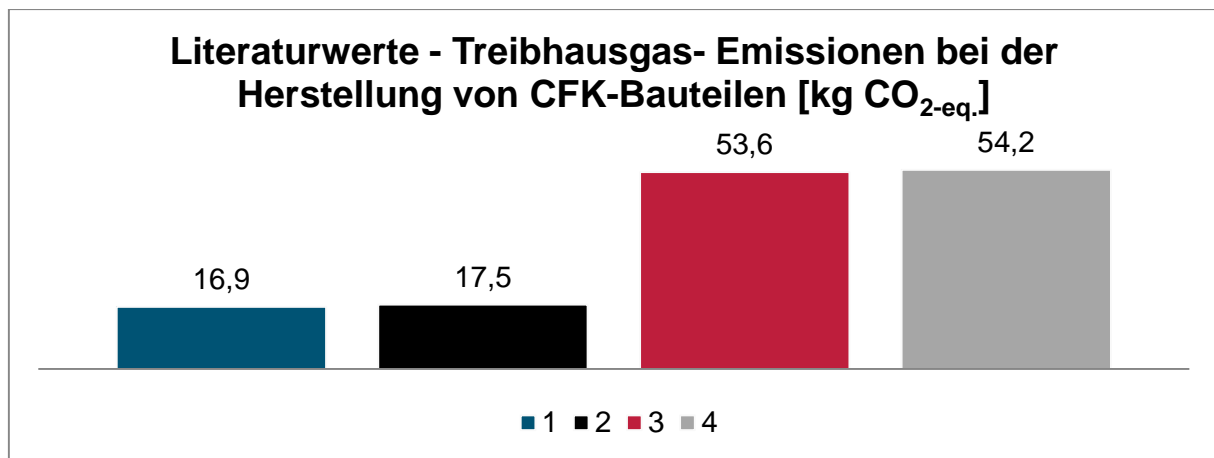


1) Mit anschließender Aushärtung im Autoklaven 2) Inkl. Organoblech

Abbildung 2-4: Einordnung wesentlicher Herstellungsverfahren endlosfaserverstärkter Composite-Bauteile nach der Bauteilgeometrie (Lässig et al. 2012, S. 11)

Im Folgenden wird kurz der Begriff der **geometrischen Formkomplexität** bei FVK-Bauteilen näher betrachtet. Eine hohe geometrische Formkomplexität eines faserverstärkten Kunststoffes zeichnet sich durch viele bzw. starke Abweichungen von der Form einer einfachen (symmetrischen) ebenen Platte aus (vgl. Qiu et al. 2011, S. 1). Dabei werden rotationssymmetrische Geometrien auch einer geringen geometrischen Formkomplexität zugeordnet. Mehrdimensionale Verschiedenheiten bzw. Asymmetrien sind zum Beispiel besondere Versteifungen, lokale Verstärkungen oder Aussparungen, Bolzenlöcher und Krümmungsradien. Des Weiteren erhöhen bei der Herstellung die Umsetzung verschiedener Faserorientierungen und definierter Faserpositionierungen die Komplexität eines Bauteils (vgl. ebd.; Lässig et al. 2012, S. 11 sowie Neitzel et al. 2014, S. 203ff.).

In der Literatur zur Ökobilanzierung von CFK lassen sich nun sehr unterschiedliche Daten zur Herstellung bzw. zum Produktionsaufwand von CFK-Bauteilen finden. Exemplarisch sind in Abbildung 2-5 vier Beispiele für Literaturwerte an Treibhausgas-Emissionen bei der Herstellung von CFK-Bauteilen dargestellt.

Abbildung 2-5: Literaturwerte - Treibhausgas- Emissionen bei der Herstellung von CFK-Bauteilen [kg CO₂-eq.]

Als Quellenverweis und zur Erläuterung der in Abbildung 2-5 dargestellten Literaturwerte dient Tabelle 2-1.

Tabelle 2-1: Quellen und Erläuterungen zu den Literaturwerten in Abbildung 2-5

	1	2	3	4
Bezug	1 kg CFK-Bauteil	1 kg CFK-Primärwerkstoff	1 kg CFK-Platte (400 x 400 x 4 mm)	
Prozessangaben	SMC, Faservolumengehalt 34%	Keine Angaben	Prepreg, Autoklav	textiles Halbzeug, Infusion, Ofen
Quelle	Das 2011, S. 270 & 278	Ehrenberger et al. 2013, S. 733	Witik et al. 2012, S. 97 & 99	

Als Erläuterung ist zu erwähnen, dass es sich bei der Bezeichnung SMC um das Formpress-Verfahren (engl. Sheet molding compound) handelt, in dem Harz getränkte Faserhalbzeuge in einer geschlossenen Form verarbeitet werden. In Abbildung 2-4 ist es unter Punkt 6 als Verfahren zur Herstellung von Bauteilen mit geometrischen Restriktionen eingeordnet, sodass mit diesem Verfahren nur eine begrenzte Formkomplexität erreicht werden kann. Des Weiteren werden mit diesem Verfahren in der Regel geringere Faservolumengehalte erreicht und somit keine höchstbelastenden Bauteile erzeugt (vgl. Lässig et al. 2012, S. 12).

Zunächst zeigt Abbildung 2-5, dass sich die einzelnen in der Literatur stehenden Werte zur Herstellung bzw. zum Produktionsaufwand von CFK-Bauteilen stark voneinander abweichen (Werte von 16,9 gegenüber 54,2 kg CO₂-eq.).

Mit der zugehörigen Tabelle 2-1 wird deutlich, dass sich diese Werte auf unterschiedliche Verfahren und Verfahrensvarianten, Prozesswege sowie Werkstoffspezifikationen (z.B. Faservolumengehalt) und Bauteilkomplexität beziehen können und auch weitergehende Angaben fehlen. Somit lassen sich diese Werte nur bedingt miteinander vergleichen. Dennoch spiegeln diese vier CFK-Strukturen den aktuellen Stand des Wissens bzw. der Forschung zur ökologischen Betrachtung der Herstellung solcher Bauteile wider.

Die Beispiele 3 und 4 repräsentieren durch die Verwendung eines Autoklaven oder Ofens energieintensivere Verfahren und ermöglichen, wie in Abbildung 2-4 mit den Verfahren 3 und 4 gekennzeichnet, die Realisierung einer komplexeren Bauteilgeometrie. Allerdings wurden in der Literatur nach WITIK ET AL. 2012 bei den Beispielen 3 und 4 in Abbildung 2-5 in Verbindung mit Tabelle 2-1 auch nur „einfache“ Platten hergestellt und somit komplexere Bauteile nicht betrachtet.

Leider sind neben uneinheitlichen Angaben und Bezugsgrößen auch fehlende Erläuterungen zu den Prozessen, Bauteilgeometrie sowie Werkstoffspezifikationen keine Seltenheit (Beispiel 2 in der Tabelle 2-1) und erschweren die Nachvollzieh- und Vergleichbarkeit.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass die **Datengrundlage bei kohlefaserverstärkten Kunststoffen** zur Herstellung von CFK- Bauteilen **sehr unsicher** ist (vgl. Ehrenberger et al. 2013, S. 733).

Gründe für die Diskrepanz der verschiedenen Werte sind vielfältig und können darin liegen, dass jeweils unterschiedliche Beteiligte involviert sind und somit verschiedene Betrachtungsgegenstände und Systemgrenzen vorliegen. Ferner können sich Prozesse verschiedener Produktions- bzw. Herkunftsregionen hinsichtlich ihrer Effizienz unterscheiden. Zusätzlich können bei faserverstärkten Kunststoffen erhebliche Verbesserungspotenziale bezüglich der Energie- und Materialverbräuchen in der Skalierung zur großseriellen Anwendung liegen und können somit je nach Betrachtungsweise die Ergebnisse streuen.

Weiterhin ist in der Literatur zu beobachten, dass bei der Bewertung der ökologischen Auswirkungen im Herstellungsprozess in erster Linie die ökologischen Auswirkungen in Form der Treibhausgas-Emissionen als CO₂-Äquivalente betrachtet werden. Eine solche Fokussierung ist aus ökologischer Sicht durchaus kritisch zu sehen.

2.3 Handlungsbedarf und Forschungshypothese

Allgemein sind zuverlässige computerunterstützte Modelle und Bilanzierungen von Teilprozessen der Fertigung bis hin zu einer vollständigen Ökobilanz notwendig, um in der Zukunft Fertigungsverfahren zur Herstellung von Faserverbundbauteilen unter ökologischen Aspekten zu vergleichen und Optimierungspotentiale aufzuzeigen, um Fertigungsprozesse insbesondere hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz weiterzuentwickeln. Des Weiteren kann eine komplette Ökobilanzierung als Entscheidungshilfe im Leichtbau bei dem Vergleich verschiedener Materialien und somit dem Anspruch der Ressourcenschonung über den gesamten Lebenszyklus dienen (vgl. DIN EN ISO 14040 2006, S. 4 sowie Ehrenberger et al. 2013, S. 727).

Aus der Darstellung des aktuellen Stands der Wissenschaft lässt sich der konkrete Handlungsbedarf im Bereich der Fertigung von kohlefaserverstärkten Kunststoffen für diese Arbeit ableiten. Dieser besteht darin, dass nicht nur die Datengrundlage zu den ökologischen Auswirkungen bei der Herstellung von CFK-Bauteilen sehr unsicher ist, sondern auch Daten zur Fertigung eines CFK-Bauteils mit einer komplexen Bauteilgeometrie in einem Autoklav-Prozess fehlen. Ferner gilt es neben den Treibhausgas-Emissionen auch weitere potenzielle Umweltwirkungen bei der Herstellung von CFK-Bauteile zu berücksichtigen.

Mit dieser Arbeit soll ein Beitrag dazu geleistet werden, der unsicheren und unvollständigen Datengrundlage mit einer Modellierung zu begegnen. Dazu soll ein Fertigungsprozess in der Software „Umberto NXT Universal“ mit der Nutzung integrierte Umweltdatenbanken abgebildet werden. Dieses wird am Beispiel der Fertigung von zwei Flügelrippen im SLI-Verfahren erfolgen. Mit einem Referenzmodell, das auf entsprechende Literaturwerte für CO₂-Äquivalenten basiert, wird das Modell mit den Vorketten aus der Umweltdatenbank verglichen. In dieser Arbeit wird daher folgender Forschungshypothese nachgegangen und somit auch eine nachvollziehbare Datengrundlage für weitere Aktivitäten in der Zukunft bereitgestellt.

Forschungshypothese:

Es lassen sich mit der Software Umberto NXT Universal und den softwareintegrierten Umweltdatenbanken autoklavunterstützte Fertigungsprozesse zur Herstellung komplexer Bauteile aus endlosfaserverstärktem CFK modellhaft abbilden und nach dem methodischen Vorgehen der Ökobilanzierung ökologische Auswirkungen auf die Umwelt von der „Wiege bis zum Fabrikator“ (engl. cradle-to-factory-gate) bewerten.

3 Grundlagen zur Modellierung und ökologischen Bewertung mit der Software Umberto

Für die systematische Ermittlung und Bewertung potenzieller Umweltwirkungen des Fertigungsprozesses orientiert sich diese Arbeit an der Norm DIN EN ISO 14040 zur Ökobilanzierung. Dazu werden im Kapitel 3.1 die Grundlagen des methodischen Vorgehens nach der Norm erläutert.

Die Modellierung der Energie- und Stoffströme bei der Herstellung von zwei CFK-Flügelrippen und die ökologische Bewertung der Fertigungsprozesse wird durch den Einsatz der Softwareversion Umberto NXT Universal™ unterstützt. In Kapitel 3.2 werden dazu der theoretische Hintergrund und grundlegende Elemente zur Modellierung mit der eingesetzten Software betrachtet.

Abschließend werden im Kapitel 3.3 die Grundlagen ökologischer Bewertungsverfahren erläutert und die Methode „ReCiPe“ für die spätere Auswertung näher betrachtet.

3.1 Methodische Grundlagen einer Ökobilanzierung

Nach der DIN EN ISO 14040 „bezieht sich [eine Ökobilanz] auf die Umweltaspekte und potenziellen Umweltwirkungen [...] im Verlauf des Lebensweges eines Produktes von der Rohstoffgewinnung über Produktion, Anwendung, Abfallbehandlung, Recycling bis zur endgültigen Beseitigung“ (DIN EN ISO 14040 2006, S. 4). Eine komplette Ökobilanzierung (englisch: Life Cycle Assessment (LCA)) zielt somit darauf ab, aus Ressourcenverbräuchen und Emissionen potenzielle Umweltauswirkungen über den gesamten Lebensweg von der Wiege bis zur Bahre („cradle-to-grave“) zu betrachten und zu analysieren (vgl. Ehrenberger et al. 2013, S. 728).

Die Durchführung einer Ökobilanz-Studie lässt sich dabei in vier Phasen gliedern. Abbildung 3-1 veranschaulicht den Ablauf einer Ökobilanzierung sowie den Zusammenhang der einzelnen Schritte. Die Pfeile im Diagramm sollen einen möglichen Iterationsprozess zur weiteren Konkretisierung oder Modifizierung der vorherigen Schritte andeuten (vgl. Herrmann 2010, S. 153). Abbildung 3-1 spiegelt gleichzeitig auch die Struktur der Norm und den Aufbau der folgenden Unterkapitel wider. In diesen werden die einzelnen Phasen auszugsweise mit relevanten Aspekten für den weiteren Verlauf der Arbeit erläutert.

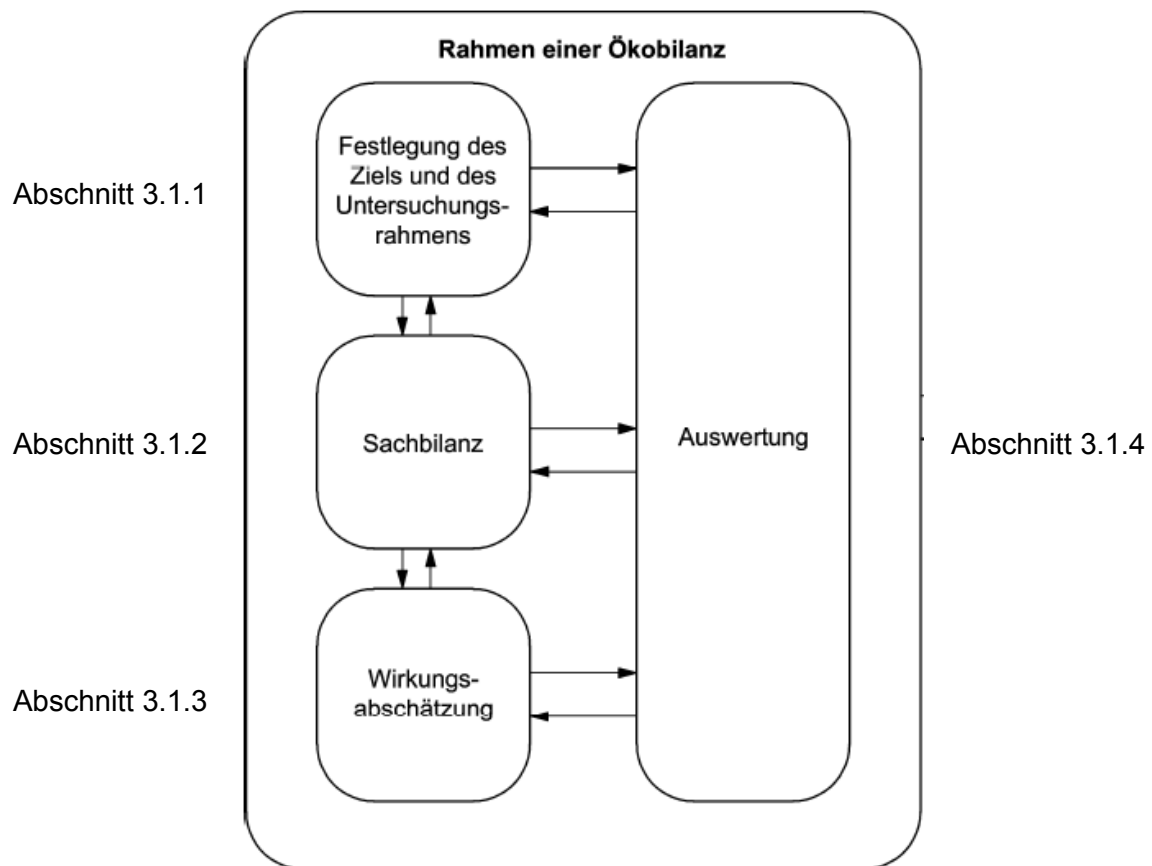


Abbildung 3-1: Rahmen und Phasen einer Ökobilanz (nach DIN EN ISO 14040 2006, S. 16)

3.1.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

In dem ersten Schritt einer normgerechten Ökobilanz werden das Bilanzierungsziel und die Untersuchungsprämissen festgelegt (vgl. Dyckhoff, Souren 2008, S. 167 sowie Klöpffer, Grahl 2009, S. 27). Als Ziel der Bewertung ist grundsätzlich eine Betrachtung des gesamten Lebenszyklus eines Produktes (cradle-to-grave Betrachtung) anzustreben (vgl. Walther 2010, S. 147). Das Weglassen von Prozessschritten und/ oder Lebenswegabschnitten sowie das Nicht-Berücksichtigen einzelner Produktionsfaktoren ist zu begründen (vgl. DIN EN ISO 14044 2006, S. 17). Zusätzlich werden der Untersuchungsgegenstand und die Beweggründe der Studie benannt (vgl. Herrmann 2010, S. 154).

Des Weiteren beinhaltet dieser Schritt eine ausführliche Beschreibung des zu untersuchenden Bilanzsystems mit der Bestimmung der Systemgrenzen (technisch, geographisch und zeitlich), die Datenverfügbarkeit und Tiefe der Studie, die Festlegung der funktionellen Einheit (in der Regel eine produktspezifische Größe) sowie mögliche Abschneidekriterien und Allokationsverfahren (vgl. Dyckhoff, Souren 2008, S. 167; Klöpffer, Grahl 2009, S. 27ff. sowie Walther 2010, S. 147).

Zu der Bestimmung der technischen Systemgrenze zählt auch die Aufteilung des Produktsystems in ein vereinfachtes (lineares) System von aufeinanderfolgenden Prozessmodulen bzw. Teilprozessen (vgl. DIN EN ISO 14040 2006, S. 12 & S. 24 sowie Klöpffer, Grahl 2009, S. 63ff.).

3.1.2 Sachbilanz

In der zweiten Phase einer Ökobilanz erfolgt eine Stoff- und Energieanalyse der einzelnen Teilprozesse zur Erstellung der Sachbilanz (vgl. ebd. sowie Herrmann 2010, S. 154).

Aus einer Datensammlung werden alle relevanten Input- und Outputdaten der einzelnen Prozessmodule des zu untersuchenden System quantifiziert und ggf. durch Berechnungsverfahren auf die festgelegte funktionelle Einheit normiert (vgl. DIN EN ISO 14040 2006, S. 25ff. sowie Walther 2010, S. 147).

Bei einer Prozessaufnahme zur Datensammlung werden, den Wirtschaftswissenschaften folgend, die einzelnen Prozessmodule prinzipiell als Black-Box mit Austauschbeziehungen von Eingangsgrößen (Produktionsfaktoren) und Ausgangsgrößen (Produkte, Abfälle und Schadstoffe) zu dem Umfeld betrachtet (vgl. Lambrecht 2011, S.12).

Die in einem Prozess aufgenommenen Input- und Outputdaten dürfen mathematische Zusammenhänge und naturwissenschaftliche Grundlagen nicht verletzen und sind somit auf ihre Richtigkeit bzw. Konsistenz zu überprüfen (vgl. Ehrenberger et al. 2013, S. 729 sowie Klöpffer, Grahl 2009, S. 63ff.). So können beispielsweise auch auf Grundlage des Massen- und Energieerhaltungsgesetzes Daten überprüft und fehlende Angaben aus einer Differenzbildung berechnet werden (vgl. Heinemann et al. 2013, S. 300).

Zur Veranschaulichung eines Prozessmoduls als Black-Box mit In- und Outputs ist in Abbildung 3-2 schematisch ein Prozessmodul ohne Koppelproduktion mit Beispielen für ökologierelevanten Eingangs- und Ausgangsgrößen dargestellt.

Bei einer solchen Black-Box-Betrachtung wird allerdings der systeminterne Zusammenhang nicht weiter analysiert. Ferner lassen die in einer Prozessaufnahme dokumentierten Werte durch die rückschauende Betrachtungsweise nur begrenzt Aussagen für die Zukunft zu (vgl. Dyckhoff, Souren 2008, S. 169).

Ferner ist es bei der Prozessaufnahme nicht immer - oder mit nicht zu rechtfertigendem Aufwand – möglich, alle relevanten, spezifischen Daten für jedes Prozessmodul zu erheben (vgl. Ehrenberger et al. 2013, S. 729f.).

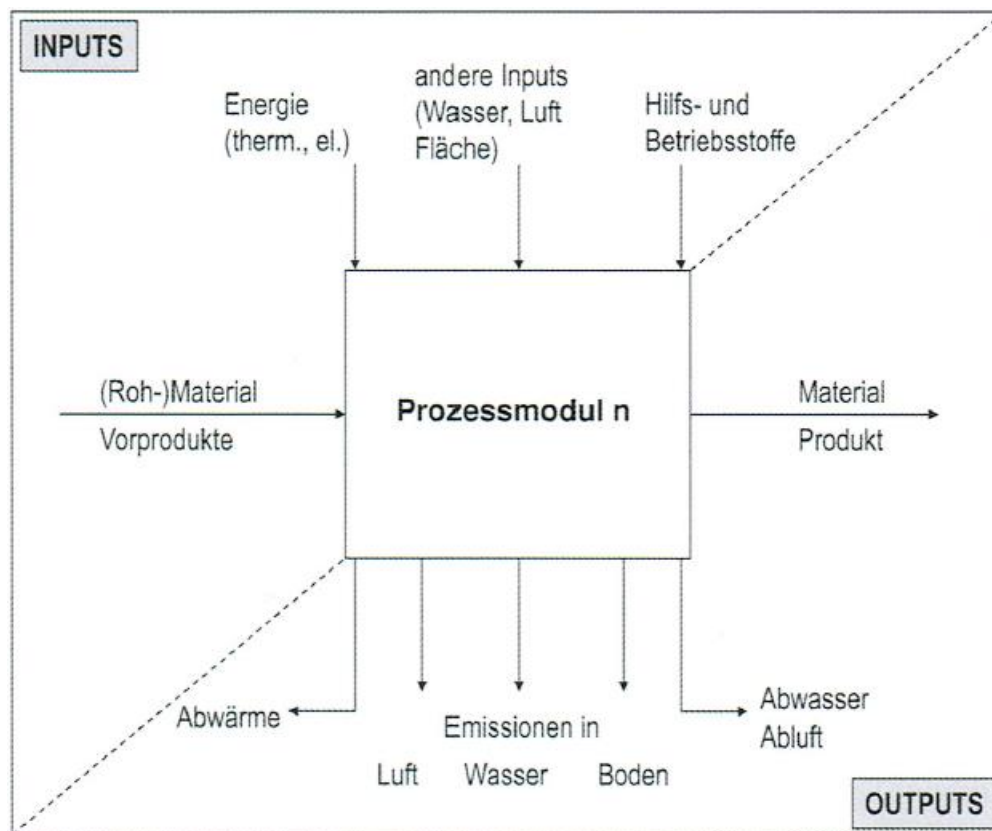


Abbildung 3-2: Prozessmodul ohne Koppelproduktion (Klöpffer, Grahl 2009, S. 67)

Eine reale Sachbilanz besteht somit in der Regel neben aufgenommenen Primärdaten auch aus generischen Daten sowie fundierten Abschätzungen. Unter **generischen Daten** sind dabei verfügbare Datensätze aus Mittelwerten oder repräsentativen Einzelwerten aus realen Messungen zu verstehen, die als Standardmodule in Prozess- und Materialdatenbanken hinterlegt und in Softwarelösungen zur computerunterstützten Modellierung integriert sind (vgl. Klöpffer, Grahl 2009, S. 46, 125 & 133).

Der Anwender bzw. Nutzer solcher Softwarepakete kann bei dem Fehlen spezifischer Daten dann zur Ergänzung der Sachbilanz auf passende, generische Daten zurückgreifen (vgl. Ehrenberger et al. 2013, S. 729).

Gütekriterien einer Sachbilanz sind bei der Durchführung von Prozessaufnahmen und der Verwendung von externen Datensätzen grundsätzlich gute Dokumentationen und Nachvollziehbarkeit, sodass auf Transparenz zu achten ist (vgl. Herrmann 2010, S. 154).

Abschließend werden für die Bilanzierung entlang einer Prozesskette oder über den gesamten Lebensweg die Stoff- und Energieflüsse der einzelnen Teilprozesse miteinander verknüpft. Als mengenbestimmte und auf die funktionelle Einheit bezogene Größen bilden sie einzelne Posten einer Sachbilanz und sind somit die Grundlage für den nachfolgenden Schritt der Wirkungsabschätzung (vgl. ebd. sowie Ehrenberger et al. 2013, S. 729).

3.1.3 Wirkungsabschätzung

In dem dritten Schritt werden die zuvor in der Sachbilanz wertfrei erhobenen Daten bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Umwelt untersucht und bewertet (vgl. Herrmann 2010, S. 154 sowie Dyckhoff, Souren 2008, S. 168).

Die Wirkungsabschätzung lässt sich in der Normenreihe zur Ökobilanzierung dabei weiter in Teilschritte mit verbindlichen und optionalen Bestandteilen gliedern. Zu den bindenden Elementen gehören nach der Auswahl von Wirkungskategorien, Wirkungsindikatoren und Charakterisierungsmodellen die **Klassifizierung** sowie die **Charakterisierung** (vgl. DIN EN ISO 14040 2006, S. 27ff. sowie DIN EN ISO 14044 2006, S. 33ff.).

Bei der Klassifizierung werden die einzelnen Sachbilanzergebnisse festgelegt und Wirkungskategorien mit potentiellen Umweltauswirkungen zugeordnet. Einzelne Stoff- und Energieflüsse können dabei in mehreren Kategorien eine Rolle spielen. Beispielsweise werden Methanemissionen in den Kategorien Treibhaus- und Sommersmogpotenzial berücksichtigt (vgl. Herrmann 2010, S. 155).

Bei der Charakterisierung werden aus den Sachbilanzergebnissen die Ergebnisse der Wirkungsindikatoren berechnet. Dies geschieht auf der Grundlage von anerkannten, naturwissenschaftlichen Modellen (Indikatormodellen) und Gewichtungsfaktoren, z.B. über Äquivalenzfaktoren, die auf eine Referenzsubstanz bezogen werden (vgl. ebd. sowie Walther 2010, S. 147).

Tabelle 3-1 zeigt das Prinzip der beiden Schritte Klassifizierung und Charakterisierung in der Wirkungsabschätzung sowie das Zustandekommen eines Wertes für einen exemplarischen Wirkungsindikator anhand eines vereinfachten Beispiels.

In diesem Beispiel (Tabelle 3-1) werden auszugsweise die Auswirkungen eines Produktsystems auf die Wirkungskategorie Klimawandel bzw. Klimaänderung mit dem Wirkungsindikator „Global Warming Potential“ bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren (GWP_{100}) betrachtet.

Die auf die funktionelle Einheit (fE) normierten Sachbilanzergebnisse mit treibhauswirksamen/ Klima verändernden Emissionen werden dieser Umweltwirkungskategorie zugeordnet (hier Kohlendioxid und Methan). Als Indikatormodell wird die Verstärkung der Infrarotstrahlung bezogen auf eine Referenzsubstanz angewendet. Jedes emittierte Treibhausgas besitzt eine charakteristische Wärmeabsorptionsfähigkeit und wird damit mit dem Referenzgas Kohlendioxid verglichen (vgl. ebd.; Klöpffer, Grahl 2009, S. 206 & 256 sowie Ehrenberger et al. 2013, S. 729).

Tabelle 3-1: Prinzip der Klassifizierung und Charakterisierung in der Wirkungsabschätzung (in Anlehnung an Klöpffer, Grahl 2009, S. 206)

Sachbilanz- ergebnisse [Masse/ fE]	Sachbilanzergebnisse den Wirkungskategorien zugeordnet	Indikator- modell	Faktor	Wirkungs- indikator
Kohlenstoff- dioxid	<u>Klimaänderung</u> (Emissionen mit Wirkung auf Klima werden zugeordnet)	Quantifizierung der „Verstärkung der Infrarotstrahlung“ bezogen auf Referenzgas Kohlendioxid	1	Treibhaus- potenzial „GWP ₁₀₀ “ (kg - CO ₂ - Äquivalente)
Methan			25	
usw.			...	
...
Klassifizierung		Charakterisierung		Ergebnis

Methan wird bei der Charakterisierung auf Grund der 25-fach höheren Treibhauswirksamkeit im Vergleich zu Kohlendioxid bezogen auf einen Zeitraum von 100 Jahren mit einem Faktor von 25 multipliziert, sodass 1 Kilogramm an emittiertem Treibhausgas Methan der Treibhauswirksamkeit von 25 Kilogramm emittiertem Treibhausgas Kohlendioxid entsprechen. Dementsprechend können weitere Treibhausgase in CO₂-Äquivalente (CO_{2eq}) umgerechnet und als Ergebnis zu dem Wirkungsindikator GWP₁₀₀ zusammengefasst werden (vgl. Klöpffer, Grahl 2009, S. 206 & 256 sowie Ehrenberger et al. 2013, S. 729).

Daneben existieren weitere Wirkungsindikatoren, die sich in output- und inputbezogene Kategorien gliedern lassen (vgl. ebd.).

Objektiv können die verschiedenen Wirkungsindikatoren nicht miteinander verglichen werden, sodass aus ökologischer Sicht die Auswirkungen von Treibhausgasen auf den Klimawandel nicht „besser“ oder „schlechter“ sind, wie die Auswirkungen von toxischen Schadstoffen auf Mensch und Umwelt (vgl. ebd., S. 730).

Ferner gehören in der Norm zu den optionalen Schritten der Wirkungsabschätzung die Normierung, die Ordnung und Gewichtung (vgl. DIN EN ISO 14040 2006, S. 27ff). Unter dem Einfluss von subjektiven Maßstäben können durch diese Schritte Wirkungsindikatoren zusammengefasst werden und dann anhand von eindimensionalen Indikatorwerten vergleichende Aussagen für Wirkungsendpunkte getroffen werden (vgl. ebd.).

3.1.4 Auswertung

Der letzte Schritt, die Auswertung, ist eng mit der Wirkungsabschätzung verknüpft, sodass diese beiden Schritte ineinandergreifen und nicht streng zu trennen sind (vgl. Walther 2010, S. 147). In der Literatur existiert eine Vielzahl an ökologischen Bewertungsverfahren und – Methoden von umweltschädlichen Stoff- und Energieflüssen mit unterschiedlichen Schwerpunkten (vgl. Dyckhoff, Souren 2008, S. 168 sowie Ehrenberger et al. 2013, S. 730). Auf die Grundlagen ökologischer Bewertungsverfahren und auf die spezielle Methode „ReCiPe“ wird dazu im Abschnitt 3.3 weiter eingegangen.

Generell werden in der letzten Phase der Auswertung die wichtigsten Auswirkungen zusammengetragen und Haupteinflussfaktoren bzw. signifikante Parameter identifiziert. Weiterhin können Sensitivitätsanalysen durchgeführt werden und verschiedene Umweltschädigungen abgewogen werden (vgl. Dyckhoff, Souren 2008, S. 168).

Für eine Beurteilung der Datensicherheit können Prüfungen auf Vollständigkeit, Sensitivitäten und Konsistenz vollzogen werden. Letztendlich sind in einer Auswertung Schlussfolgerungen, Einschränkungen und Empfehlungen in Abstimmung zu den gesetzten Zielen auszusprechen (vgl. DIN EN ISO 14044 2006, S. 45f.).

3.2 Modellierung mit der Software Umberto

Wie bereits erwähnt, werden zur Analyse von Produktionssystemen Modelle verwendet (vgl. Lambrecht 2011, S. 10). Da in der Literatur keine einheitliche Definition des Modellbegriffs zu finden ist (vgl. ebd., S. 11 sowie Hesselbach 2012, S. 98), wird zunächst für das weitere Verständnis in Abschnitt 3.2.1 auf die wesentlichen Aspekte des Modellbegriffs und des Modellbildungsprozesses bzw. auf die in der Literatur übereinstimmenden Merkmale eines Modells eingegangen.

Im Rahmen dieser Arbeit wird zur Modellierung der Energie- und Stoffströme zur Herstellung der CFK-Flügelrippen und zur ökologischen Bewertung die Software Umberto NXT Universal™ genutzt. Umberto beruht auf dem methodischen Erklärungsmodell bzw. Konzept der Stoffstromnetze. Diese basieren wiederum auf der Logik von sogenannten Petri-Netzen (vgl. Heinemann et al. 2013, S. 301 sowie Viere et al. 2014, S. 95).

Daher wird in Abschnitt 3.2.2 auf die theoretischen Grundlagen der Petri-Netze eingegangen und in Abschnitt 3.2.3 die Modellierung in Umberto mit Stoffstromnetzen erläutert.

3.2.1 Modellbegriff und Modellierung

Ein Modell ist ein Ausschnitt aus der realen Welt und stellt ein einfaches, allgemein gültiges Abbild eines Objektes aus dieser dar. Relevante Sachverhalte und Wirkungszusammenhänge aus der Realität werden in einer handhabbaren Form abstrakt und lösungsbezogen dargestellt. Durch eine bewusste Auswahl von Randbedingungen und Einschränkungen werden Teile der Realität nicht betrachtet und somit die Komplexität des Modellgegenstandes reduziert (vgl. ebd., S.98; Lambrecht 2011, S. 10f. sowie Herrmann 2010, S. 213). Kurz gesagt sind Modelle „Hilfsmittel zum vereinfachten Umgang mit der Realität“ (Hesselbach 2012, S. 98).

Der Modellbildungsprozess bzw. die Modellierung selbst lässt sich als zweistufiger Prozess aus Systemerfassung und Systemabbildung beschreiben (vgl. Lambrecht 2011, S. 13).

Abbildung 3-3 stellt den Modellbildungsprozess mit den beiden Phasen grafisch dar und veranschaulicht ebenso noch einmal den Modellbegriff als Abbild eines Ausschnittes der realen Welt.

Bei der Systemerfassung entsteht ausgehend von der Wirklichkeit durch Wahrnehmung und geistige Reflektion ein gedankliches (mentales) Modell der Realität. Auf Grund dieses subjektiven Einflusses des Modellerstellers ist das mentale Modell kein objektives Bild (vgl. ebd., S. 13f.).

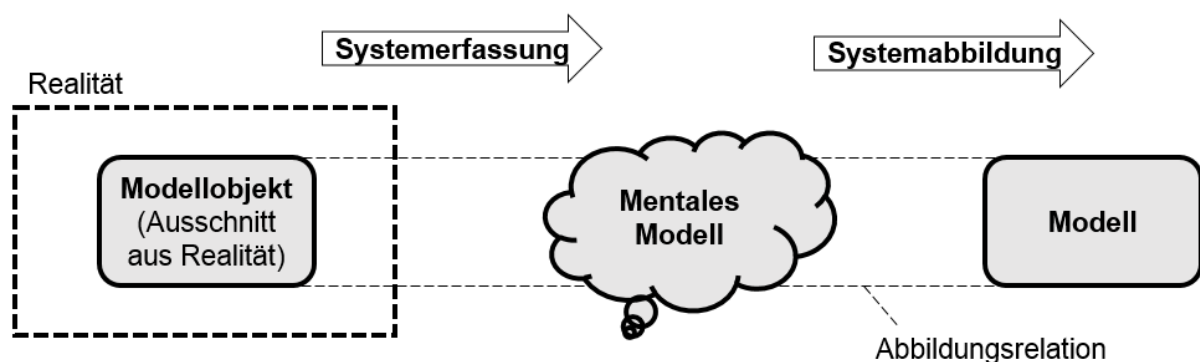


Abbildung 3-3: Modellbegriff und Modellbildungsprozess (in Anlehnung an Lambrecht 2011, S. 13 sowie Krcmar 2015, S. 32)

Bei der nachfolgenden Systemabbildung wird das gedankliche Modell mit einem Werkzeug in ein Modell überführt und dargestellt. Diese Werkzeuge verwenden zur Abbildung der realen Objekte abstrakte Zeichen und befolgen bestimmten Regeln, wodurch eine Modellierungssprache gekennzeichnet ist (vgl. ebd.; Krcmar 2015, S. 34 sowie Hesselbach 2012, S. 100).

Als Werkzeug existieren verschiedene Arten an Modellen und Modellierungstechniken mit unterschiedlichen Verwendungszwecken (vgl. ebd. sowie Herrmann 2010, S. 214). Zur Prozessmodellierung werden im Rahmen dieser Arbeit Petri-Netz basierte Stoffstrommodelle in der Software Umberto NXT Universal als Werkzeug zur Modellbildung eingesetzt (vgl. Viere et al. 2014, S. 95).

3.2.2 Theoretischer Hintergrund: Petri-Netze

Petri-Netze sind zustandsbasierte Graphen, wobei es verschiedene Arten bzw. eine Vielzahl an Varianten von Petri-Netzen gibt (vgl. Becker et al. 2009, S. 79f. sowie Becker et al. 2012, S. 20f.). In Abbildung 3-4 ist exemplarisch ein Stellen-Transitions-Netz als eine Variante eines Petri-Netzes dargestellt. Diese Abbildung soll die nachfolgenden Erklärungen veranschaulichen.

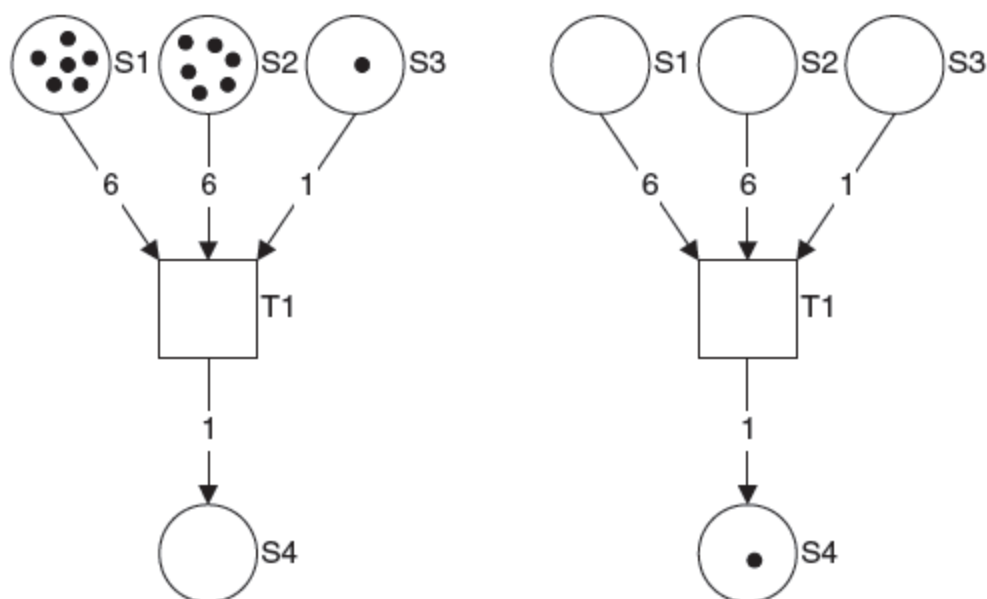


Abbildung 3-4: Exemplarische Darstellung eines Stellen-Transitions-Netzes; links vor und rechts nach einem Schaltvorgang (Becker et al. 2009, S. 79)

Allgemein bestehen Petri-Netze aus zwei Arten von Knoten (kreisrunde Stellen S und rechteckige oder quadratische Transitionen T), die durch gerichtete und bewertete Kanten (Pfeile) miteinander verbunden sind. Es gilt dabei zu beachten, dass nur unterschiedliche Knotentypen miteinander verbunden werden dürfen und somit nicht zwei Stellen oder zwei Transitionen direkt aufeinander folgen dürfen (vgl. Becker et al. 2012, S.20f.).

Weiterhin sind in den Stellen Markierungen oder Marken, sogenannte Tokes, (schwarze Punkte) enthalten. Für einen Schaltvorgang bzw. einen Zustandsübergangsprozess in einer Transition muss diese „schaltbereit“ sein (vgl. ebd. sowie Becker et al. 2009, S. 79f.).

Eine Schaltbedingung ist das Vorhandensein ausreichender Marken in den verknüpften Stellen im Vorfeld einer Transition. Die entsprechenden Kantengewichte vor der Transition geben dabei die Anzahl der notwendigen Tokens an. In diesem Fall werden je sechs Marken in den Stellen S1 und S2 und eine Marke in der Stelle S3 für den Schaltvorgang benötigt (vgl. Becker et al. 2009, S. 79f.).

Die zweite Schaltbedingung ist, dass die nachgelagerten Stellen einer Transition noch freie Kapazitäten zur Aufnahme der resultierenden Marken aus dem Schaltvorgang aufweisen. In diesem Beispiel in Abbildung 3-4 befindet sich keine Marke an der Stelle S4. Zusätzlich ist keine Kapazitätsbegrenzung angegeben. Die Transition T1 ist nach Erfüllen dieser beiden Bedingungen „schaltbereit“ bzw. „aktiv“ (vgl. ebd. sowie Becker et al. 2012, S.20f.).

Ein Schaltvorgang einer Transition führt dann zu einer Entnahme der Marken an den direkten Vorgängerstellen und zu einem „Verbrauchen“ der Marken innerhalb der Transition sowie gleichzeitig zu einem „Erzeugen“ von Marken und Ablage dieser erzeugten Marken bei den direkten Nachfolgerstellen (vgl. Walther 2010, S. 48). Markierungen werden also durch das Anwenden der Schaltregeln und Berücksichtigen der Kantengewichte von einer Stelle über eine Transition zur nächsten Folgestelle weitergegeben. In der Abbildung 3-4 resultiert nach dem Schaltvorgang aus dem Übergang in der Transition T1 nur eine Marke (siehe Zustand vor dem Schaltvorgang links und Zustand nach dem Schaltvorgang rechts). Dies ist auf das Kantengewicht nach der Transition T1 zurückzuführen ist (vgl. Becker et al. 2009, S. 79f. sowie Becker et al. 2012, S. 21).

Für den Anwendungsfall der Modellierung von Fertigungsabläufen werden Produktionsprozesse als Transitionen und Lager oder Zwischenlager als Stellen modelliert. Die Kantengewichte an den Pfeilen (gerichtete Kanten) spiegeln die zugehörigen Input- und Outputkoeffizienten des Prozesses wieder. Die Marken stehen für Objekt- bzw. Stoffströme der Produktionsfaktoren. Bestände in einem Lager werden mit der Anzahl an Marken abgebildet und Kapazitätsbeschränkungen können an diesen Stellen zusätzlich berücksichtigt werden (vgl. Becker et al. 2012, S. 22; Dyckhoff, Spengler 2010, S. 221 sowie Walther 2010, S. 48).

Des Weiteren ist Abbildung 3-4 zu entnehmen, dass sich die Anzahl an vorhandenen Marken in einem Petri-Netz-System verändern kann. Dies ermöglicht auf der einen Seite einen Überblick über den Prozessfortschritt. Auf der anderen Seite lassen sich dadurch Fehler im System schnell erkennen und die Eigenschaften auch mit formalen Methoden der Mathematik analysieren (vgl. Becker et al. 2009, S. 80).

Wesentliche Eigenschaften eines Petri-Netzes sind die Lebendigkeit und Sicherheit. Bezüglich der Lebendigkeit gilt einerseits ein Petri-Netz als „tot“, wenn alle Transition nicht mehr schalten können und somit tot sind (vgl. ebd. sowie Becker et al. 2012, S. 24f.).

Andererseits ist ein Petri-Netz „stark lebendig“, wenn alle Transitionen nach jedem Schaltvorgang wieder schaltbar sind. Daneben existieren weiterhin die Bezeichnungen „schwach lebendig“ und „todesgefährdet“. Neben der Lebendigkeit ist die Sicherheit eines Petri-Netzes von Bedeutung. Diese spiegelt wieder, dass nichts Verbotenes im System passiert und kann beispielsweise durch eine Beschränkung an maximal vorhandenen Marken im System erreicht werden (vgl. Becker et al. 2012, S. 24).

Weiterhin wird ein Petri-Netz als ein Modell von nebenläufigen Systemen betrachtet, da die Reihenfolge bei mehreren gleichzeitig schaltbereiten Transitionen nicht festgelegt ist. Diese „Nebenläufigkeit“ bedeutet keine „Gleichzeitigkeit“, sondern bietet den Vorteil der „Unabhängigkeit“ einzelner Netz-Elemente (vgl. ebd., S. 21).

Auf diesen Grundlagen basieren auch höhere sogenannte „high-level-Petri-Netze“. Diese beinhalten Erweiterungen, um die Komplexität eines Petri-Netzes zu reduzieren, die Lesbarkeit zu erhöhen, den Modellierungsvorgang zu vereinfachen und anderen Nachteilen entgegenzuwirken. Die im Rahmen dieser Arbeit relevante Erweiterung eines „high-level-Petri-Netzes“ besteht in der Möglichkeit zur Realisierung von Modell-Hierarchien im Modellierungsprozess. Dadurch lassen sich unterschiedliche Ebenen modellieren und komplexe Strukturen in einem integrierten Modell abbilden (vgl. ebd., S.24f.).

3.2.3 Modellierung mit Stoffstromnetzen in Umberto

Die Software Umberto unterstützt die Durchführung einer Ökobilanz und verwendet zur Modellierung und Analyse der Material- und Energieströme sogenannte Stoffstromnetze (vgl. Lambrecht 2011, S. 36 sowie Heinemann et al. 2013, S. 281 & 301). Diese basieren auf den zuvor beschriebenen Grundlagen der Petri-Netze und wurden um produktionswirtschaftliche und umweltwissenschaftliche Ansätze erweitert (vgl. Heinemann et al. 2013, S. 301 sowie Viere et al. 2014, S. 95). Weiterhin können in der Software hierarchische Strukturen durch Subnetze realisiert werden (vgl. Heinemann et al. 2013, S. 301), sodass die verwendeten Stoffstromnetze den „high-level-Petri-Netzen“ zuzuordnen sind.

Allgemein bietet die Software Umberto eine grafische Modellierungsumgebung mit einer netzartigen Struktur, „drag-and-drop“-Verfahren zum Hinzufügen der einzelnen Elemente und eine Exportfunktion der Ergebnisse zu Microsoft Excel. Des Weiteren eignet sich Umberto NXT unter anderem gut zur Präsentation von Ergebnissen und wird insbesondere bei Universitäten und Forschungsinstituten angewendet (vgl. Lüdemann, Feig 2014, S. 4 & 11ff.). Ein ausführlicher Vergleich der Software Umberto mit anderen Softwarelösungen für die Ökobilanzierung findet sich bei LÜDEMANN & FEIG 2014.

Am Anfang einer Modellierung mit der Software Umberto werden die verwendeten Materialien, Stoffe und Energiearten in Materiallisten definiert, die auch noch fortlaufend ergänzt werden können (vgl. Schmidt, Keil 2002, S. 33). Alle relevanten Stoff- und Energiearten werden dabei mit ihren Maßeinheiten hinterlegt und weiterhin mit einer ökologisch/ökonomischen Klassifikation in Gut, Übel oder Neutrum sowie weiteren Eigenschaften (z.B. Werte für bestimmte Umweltwirkungsindikatoren) spezifiziert (vgl. Dyckhoff, Souren 2008, S. 173).

Rohstoffe oder Vorprodukte sind dabei als Materialien mit positivem Wert (Güter), Emissionen und Abfälle als Materialien mit negativem Wert (Übel) und Materialien ohne Aufwand oder Ertrag als Neutra zu sehen. Diese Unterscheidung spielt bei der Bilanzierung und Berechnung von Produkten auf der Transitionsebene eine Rolle.

So sind bei einer Koppelproduktion (Prozess mit mehreren resultierenden Gütern) bestimmte Allokationsregeln zur verursachungsgerechten Aufteilung der Aufwendungen auf die Erträge anzuwenden (vgl. Viere et al. 2014, S. 100f.).

Für die Modellierung eines Produktionssystems stehen bei den Stoffstromnetzen wieder grundsätzlich die drei Petri-Netzelemente Stellen, Transitionen und Verbindungen zur Verfügung, wobei sich die Stellen in vier verschiedene Typen untergliedern (vgl. Lambrecht 2011, S. 29f. sowie Schmidt 1997, S. 20).

In Abbildung 3-5 sind auf Basis der Petri-Netze die grundlegenden Modellierungselemente der Stoffstromnetze und deren Notation in der Software Umberto dargestellt.

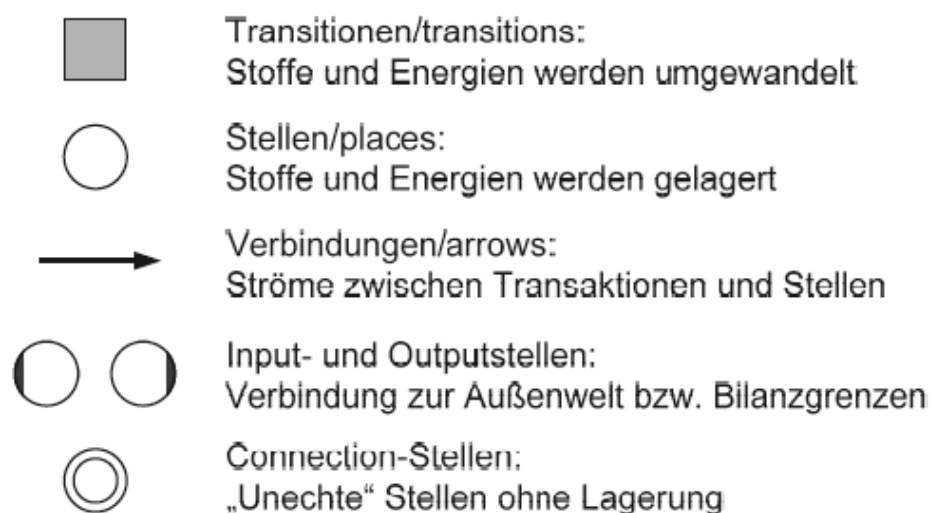


Abbildung 3-5: Elemente eines Stoffstromnetzes in Umberto (Dyckhoff, Souren 2008, S. 172)

Die rechteckigen Knoten (Transitionen) werden als aktive Elemente betrachtet und kennzeichnen Transformationsprozesse, in denen ein Verbrauch, Transport, Erzeugen oder Verändern von Stoffen und Energie stattfindet (vgl. Heinemann et al. 2013, S. 302 sowie Dyckhoff, Souren 2008, S. 173).

Die Spezifikation einer Transition kann auf verschiedene Art und Weise erfolgen (vgl. Dyckhoff, Souren 2008, Heinemann et al. 2013, S. 281 sowie Lambrecht 2011, S. 34f):

- Lineare Produktionskoeffizienten
- Benutzerdefinierte Funktionen (UDF= user defined function)
- Berechnungsalgorithmen in einer Skriptsprache
- Subnetze
- Erweiterung um Standardprozesse aus der Prozessbibliothek
(Anmerkung: Als Prozessbibliothek wird im Wesentlichen in dieser Arbeit die in der Software Umberto integrierte Umwelt- bzw. Ökobilanzdatenbank Ecoinvent™ Version 3.1 genutzt)

Bei einer linearen Spezifikation wird der Prozess mit einem festen Verhältnis von Input- und Outputkoeffizienten proportional beschrieben. Das Beschreiben mittels linearer Beziehung zwischen Input und Output ist im Bereich der Ökobilanzierung üblich, ermöglicht aber nicht unbedingt eine realistische Abbildung (vgl. Viere et al. 2014, S. 96).

Komplexere Zusammenhänge werden durch benutzerdefinierte Produktionsfunktionen modelliert, wobei Input- und Outputströme auch abhängig von weiteren Prozessparametern mit mathematischen Funktionen definiert werden (vgl. Lambrecht 2011, S. 34ff.).

Des Weiteren können dabei Berechnungsalgorithmen in einer gesondert geschriebenen Skriptsprache, wie z. B. Python, Anwendung finden. Weiterhin kann eine Transition selbst durch ein Stoffstromnetz auf einer niedrigeren Hierarchiestufe (Subnetze) bestimmt werden. Die Erweiterung einer Transition um Standardprozesse zur Spezifikation beruht auf generischen Daten und kann bei Bedarf durch das Justieren bestimmter Parameter für den Anwendungszweck angepasst werden (vgl. Dyckhoff, Souren 2008, S. 173; Walther 2010, S. 49f. sowie Lambrecht 2011, S. 34ff.).

Somit können die hier betrachteten Stoffstromnetze auch nichtlineare Ursache-Wirkungs-Beziehungen abbilden und unterstützen durch die Veränderung der Wirkungen oder Variation der Bilanzgrenzen das Bilden und Untersuchen verschiedener Szenarien und Teilsysteme. (vgl. Herrmann 2010, S. 166; Heinemann et al. 2013, S. 281 & 301 sowie Viere et al. 2014, S. 95).

Kreise symbolisieren die Stellen, die einen passiven Charakter besitzen und von denen es vier verschiedene Typen gibt (siehe Abbildung 3-5). „Normale“ Stellen ohne weitere Notation sind als Lager oder auch Zwischenlager bzw. Verteilerorte für die Stoffe und Energieträger im Systeminneren zu verstehen. Sogenannte Verbindungsstellen („connection stellen“) ohne echte Lagerung werden mit einem zusätzlichen Kreis dargestellt und werden ebenfalls im Systeminneren verwendet, um Produktionsprozesse ohne Zwischenlager und ohne Bestandsveränderungen direkt miteinander verbinden zu können. Die Notwendigkeit dieser Stellen ergibt sich aus dem Modellierungsprinzip der Petri-Netze (vgl. Dyckhoff, Souren 2008, S. 173 sowie Lambrecht 2011, S. 30).

Besondere Stellentypen (mit einem zusätzlichen Strich dargestellt) sind Input- und Outputstellen, die die Bilanzgrenzen des Systems zur Umwelt definieren und Übergabepunkte zur Außenwelt repräsentieren. So sind Inputstellen Stoffquellen und Outputstellen Stoffsenken, wodurch Materialien in das System eingehen oder dieses verlassen (vgl. ebd.; Schmidt 1997, S. 22 sowie Walther 2010, S. 49).

Verknüpft werden die Stellen und Transitionen über Kanten/ Verbindungen, die durch Pfeile dargestellt werden. Sie bilden die Struktur der Stoff- und Energieflüsse durch das System bzw. über den Produktlebensweg ab (vgl. Heinemann et al. 2013, S. 302 sowie Dyckhoff, Souren 2008, S. 173).

Mit den beschriebenen Elementen können somit Stoff- und Energieflüsse beliebig komplexer Produktionsnetze oder Produktlebenswege Element für Element modelliert werden. Es lassen sich auch Stoffrekursionen und Recyclingschleifen abbilden (vgl. Heinemann et al. 2013, S. 302 sowie Schmidt 1997, S. 22).

Bei der Berechnung gibt es bei den Stoffstromnetzen einen wesentlichen Unterschied im Vergleich zu den Petri-Netzen: In Stoffstromnetzen findet streng genommen ein Schalten der Transitionen nicht statt. Daher sind Stoffstromnetze nicht ereignisbezogen bzw. ereignisbasiert. Die Berechnung erfolgt bezogen auf eine festgelegte Zeitperiode mit einer Anfangs- und Endmarkierung und ohne Berücksichtigung dynamischen Verhaltens einzelner Systemkomponenten. In der Literatur existieren Ansätze diese Methodik der Ökobilanzierung um dynamische Aspekte zu erweitern (vgl. Schmidt, Keil 2002, S. 11; Viere et al. 2014, S. 98 sowie Heinemann et al. 2013, S. 281 & 301).

Auf Basis der funktionalen Objektbeziehungen erfolgt die Berechnung der Transitionen analog zu den Schaltvorgängen in den Petri-Netzen: Es werden immer diejenigen Transitionen berechnet, für die ausreichende Informationen in den anliegenden Verbindungen zur Berechnung vorliegen. Die Ergebnisse einer Transitionsberechnung werden wiederum an die anliegenden Verbindungen weitergegeben und können somit eine Berechnung weiterer Transitionen auslösen.

Damit hängt die Rechenrichtung nicht von der Stoffrichtung ab. Gleichzeitig werden die Bestände und Flüsse im Stoffstromnetz, wie die Marken im Petri-Netz, berechnet (vgl. Schmidt 1997, S. 22; Schmidt, Keil 2002, S. 11 sowie Viere et al. 2014, S. 97f.). Die Stoffbilanz des Stoffstromnetzes ergibt sich aus der Summe aller Bestandsveränderungen aller Input- und Outputstellen (vgl. Lambrecht 2011, S. 30).

Die Bilanz-Ergebnisse aus der Modellierung können abschließend mit der Software nach verschiedenen Kriterien und ökologischen Kennzahlen analysiert werden. Integrierte Funktionen erlauben die Wirkungsanalyse und Bilanzauswertung mittels vorgefertigter Kennzahlensysteme bzw. gebräuchlicher, ökologieorientierter Bewertungsverfahren. Ferner besteht die Möglichkeit individuelle Kennzahlensysteme für Bewertungsgrößen zu implementieren (vgl. Walther 2010, S. 50 sowie Dyckhoff, Souren 2008, S. 175).

Im folgenden Abschnitt 3.3 werden die Grundlagen ökologischer Bewertungsverfahren erläutert und die Methode „ReCiPe“ zur Auswertung vorgestellt.

3.3 Ökologische Bewertungsverfahren

Einen Sachverhalt zu bewerten bedeutet grundsätzlich diesen in Bezug zu einem Zielsystem zu bringen, um zu einem Urteil über den zu betrachtenden Sachverhalt zu gelangen. Die zur Verfügung stehenden Informationen werden in einem solchen Evaluierungsprozess mit einem subjektiven Wertesystem (Werthaltung des Bewertenden) verbunden. Folglich wird dabei das Zielsystem von individuellen Wertmaßstäben beeinflusst. (vgl. Herrmann 2010, S.155 sowie Posch 2012, S.102f.).

Daraus ergibt sich die Notwendigkeit, im Folgenden auf die Grundlagen ökologieorientierter Bewertungsverfahren einzugehen und die später angewendete Methode „ReCiPe“ näher zur betrachten.

In der Literatur existieren zur Ermittlung der Umweltwirkungen, die durch ein Produkt oder Produktionssystem hervorgerufen werden, verschiedene ökologieorientierte Bewertungsverfahren (vgl. ebd., S.103 sowie Walther 2010, S. 59). Da in einer Ökobilanzierung die Phase der Auswertung, wie bereits in Kapitel 3.1.4 beschrieben, eng mit dem Schritt der Wirkungsabschätzung verbunden ist, basieren unterschiedliche Bewertungsverfahren auf verschiedenen Methoden der Wirkungsabschätzung und den jeweils verwendeten Wirkungsindikatoren (vgl. Dyckhoff, Souren 2008, S. 168 sowie Posch 2012, S.103).

Die Normen zur Ökobilanzierung geben keine konkreten Methoden zur Wirkungsabschätzung oder eine Auswahl an Wirkungsindikatoren vor, sondern beschreiben lediglich das Konzept und das prinzipielle Vorgehen in Form der Klassifizierung und Charakterisierung, wie bereits in Kapitel 3.1.3 dargestellt (vgl. Ausberg et al. 2015, S. 229).

Zur Bewertung von Produkten und Produktionsprozessen werden auswirkungs- bzw. schadensfunktionsorientierte Bewertungsmodelle angewendet. Die Auswirkungen der bilanzierten Stoff- und Energieströme werden anhand von Wirkungsindikatoren verschiedener Wirkungsbereiche abgeschätzt und zu einer Maßzahl aggregiert (vgl. Herrmann 2010, S. 160 sowie Posch 2012, S.118).

Eine wichtige Einteilung bei den auswirkungsorientierten Bewertungsverfahren ist die Unterscheidung zwischen Midpoint- und Endpoint-Ansätzen und den zugehörigen Wirkungskategorien und -indikatoren (vgl. Ausberg et al. 2015, S. 226 & 229f. sowie Herrmann 2010, S. 155).

Zur Veranschaulichung und besserem Verständnis der nachfolgenden Erläuterungen wird in Abbildung 3-6 der Zusammenhang der Midpoint- und Endpoint-Ansätze skizziert.

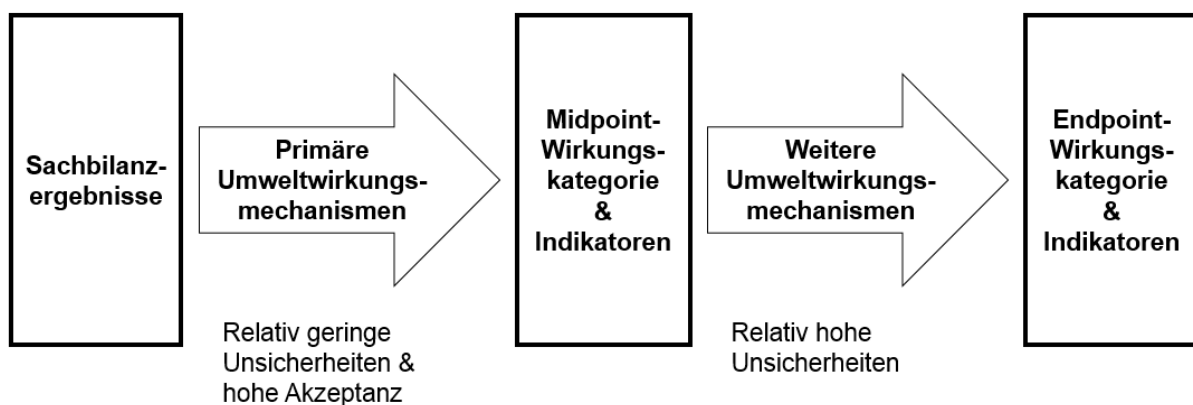


Abbildung 3-6: Zusammenhang zwischen Midpoint- und Endpoint- Bewertungsansätzen (in Anlehnung an Goedkoop et al. 2013, S. 2 sowie Klöpffer, Grahl 2009, S. 224)

Midpoint-Methoden betrachten Umweltbelastungen nur bis zu den direkt beschreibbaren bzw. messbaren Effekten, die aus primären naturwissenschaftlichen Umweltwirkungsmechanismen resultieren. Midpoint-Indikatoren werden verschiedenen Wirkungskategorien zugeordnet und getrennt voneinander betrachtet. Sie befinden sich näher an der Sachbilanz und besitzen zwar eine Beziehung zu den Wirkungsendpunkten, beschreiben diese selber aber nicht.

Endpoint-Methoden beinhalten die gesamten – auch die aus weiteren (sekundären, tertiären, usw.) Umweltwirkungsmechanismen hervorgerufenen – Umweltbelastungen und stellen ein direktes Maß an den Wirkungsendpunkten dar. Dabei werden verschiedene Indikatoren zu Schadenskategorien von schützenswerten Gütern zugeordnet und zusammengefasst. Die dabei häufig verwendeten Schutzgüter sind die folgenden Drei: menschliche Gesundheit sowie jeweils die Qualität von Ökosystemen und Ressourcen (vgl. Ausberg et al. 2015, S. 226 & 229f.; Klöpffer, Grahl 2009, S. 224f.; Reinhardt 2013, S. 33 sowie Herrmann 2010, S. 155).

Dabei ist zu berücksichtigen, dass die primären Umweltwirkungsmechanismen noch gut messbar und somit mit relativ geringer Unsicherheit sowie hoher Akzeptanz verbunden sind. Dagegen sind die weiteren Wirkungseffekte nur mit relativ hohen Unsicherheiten zu quantifizieren (vgl. Goedkoop et al. 2013, S.2 sowie Klöpffer, Grahl 2009, S. 224f.).

In diesem Zusammenhang unterscheiden sich einige Methoden bezüglich des Aggregationsniveaus. Teilaggregierende Methoden enden auf der Ebene der Midpoint-Indikatoren und stellen somit Ergebnisse bezüglich einer Reihe voneinander unabhängiger (Midpoint)-Wirkungsindikatoren dar (vgl. Ausberg et al. 2015, S. 228ff.).

Andere Methoden fassen den Schaden an den Wirkungsendpunkten (in der Regel die drei genannten Schutzgüter) zusammen. Ferner stellen vollaggregierende Methoden durch Bündelung und Gewichtung eindimensionale Ergebnisse (Spitzenkennzahlen) bereit. Ein solcher Normierungs- und Gewichtungsschritt ist den Normen folgend kritisch und somit auch nur ein optionaler Bestandteil der Norm (vgl. Kapitel 3.1.3), wird allerdings in der Praxis zur Entscheidungsfindung angewendet. Des Weiteren wurden Methoden entwickelt, die beide Klassen von Wirkungsindikatoren umfassen und ein konsistentes System mit Midpoint- und Endpoint-Indikatoren bilden (vgl. ebd.).

Im Rahmen dieser Arbeit wird die europäische Methode „ReCiPe 2008“, welche eine schadensbasierte Wirkungsabschätzung mit Äquivalenzfaktoren sowohl auf Midpoint- als auch auf Endpoint-Ebene ermöglicht, angewendet (vgl. ebd., S. 231). Der Name „ReCiPe“ drückt auf der einen Seite aus, dass es sich bei dieser Methode um ein Rezept (engl. recipe) zur Berechnung der Wirkungsindikatoren handelt. Auf der anderen Seite ist es auch ein Akronym und repräsentiert die beteiligten Institutionen, die hauptsächlich bei der Erstellung bzw. Konzeptionierung dieser Methode mitgewirkt haben: RIVM (niederländisches Institut für Gesundheit und Umwelt, Bilthoven, Niederlande), RUN (Radboud Universität Nijmegen, Niederlande), CML (Institut für Umweltwissenschaften, Universität Leiden, Niederlande) und Pré (Pré Consultants, Amersfoort, Niederlande) (vgl. Goedkoop et al. 2013, summary iii). Sie ist eine kombinierte (aktualisierte) Methode des Eco-Indicators 99 und der CML 2001-Methode und kombiniert Vorteile aus den beiden Ansätzen (vgl. Ausberg et al. 2015, S. 231). Die Bewertungsmethode „ECO-Indicator 99“ besaß bereits in der Vergangenheit in der Praxis eine große Bedeutung, sodass diese Methode und die weiterentwickelte Methode „ReCiPe“ in den gängigen Ökobilanz-Software-Produkten integriert sind (vgl. Posch 2012, S. 120).

In der „ReCiPe“-Methode werden die Sachbilanzergebnisse insgesamt 18 Wirkungskategorien auf der Midpoint-Ebene zugeordnet. Tabelle 3-2 listet in einer Übersicht diese Wirkungskategorien mit den zugeordneten Wirkungsindikatoren und den entsprechenden Charakterisierungsmodellen auf.

Tabelle 3-2: Übersicht der 18 Wirkungskategorien auf Midpoint-Ebene in der Bewertungsmethode „ReCiPe“ (vgl. Goedkoop et al. 2013, S.7)

Wirkungskategorie Name (engl.)	Indikator Name (engl.)	Charakterisierungsfaktor Name (engl.)	Abk.	Einheit
climate change	infra-red radiative forcing	global warming potential	GWP	kg (CO2 to air)
ozone depletion	stratospheric ozone concentration	ozone depletion potential	ODP	kg (CFC-115 to air)
terrestrial acidification	base saturation	terrestrial acidification potential	TAP	kg (SO2 to air)
freshwater eutrophication	phosphorus concentration	freshwater eutrophication potential	FEP	kg (P to freshwater)
marine eutrophication	nitrogen concentration	marine eutrophication potential	MEP	kg (N to freshwater)
human toxicity	hazard-weighted dose	human toxicity potential	HTP	kg (14DCB to urban air)
photochemical oxidant formation	photochemical ozone concentration	photochemical oxidant formation potential	POFP	kg (NMVOC6 to air)
particulate matter formation	PM10 intake	particulate matter formation potential	PMFP	kg (PM10 to air)
terrestrial ecotoxicity	hazard-weighted concentration	terrestrial ecotoxicity potential	TETP	kg (14DCB to industrial soil)
freshwater ecotoxicity	hazard-weighted concentration	freshwater ecotoxicity potential	FETP	kg (14DCB to freshwater)
marine ecotoxicity	hazard-weighted concentration	marine ecotoxicity potential	METP	kg (14-DCB7 to marine water)
ionising radiation	absorbed dose	ionising radiation potential	IRP	kg (U235 to air)
agricultural land occupation	occupation	agricultural land occupation potential	ALOP	m ² yr (agricultural land)
urban land occupation	occupation	urban land occupation potential	ULOP	m ² yr (urban land)
natural land transformation	transformation	natural land transformation potential	NLTP	m ² yr (natural land)
water depletion	amount of water	water depletion potential	WDP	m ³ (water)
mineral resource depletion	grade decrease	mineral depletion potential	MDP	kg (Fe)
fossil resource depletion	lower heating value	fossil depletion potential	FDP	kg (oil, crude, feedstock, 42MJ per kg, in ground)

Daneben werden in der Methode auf der Endpoint-Ebene die drei Schadenskategorien bezogen auf die folgenden drei Schutzgüter berücksichtigt (vgl. Goedkoop et al. 2013, S.2ff.):

1. Humangesundheit
2. Ökosystemdiversität
3. Ressourcen-Verfügbarkeit

Aufbauend auf den Zielvorstellungen des „ECO-Indicator 99“ drückt die Wirkungskategorie „Humangesundheit“ aus, dass die mit einem Produkt verbundenen Umweltschäden weder zu Krankheiten noch zu andauernden Behinderungen oder gar zu vorzeitigen Todesfällen führen sollen. In der Kategorie Ökosystemdiversität wird die Qualität eines Ökosystems an dem Verlust von nichtmenschlichen Lebewesen (Spezies) durch Umweltveränderungen gemessen. Die Schadenskategorie Ressourcen wird in Form von sogenannten „surplus energy costs“ ausgewiesen, wodurch zukünftige, globale Kosten für den zusätzlichen Energieaufwand zur Gewinnung der verwendeten Ressourcen wiedergespiegelt werden sollen (vgl. ebd., S. 14ff.; Posch 2012, S. 121 sowie Ausberg et al. 2015, S. 231).

In der Abbildung 3-7 ist der Zusammenhang der 18 midpoint-Wirkungsindikatoren und 3 endpoint-Indikatoren in der Bewertungsmethode „ReCiPe 2008“ anhand einiger Sachbilanzergebnisse und Umweltwirkungsmechanismen dargestellt.

Für eine ausführlichere Darstellung der Wirkungskategorien und –Indikatoren mit den verwendeten Einheiten sowie umfassendere Erläuterungen zu der Methode „ReCiPe“ mit den Annahmen, den Vorteilen aus der Kombination des Midpoint- und Endpoint-Ansatzes und optionalen Gewichtungen wird an dieser Stelle auf weiterführende Literatur (insbesondere auf GOEDKOOPT ET. AL. 2013) verwiesen.

Neben den komplexen Wirkungsabschätzungsmethoden existieren auch „vereinfachte“ Methoden bzw. Sondermodelle zur Bewertung von Umweltbelastungen. Dabei werden nur einzelne oder vereinfachte Wirkungsindikatoren zur Bewertung herangezogen und sind somit weniger datenintensiv und einfacher kommunizierbar. Das methodische Vorgehen der Ökobilanzierung bleibt grundsätzlich erhalten, stimmt allerdings nicht in allen Punkten mit der Normenreihe ISO 14040 z. B. durch die Einschränkung auf einzelne Wirkungsindikatoren überein. Dennoch genießen sie auf Grund ihrer Anschaulichkeit Popularität im politischen und öffentlichen Raum (vgl. Ausberg et al. 2015, S. 234f.).

Beispielsweise existiert der Ausdruck bzw. die Kennzahl des Kohlenstoff-Fußabdruckes (engl. Carbon Footprint), der alle klimawirksamen Substanzen bezüglich ihrer Wirkung auf das globale Klima umfasst und diese relativ zu einem CO₂-Äquivalent berechnet (vgl. ebd.).

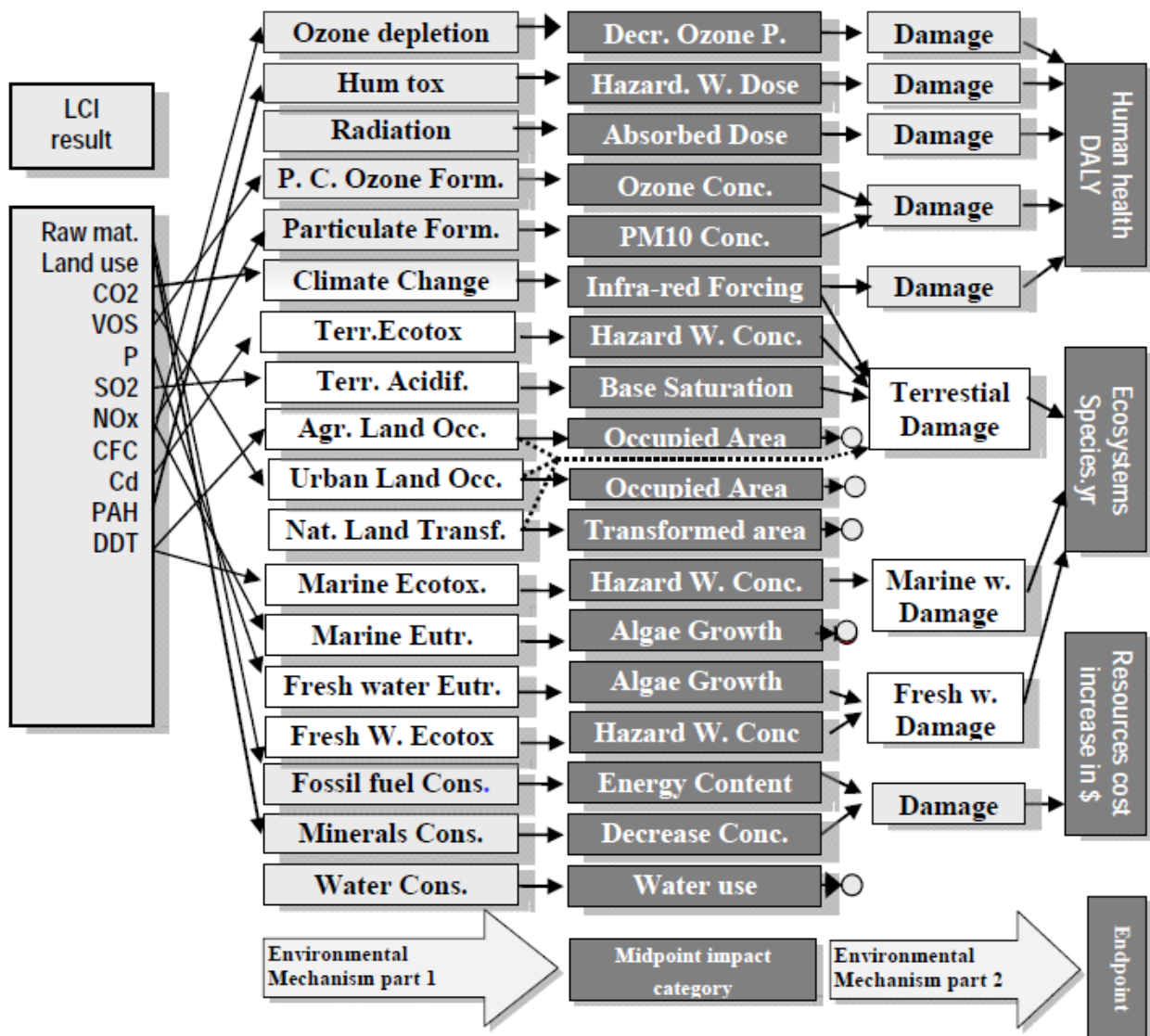


Abbildung 3-7: Zusammenhang der 18 midpoint-Indikatoren (mittig) und 3 endpoint-Indikatoren (rechts) in der Bewertungsmethode „ReCiPe 2008“ (Goedkoop et al. 2013, S. 3)

Ebenso ist noch kurz die Methode des kumulierten Energieaufwandes (KEA) nach der VDI-Richtlinie 4600 zu erwähnen. Dieser Kennwert stellt den Energiebedarf eines Produktes über seinen gesamten Lebensweg dar. Bewertet wird der primärenergetische Aufwand und somit werden auch Energieverbräuche bei der Gewinnung der Primärenergieträger sowie Übertragungs- und Transportverluste bilanziert. Da Energieumwandlungsprozesse zu maßgeblichen Verursachern für umweltschädliche Emissionen gehören, gilt der KEA auch als Leitindikator repräsentativ für die Ergebnisse einer vollständigen Ökobilanz. So korreliert der KEA nicht nur mit einigen Umweltwirkungen, wie z.B. Ressourcenverbrauch, Treibhauseffekt und Gewässertoxizität, sondern auch mit dem Ergebnis von Bewertungsmethoden, wie zum Beispiel der „ECO-Indicators 99“ (vgl. Walther 2010, S. 60 sowie Herrmann 2010, S. 156).

Abschließend ist noch kritisch zu erwähnen, dass auch mit einer Ökobilanz nicht zwangsläufig alle potentiellen Umweltwirkungen erfasst werden. So stellen die in der Literatur zu findenden Listen mit den Umweltindikatoren und den zu Grunde liegenden Umweltwirkungsmechanismen lediglich den gegenwärtigen Kenntnis- und Rezeptionsstand dar. Diese können auf der einen Seite fehlerbehaftet sein und auf der anderen Seite wesentliche Umwelteffekte noch nicht erfassen (vgl. sowie Klöpffer, Grahl 2009, S. 221).

Ferner sind weiterführende Ansätze zu erwähnen, die ausgehend von einer Ökobilanzierung neben ökologischen auch ökonomische und soziale Aspekte über den Lebensweg eines Produktes analysieren bzw. berücksichtigen und Anforderungen widerspiegeln. Dabei handelt es sich um eine lebenszyklusbasierte Nachhaltigkeitsanalyse (engl. Life Cycle Sustainability Assessment, kurz: LCSA), die sich analog zu den drei Dimensionen der Nachhaltigkeit aus den Einzelanalysen zur Ökobilanz (LCA), Lebenszykluskostenrechnung (engl. Life Cycle Costing, kurz: LCC) und produktbezogene Sozialbilanz (engl. social LCA, kurz SLCA) zusammensetzt (vgl. ebd., S.383ff.).

4 Modellierung und ökologische Bilanzierung der Fertigung von zwei CFK-Flügelrippen in Umberto

Nachdem in den vorherigen Kapiteln 2 und 3 der Handlungsbedarf und die relevanten Grundlagen dieser Arbeit erläutert wurden, erfolgt in Kapitel 4 der eigentliche „praktische Teil“ der Modellbildungen und deren Dokumentation. Nach einer Prozessaufnahme wird der Fertigungsprozess eines komplexen Bauteils aus CFK an dem Beispiel von zwei CFK-Flügelrippen mit der Software Umberto NXT Universal in einem „Grundmodell“ abgebildet. Letztendlich werden daraus **zwei verschiedene Modellen** entwickelt und ökologisch bilanziert. Kapitel 4 bildet somit die Grundlage für die Auswertungen und Ergebnisse in Kapitel 5.

Dafür wird zunächst im Abschnitt 4.1 die besagte Flügelrippe als Beispiel eines komplexen Bauteils näher vorgestellt. Danach orientiert sich das weitere Vorgehen an der bereits behandelten Norm zur Ökobilanzierung. Abbildung 4-1 verdeutlicht den weiteren Ablauf in diesem Kapitel und gibt einen Überblick über die wesentlichen Inhalte der einzelnen Abschnitte 4.2-4.4.



Abbildung 4-1: Struktur und wesentliche Inhalte der Abschnitte 4.2-4.4 in Kapitel 4

4.1 Die Flügelrippe als Beispiel eines komplexen CFK-Bauteils

Für die Bewertung ökologischer Auswirkungen bei der Fertigung komplexer CFK-Bauteile wird im Rahmen dieser Arbeit beispielhaft die Herstellung von zwei Flügelrippen betrachtet. Dabei handelt es sich um die Rippen 2 und 3 eines Demonstrator-Flügelkastens aus dem von der Europäischen Union geförderten Forschungsprojekt LOCOMACHS (**L**ow **C**ost **M**anufacturing and **A**ssembly of **C**omposite and **H**ybrid **S**tructures).

Abbildung 4-2 zeigt diesen Flügelkasten mit den beiden schwarzen Rippen aus CFK. Zusammen mit den Vorder- und Hinterholmen sowie den beiden Flügelschalen bilden die Flügelrippen eine kastenförmige Struktur mit hoher Belastungsfähigkeit (Torsionskasten). Dabei werden Flügelrippen als Strukturbauteile angesehen und dienen als Versteifungselemente zur Formgebung der Struktur, Lastaufnahme sowie zur Lasteinleitung (vgl. Martin 2013, S. 162ff.).

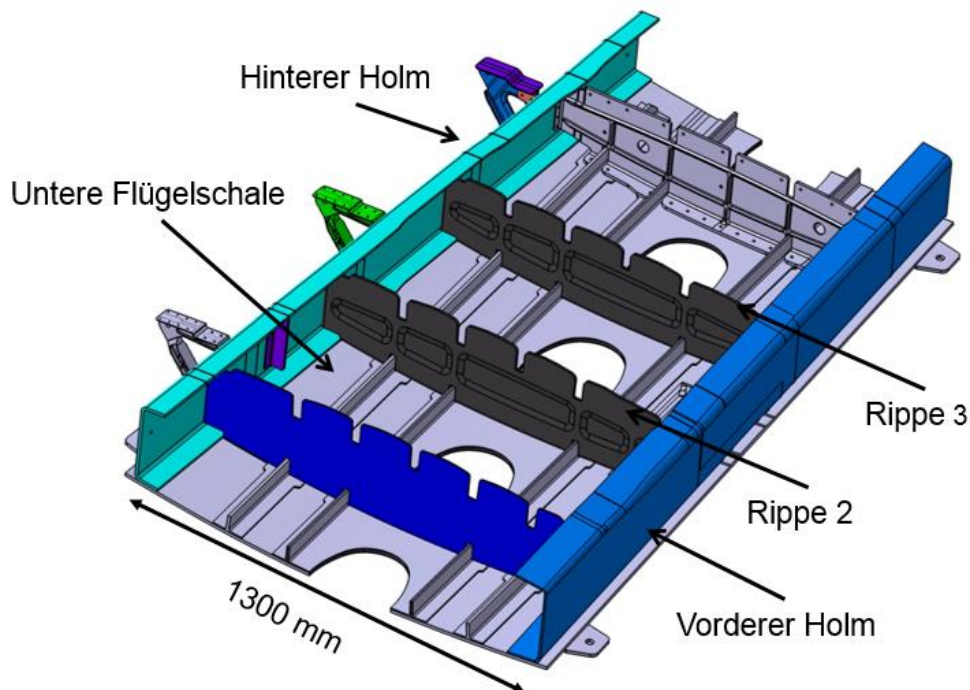


Abbildung 4-2: Rippe 2 & 3 im LOCOMACHS-Flügelkasten

Die beiden CFK-Rippen werden im Rahmen dieses Projektes an dem DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik in dem so genannten SLI-Verfahren (Single-Line-Injection) gefertigt. Dabei handelt es sich um ein autoklavunterstütztes Vakuuminfusionsverfahren, welches Vorteile aus druckunterstützten „Open-Mould“-Verfahren mit den Vorteilen der Harzinfusionstechnik kombiniert. Zur Evakuierung der Fasern und zur Infusion des Harzes wird dabei lediglich nur ein Leitungssystem (Single-Line) mit einem Umschalthahn genutzt (vgl. Kleineberg 2008, S. 23ff.).

Neben technischen Vorteilen durch die Anwendung dieses Verfahrens, wie zum Beispiel eine hohe Oberflächengüte und ein hoher erreichbarer Faservolumengehalt, ist die Doppelnutzung der Leitungssysteme mit einer geringeren Menge an benötigten Hilfsstoffen und somit auch einer geringeren Menge an Produktionsabfällen verbunden (vgl. Kleineberg 2008, S. 23ff.). Somit bietet das SLI-Verfahren auch aus ökologischer Sicht Vorteile.

Auszüge aus dem LDS (Life Data Sheet) zur Herstellung der zwei CFK-Flügelrippen befinden sich im Anhang unter VI.I (Seite 81) sowie VI.II (Seite 82) und beinhalten weiterführende Informationen zu den Materialien sowie zu den Abmessungen der Zuschnitte des Halbzeuges und somit auch zum Lagenaufbau von Rippe 2.

In Abbildung 4-3 ist exemplarisch diese Rippe 2 aus dem LOCOMACHS-Flügelkasten mit weiteren Details dargestellt. Rippe 3 weist ähnliche Formeigenschaften auf, ist in den Abmessungen allerdings kleiner und besitzt zur Gewichtsreduktion ein Feld weniger. Anhand dieser Abbildung und den Erläuterungen zur geometrischen Formkomplexität von FVK unter Abschnitt 2.2 wird im Folgenden der Komplexitätsgrad dieses CFK-Bauteils diskutiert.

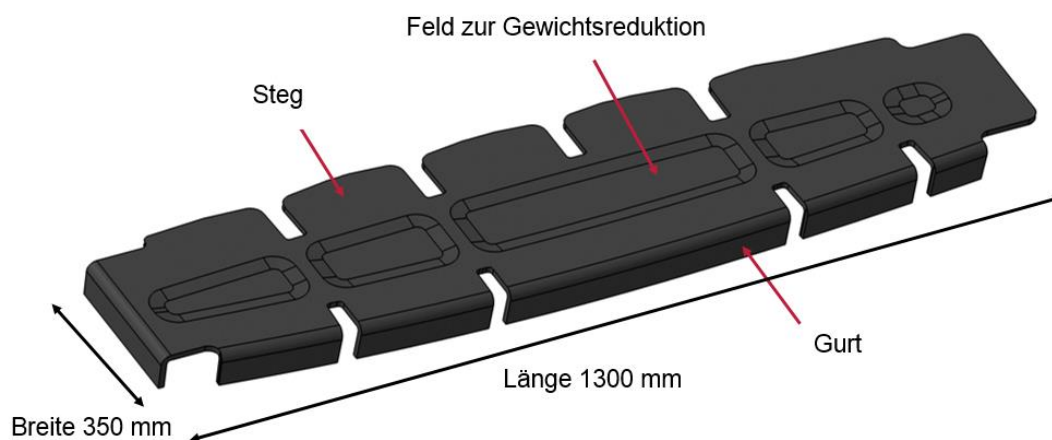


Abbildung 4-3: Rippe 2 als Beispiel eines komplexen CFK-Bauteils

Im Gegensatz zu einer „einfachen“ ebenen Platte besitzt die Rippe im Bereich des Steges Felder mit einem dünneren Querschnitt bzw. einer geringeren Wandstärke zur Gewichtsreduktion. Dies wird durch entsprechende Aussparungen in dem Zuschnitt des textilen Halbzeuges realisiert und verursacht bei dem Ablegen bzw. Drapieren der einzelnen Lagen einen erhöhten Aufwand zur Positionierung. Ferner besitzen die Rippen einen 16-lagigen Aufbau aus zwei verschiedenen Fasergelegen mit unterschiedlicher Faserorientierung (Multiaxial- und Bi-Diagonal-Gelegen). Weiterhin weist die Rippe im Übergang vom Steg zum Gurt bzw. Flansch einen Krümmungsradius von ca. 90° auf. Folglich kann mit den Erläuterungen in Abschnitt 2.2 die Flügelrippe als Beispiel eines dreidimensionalen Strukturbauteils mit einer höheren geometrischen Formkomplexität angesehen werden.

4.2 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Ausgangspunkt dieser Arbeit ist der in Abschnitt 2.3 diskutierte Handlungsbedarf bezüglich der unsicheren Datengrundlage zu den ökologischen Auswirkungen bei der Herstellung von komplexen CFK-Bauteilen. Wie in dem Abschnitt erwähnt und in der zugehörigen Forschungshypothese für diese Arbeit formuliert, besteht das **Ziel** darin, mit der Software Umberto NXT Universal und den softwareintegrierten Umweltdatenbanken an dem konkreten Beispiel der Fertigung von zwei Flügelrippen im autoklavunterstützten SLI-Verfahren die Herstellung komplexer Bauteile aus endlosfaserverstärktem CFK modellhaft abzubilden und nach dem methodischen Vorgehen der Ökobilanzierung Auswirkungen auf die Umwelt von der „Wiege bis zum Fabrikator“ („cradle-to-factory-gate“) zu bewerten (vgl. Klöpffer, Grahl 2009, S. 47).

Im Vordergrund der Auswertung soll ein Vergleich der CO₂-Äquivalente von zwei verschiedenen Umberto-Modellierungen stehen. In der einen Variante werden CO₂-Äquivalente aus verschiedenen Literaturquellen ohne die Nutzung generischer Datensätze aus der softwareintegrierten Umweltdatenbanken verwendet. Das zugehörige Modell mit Literaturwerten wird im Folgenden auch als „**Referenzmodell**“ bezeichnet und basiert auf Werten für CO₂-Äquivalente aus einer Excel-Datenbank mit Literaturquellen, die in einer vorangegangenen Arbeit erstellt worden ist. In einem anderen (zweiten) **Modell** wird demgegenüber die **softwareintegrierte Umweltdatenbank** Ecoinvent Version 3.1 zur Einbeziehung bzw. Berücksichtigung von potentiellen Umweltwirkungen aus den vorgelagerten Prozessen („Vorketten“) genutzt und ebenfalls die resultierenden CO₂-Äquivalente aus den generischen für einen Vergleich berechnet.

Zusätzlich wird mit der Bewertungsmethode „ReCiPe“ (Abschnitt 3.3) ausgewertet, um weitere Erkenntnisse zu potenziellen Umweltwirkungen neben dem Umweltindikator GWP zu gewinnen. Mit den Daten der Modellierung sollen ferner verschiedene Auswertungsmöglichkeiten mit unterschiedlichen Sichtweisen erfolgen und mögliche Szenarien betrachtet werden.

Da beide Flügelrippen parallel auf einem Formwerkzeug in einem Prozess gefertigt werden, beziehen sich sämtliche Eingangs- und Ausgangsgrößen auf die Herstellung von einem Satz Flügelrippen als Endprodukte. Das Gesamtgewicht von Flügelrippe 2 und 3 ist letztendlich der Betrachtungsgegenstand und ist somit als **funktionelle Einheit** festgelegt.

Gemäß des methodischen Vorgehens zur Ökobilanzierung werden im Folgenden die relevanten **Systemgrenzen** und Systemebenen sowie die zu betrachtenden Umweltfaktoren und die damit verbundenen Restriktionen bei der Bilanzierung und Modellierung erläutert.

Der Fertigungsprozess von zwei CFK-Flügelrippen im SLI-Verfahren findet am DLR-Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik an dem Standort in Braunschweig statt. Dabei handelt es sich zunächst nur um eine Betrachtung „von einem Tor bis zum nächsten“ („gate-to-gate“-Analyse), da die Roh- und Hilfsstoffe nicht vor Ort produziert werden, sondern von externen Lieferanten bezogen werden. Im Rahmen dieser Arbeit gab es keine Möglichkeit zur Prozessaufnahme bzw. Gewinnung von Primärdaten bei sämtlichen Herstellern. Grundsätzlich wäre dieses Vorgehen auch mit einem nicht zu rechtfertigen hohen Aufwand verbunden.

Um allerdings eine Betrachtung „von der Wiege bis zum Fabrikator“ („cradle-to-factory-gate“) und somit der gesamten Fertigung zu erreichen, sollen dennoch die potenziellen Umweltwirkungen, die aus der Herstellung der Roh- und Hilfsstoffe oder aus der Bereitstellung der elektrischen Energie resultieren, berücksichtigt werden. Dazu werden vorherige Lebensabschnitte bis zurück zum Ursprung bzw. der Wiege verfolgt und in einer rückwärtsschauenden Betrachtungsweise einbezogen. Diese Erweiterung erfolgt dabei, wie oben bereits erwähnt, in dieser Arbeit in zwei verschiedenen Varianten: Einmal werden in einem Referenzmodell allen beteiligten Eingangsgrößen entsprechende CO₂-Äquivalente aus einer Datenbank mit Literaturwerten zugeordnet. In der anderen Modellvariante werden die Eingangsgrößen um Vorketten aus der Umweltdatenbank Ecoinvent erweitert.

Insgesamt beschränkt sich die Arbeit bei der Betrachtung und Bilanzierung auf den Abschnitt der Produktion der CFK-Flügelrippen. Nachfolgende Lebensabschnitte, wie die Nutzungsphase oder End-of-Life-Verwertungen, werden im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt und somit ebenfalls von den Systemgrenzen ausgeschlossen.

Neben den Systemgrenzen werden auch unterschiedliche Betrachtungsebenen verwendet und hierzu erläutert. In Abbildung 4-4 sind verschiedene Hierarchieebenen in Wertschöpfungsketten mit Wechselwirkungen auf die Umwelt bzw. Austauschbeziehungen zum Umfeld und ihrem Einfluss auf die Energieeffizienz dargestellt.

Übergeordnet und auf der höchsten Systemebene aggregiert, steht die nationale bzw. internationale Wertschöpfungskette mit den Transporten zwischen verschiedenen Unternehmen und Kunden. Auf dieser Betrachtungsebene sind die wesentlichen Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch transportbezogene Kriterien (vgl. Heinemann et al. 2013, S. 279ff.).

Auf der mittleren Hierarchieebene befindet sich das Produktionssystem bzw. die Fabrik als Untergliederung eines Unternehmens. Innerhalb des Fabrikgebäudes befinden sich auf der einen Seite allgemein die technische Gebäudeausstattung (TGA) zur Gewährleistung und Bereitstellung der nötigen Produktionsbedingungen. Auf der anderen Seite stehen hier die einzelnen Prozess- bzw. Maschineneinheiten, die als Wertschöpfungskette miteinander verknüpft sind. Unter Anderem beeinflusst auf dieser Ebene das lokale Klima den Energieverbrauch des Produktionssystems (vgl. ebd.).

Auf der untersten Hierarchieebene, der Prozess- bzw. Maschinenebene, wird ein einzelner Prozess als Prozessmodul, wie bereits in Abschnitt 3.1.2 erläutert, mit dem eigentlich wertschöpfenden Transformationsprozess von Input zu Output dargestellt. Einflussfaktoren auf den Energieverbrauch sind auf dieser Ebene beispielsweise spezifische Produkt- bzw. Prozessparameter (vgl. Heinemann et al. 2013, S. 279ff.).

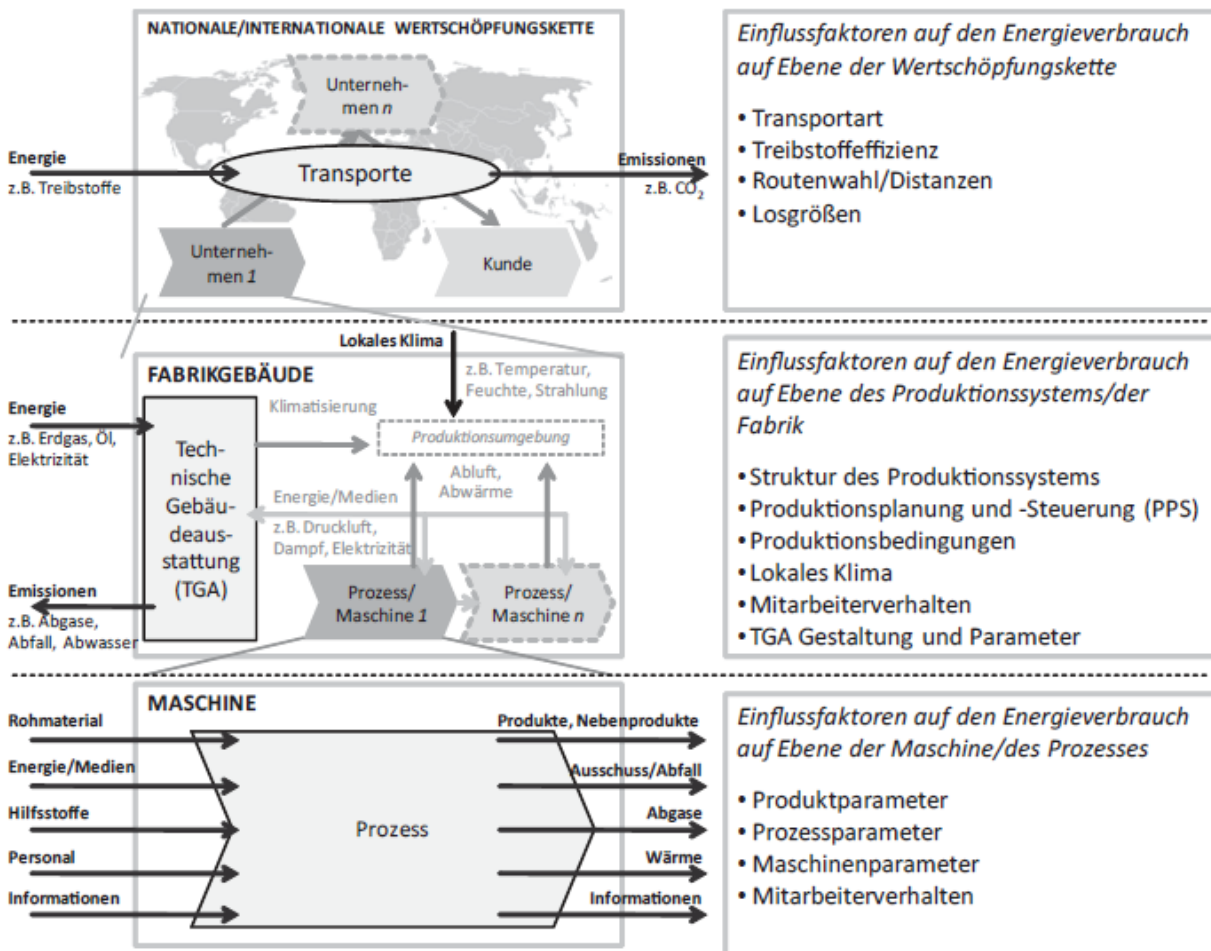


Abbildung 4-4: Hierarchische Ebenen in Wertschöpfungsketten und ihr Einfluss auf die Energieeffizienz (Heinemann et al. 2013, S. 279)

Der Fertigungsprozess bzw. das Produktionssystem zur Herstellung der zwei CFK-Flügelrippen umfasst mehrere miteinander verknüpfte Teilprozesse. Folglich ist die Betrachtung der gesamten Prozesskette auf der mittleren Hierarchieebene der Abbildung 4-4 einzuordnen.

Dagegen erfolgt die Aufnahme der Prozessdaten einzelner Teilprozesse auf der untergeordneten Prozessebene. Dabei werden lediglich ökologisch relevante **Eingangsgrößen** erfasst. Dazu zählen im Rahmen dieser Arbeit die **Rohstoffe**, die **Hilfsstoffe** und der Verbrauch an **elektrischer Energie**, deren Herstellung mit potentiellen Umweltwirkungen verbunden ist.

Dabei wird der Verbrauch bzw. Nutzen dieser Eingangsgrößen nur berücksichtigt, wenn er sich **auf der Prozessebene messen oder sinnvoll schätzen** und somit einem einzelnen Teilprozess **direkt zurechnen** lässt. Übergeordnete Transportprozesse und Energieverbräuche der technischen Gebäudeausstattung, die sich nicht auf den Wertschöpfungsprozess der Prozessebene beziehen, werden nicht berücksichtigt (Beispiel: Klimatisierung). Des Weiteren werden Energieverbräuche, die nicht direkt dem Fertigungsprozess zugerechnet werden können, vernachlässigt. Als konkretes Beispiel sind an dieser Stelle Vakuumpumpen zu nennen, deren Energieverbrauch nur während der effektiv genutzten Dauer berücksichtigt wird.

Ferner werden auch einmalige - auf Prozessebene nicht wiederkehrende – Aufwendungen, die Auswirkungen auf die Umwelt haben, zur Fertigung bzw. Bereitstellung der gesamten Anlagentechnik, wie zum Beispiel die Herstellung des Formwerkzeuges, nicht berücksichtigt. Diese zu Beginn einmalig getätigten, ökologischen „Investitionen“ und deren Amortisierung werden im Rahmen dieser Arbeit nicht betrachtet.

Für die Prozessaufnahme und für die anschließende Modellierung wird der Fertigungsprozess der CFK-Flügelrippen im SLI-Verfahren in **sechs** Teilschritte bzw. **Prozessmodule** untergliedert bzw. aufgeteilt.

Diese sind in Abbildung 4-5 mit einem linearen Systemfließbild und veranschaulichenden Grafiken als Untergliederung der Herstellungsphase innerhalb des Lebenszyklus dargestellt.

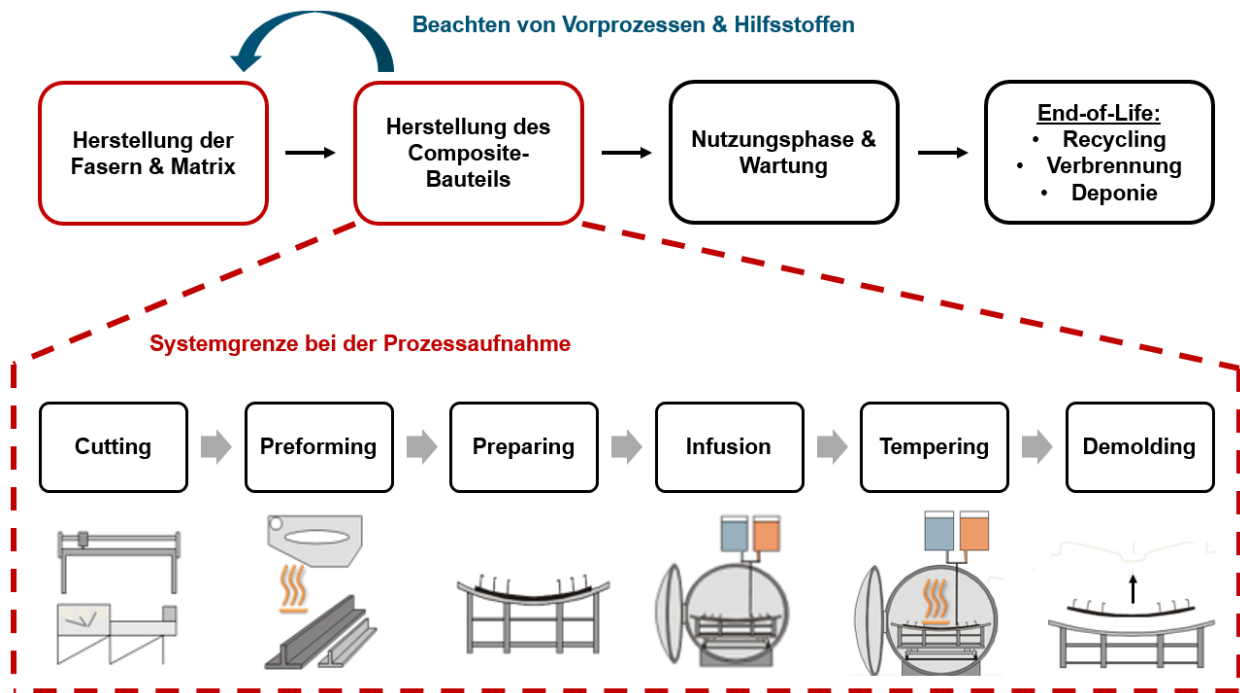


Abbildung 4-5: Systemgrenzen im Lebenszyklus und Untergliederung der Fertigung in Teilprozesse

Diese Abbildung veranschaulicht zunächst die vorangegangenen Erläuterungen zu den Systemgrenzen (rot) bei der Prozessaufnahme sowie innerhalb des gesamten Lebenszyklus. Der blaue Pfeil verdeutlicht die rückwärtsgerichtete Betrachtung bzw. Einbeziehung vorgelagerter Prozesse zur Herstellung der Roh- und Hilfsstoffe aus dem vorherigen Abschnitt des Lebenszyklus. Durch diese Einbeziehung der Vorketten soll in dieser Arbeit die gesamte Herstellung aus dem Lebenszyklus in der Systemgrenze berücksichtigt und bilanziert werden.

Die grauen Pfeile zwischen den einzelnen Teilprozessen symbolisieren die funktionale Abhängigkeit der aufeinanderfolgenden Prozesse. Der Prozess beginnt mit dem Zuschneiden des trockenen Fasermaterials, welches als textiles Halbzeug vorliegt (**Cutting**). In einem zweiten Schritt wird das zugeschnittene Material auf dem Formwerkzeug durch Zwischen-Kompaktieren und einer Binderaktivierung zu einer Vorform drapiert (**Preforming**). Danach folgt der Schritt zum Aufbauen des Vakuums mit zusätzlichen einrüstenden Vorbereitungen des Autoklaven (**Preparing**). Im Autoklaven erfolgt dann der eigentliche Infusionsprozess (**Infusion**), wobei das Fasermaterial mit Harz getränkt wird. Im anschließenden Teilprozess wird das CFK-Bauteil im Autoklaven mit einem gesteuerten Temperatur- und Druckzyklus ausgehärtet (**Tempering**). Zum Abschluss erfolgt das Entformen des Bauteils (**Demolding**), worin auch entrüstende Vorgänge und Reinigungsarbeiten für eine erneute Bauteilherstellung enthalten sind.

Nachgelagerte Schritte der Herstellung, wie zum Beispiel eine Nachbearbeitung, werden nicht mehr betrachtet und befinden sich somit auch außerhalb der Systemgrenze, wie – bereits erwähnt – die anschließende Nutzungs- und End-of-Life-Phase im Lebenszyklus des CFK-Bauteil.

4.3 Sachbilanzierung

Zu Beginn der Sachbilanzierung erfolgt in dem Abschnitt 4.3.1 die Prozessaufnahme bzw. die Sammlung und Auswertung der prozessspezifischen Daten innerhalb des gesetzten Untersuchungsrahmens bei der Fertigung der zwei CFK-Flügelrippen. Die Sachbilanzierung erfolgt danach mit dem Einsatz der Software Umberto NXT Universal rechnerunterstützt. Die gewonnenen Prozessdaten sind dabei der Ausgangspunkt für die anschließende Modellierung. Dabei wird zunächst in Abschnitt 4.3.2 ein grundlegendes Modell mit den Prozessdaten umgesetzt. Das „Grundmodell“ wird dann in einer Variante um generische Datensätze aus den softwareintegrierten Umweltdatenbanken zur Einbeziehung bzw. Berücksichtigung von potentiellen Umweltwirkungen aus vorgelagerten Prozessen auf der Seite der Eingangsgrößen (Inputs) erweitert. Der Aufbau dieses Modells wird in Abschnitt 4.3.3 erläutert.

4.3.1 Prozessaufnahme und Datensammlung

Im Rahmen dieser Arbeit soll insbesondere das „Zustandekommen“ der Prozessdaten erläutert und nachvollzogen werden. Eine ausführliche Beschreibung des gesamten Fertigungsablaufs und der Teilprozesse erfolgt in dieser Arbeit nicht, da die Verwendung der einzelnen Produktionsfaktoren bzw. Materialien zur Herstellung der CFK-Flügelrippen somit ohne weitere Erläuterung als technisch sinnvoll und zunächst als gegeben angesehen wird.

Im Rahmen einer vorangegangenen Arbeit von AL-LAMI 2015 wurde unter anderem eine Excel-Datenbank mit Literaturwerten für CO₂-Äquivalente für sämtliche Materialien, die bei der Herstellung eines Bauteils aus CFK verwendet werden können, angefertigt. Des Weiteren wurde dort auch der Fertigungsprozess der beiden CFK-Flügelrippen aus dem LOCOMACHS-Projekt begleitet und diverse Prozessinformationen und -daten aufgezeichnet (vgl. Al-Lami 2015).

Die daraus resultierenden, ökologisch relevanten Prozess- und Materialinformationen bezüglich des Verbrauchs an Roh- und Hilfsstoffen sowie elektrischer Energie und der jeweiligen CO₂-Äquivalente bilden die Grundlage für diese Datensammlung. In einer weiteren Feldbeobachtung wurden die bereits gewonnenen Daten überprüft bzw. validiert.

Der Verbrauch an Roh- und Hilfsstoffen wurde während der Fertigung je nach Betrachtungsgegenstand gemessen (z.B. durch Wiegen) oder in Einzelfällen geschätzt. Der Verbrauch an elektrischer Energie wurde entweder über zwischengeschaltete elektrische Messgeräte ermittelt, über eine Verknüpfung mit der standortweiten Betriebstechnik erfasst und abgefragt oder ebenfalls, soweit keine andere Möglichkeit bestand, über die Nutzungsdauer einer Anlage und deren elektrischen Anschlussleistung geschätzt.

Die auf diese Weise ermittelten Prozessdaten befinden sich gegliedert nach den einzelnen Teilprozessen in den ersten vier Spalten der Tabellen im Anhang unter VI.III (Seite 83) bis VI.VIII (Seite 89). Die weiteren Spalten und Informationen werden in späteren Abschnitten thematisiert. In diesem Abschnitt zur Prozessaufnahme und Datensammlung sind zunächst nur die ersten vier Spalten der verwendeten Produktionsfaktoren (factors), der aufgezeichneten Werte (recorded values), der angenommenen bzw. festgelegten Werte (assumed values) sowie deren Einheit (units) von Bedeutung.

Auszugsweise befinden sich nun exemplarisch diese vier Spalten der Tabelle 4-1 aus dem Anhang unter VI.III (Seite 83) mit den Daten für den ersten Teilprozess des Materialzuschnitts (TP 1 Cutting). Mit dieser Tabelle wird im Folgenden das Zustandekommen der in der Modellierung verwendeten Prozessdaten verdeutlicht.

Tabelle 4-1: Exemplarischer Ausschnitt der Prozessdaten: TP 1 Cutting

Factor	Recorded values	Assumed value	Unit
Equipment & Tools			
Cutting computer (el. E)	0,16 0,17	0,2	kWh
Cutter (el. E)	6,15 10,62	10	kWh
Fiber (Input = use + waste; * no coherent data; ** value from software with cutting layout)			
Bi-Diagonal	- * use 6,6 **	10,5 (use 7)	m ²
Triaxial	- * use 6,6 **	10,5 (use 7)	m ²
Fiber Waste (* no coherent data; ** value from software with cutting layout)			
Bi-Diagonal	- * 3,5 **	3,5	m ²
Triaxial	- * 3,5 **	3,5	m ²
Supplies			
Cotton gloves	2	2	pair
Cutting paper	26,86 27,18	27	m ²

Die Bezeichnungen der Produktionsfaktoren (factors) und deren Gliederung sowie die Einheiten entsprechen dabei der Excel-Datenbank. Dabei wurden für die Einheiten der einzelnen Verbrauchsmaterialien „einfach handhabbare“ bzw. messbare Größen während der Prozessaufnahme verwendet.

Die exakten Werte aus der Prozessaufnahme (recorded values) wurden in einem weiteren Schritt auf einen **sinnvollen Wert gerundet bzw. festgelegt** (assumed values), da sehr kleine Werte und viele Nachkommastellen einerseits bei der nachfolgenden Modellierung unhandlich sind und andererseits das Risiko einer gewissen Pseudogenauigkeit mit sich bringen.

Die Gefahr der Scheingenauigkeit ist darauf zurückzuführen, dass die zu Grunde liegenden Messungen und Beobachtungen eine Darstellung der Ergebnisse mit einer hohen Präzision mit mehr als einer Nachkommastelle (außer dem Wasserverbrauch) nicht hergeben.

Die Werte wurden in der Regel gemäß einer **konservativen/ vorsichtigen Betrachtungsweise** nach oben auf einen höheren Wert gerundet bzw. korrigiert, sodass die Ergebnisse am Ende fälschlicherweise nicht „besser als in der Realität“ sind.

Bei dem Auftreten zwei sehr unterschiedlich aufgezeichneter Quantitäten wurde dementsprechend der höhere Wert gewählt.

Bei inkohärenten Daten oder nicht zu ermittelnden Daten während der Prozessaufnahme beruhen die Quantitäten auf Informationen aus dem LDS der Fertigung der zwei CFK-Flügelrippen oder auf sinnvollen und wiederum konservativen Annahmen und Einschätzungen.

Da im Rahmen dieser Arbeit der resultierende Abfall aller Materialien sowie der Verbrauch an elektrischer Energie nicht durch nachfolgende Verwertungsmaßnahmen, wie zum Beispiel Recycling oder Austausch der entstandenen Abwärme, genutzt wird, erfolgen weder nachträgliche „Gutschriften“ an ökologischen Umweltwirkungen noch Stoffrekursionen. Somit entfällt die Bilanzierung von abfallverwertenden Maßnahmen.

Ein Ergebnis der vorangegangenen Arbeit ist, dass der Arbeitsschritt des Materialzuschnitts ca. 70% der CO₂-Äquivalente der gesamten Herstellung ausmacht (vgl. Al-Lami 2015, S. 50). Dies ist auf die energieintensive Herstellung der Kohlenstofffasern selbst zurückzuführen (vgl. AVK 2014, S.147ff.). Zusätzlich ist bei komplexeren Geometrien der Zuschnitt an benötigtem Fasermaterial mit einem geringeren Ausnutzungsgrad des textilen Halbzeuges verbunden, sodass aus dem Prozess des Materialzuschnitts auch ein großer Anteil an Verschnitt bzw. Ausschuss (fiber waste) resultiert. Das verschnittene Material muss also zusätzlich als Einganggröße aufgewendet und berücksichtigt werden.

Wegen der hohen Bedeutung und inkohärenten Daten aus den Prozessaufnahmen wird im Folgenden der Verbrauch an Fasermaterial bzw. dem Ausnutzungsgrad näher betrachtet. Dazu wurde das Layout jeder einzelnen Lage aus den CAD-Daten der beiden CFK-Flügelrippen abgewickelt und in das PC-Programm des Cutters importiert.

Anschließend wurden die Lagen mit gleicher Faserorientierung für das Zuschneiden von der gleichen Rolle (Gelege mit gleichem Aufbau und Faserorientierung) in eine Datei geladen. So ergaben sich aus den Lagen mit insgesamt vier verschiedenen Faserorientierungen vier Zuschnitts-Dateien. In diesen wurden jeweils vier Lagen von Rippe 2 und 3 (siehe Lagenaufbau Rippe 2 im Anhang unter VI.II; Seite 82) berücksichtigt. Nach dem Einstellen der entsprechenden Rollenbreite des angelieferten Materials konnte dann mit der Software der Zuschnitt mit einem möglichst optimalen Layout (hoher Ausnutzungsgrad) simuliert werden.

Exemplarisch ist dies im Anhang unter VI.IX (Seite 90) mit dem Zuschnitt des Triaxial-Carbon-Geleges [135/90/45] und der Rollenbreite von 1270 mm (entspricht der angelieferten Rolle an Fasermaterial) durchgeführt worden. Dort sind die berücksichtigten Lagen (Lagennummern 1, 5, 10 und 14) von Rippen 2 & 3 dargestellt und der Zuschnitt mit der Software simuliert worden.

An diesen Verbrauchsdaten der Fasermaterialien und dem Ausnutzungsgrad aus dem Anhang orientieren sich die Quantitäten in Tabelle 4-1 bzw. im entsprechenden Anhang VI.III (Seite 83). Die Werte (Materialausnutzung von ca. 65%) wurden im weiteren Verlauf auf die zwei verschiedenen Gelege mit den zugehörigen Faserorientierungen hochgerechnet und im Sinne der Handhabbarkeit für die Modellierung sinnvoll festgelegt.

Die festgelegten Zahlenwerte in der Spalte der „assumed values“ in den Tabellen für jeden Teilprozess im Anhang VI.III (Seite 83) bis VI.VIII (Seite 89) sind die im Rahmen der Sachbilanzierung gewonnen Prozessdaten und bilden die Grundlage für die nachfolgenden Modellierungen.

4.3.2 Modellierung eines Grundmodells in Umberto mit Prozessdaten

Ab diesem Punkt erfolgt die Sachbilanzierung mit dem Einsatz der Software Umberto NXT Universal rechnerunterstützt. In diesem Abschnitt wird ein „Grundmodell“ aufgebaut, das die beteiligten Teilprozesse linear hintereinander mit den verwendeten Materialien abbildet und die Werte aus der vorherigen Prozessaufnahme verwendet. Dazu werden für das weitere Verständnis insbesondere das Vorgehen sowie die **Modellvorstellungen, Annahmen und Abstraktionen** erläutert. Dies reduziert die Komplexität aus der Realität und vereinfacht die Modellierung.

Zu Beginn werden die zu verwendenden Materialien in diesem Grundmodell manuell in den Materiallisten angelegt und deren Einheiten definiert. Die Bezeichnung und die Einheiten orientieren sich wiederum an den Daten der Excel-Datenbank. Zusätzlich werden für die Verbindung „Austauschprodukte“ zwischen den Teilprozessen, wie zum Beispiel ein „fertiger Preform“ als Ausgangsprodukt des Preforming-Prozesses (TP 2) und als Eingangsgröße des Preparing-Prozesses (TP 3), erstellt. Das Endprodukt der Prozesskette wurde ebenso als fertiges CFK-Bauteil bestimmt. Da alle Materialien (und verwendete Energien) vor dem Transformationsprozess als Rohstoffe oder sonstige Vorprodukte mit positivem Wert angesehen werden, sind zunächst alle angelegten Materialien als „Güter“ in dem Modell klassifiziert.

In den Transformationsprozessen selbst werden die entlang der Prozesskette nicht weiter verwendeten Materialien und Energie als Abfälle, Emissionen oder genutzte Energie bzw. Abwärme angesehen und somit zu Materialien und Energien mit einem negativem Wert („Übel“) gewandelt.

Weitere durch den Fertigungsprozess laufende Outputs aus einem Einzelprozess (gleichzeitig auch Input des nachgelagerten Teilprozesses) bleiben dagegen Güter mit einem positiven Wert. Dabei ist zu erwähnen, dass in der modellhaften Abbildung der Realität die Übel, die in einem Teilprozess entstehen, auch verursachungsgerecht in dem zugehörigen Teilprozess abgeführt werden und nicht weiter entlang der Prozesse berücksichtigt und „mitgeschleppt“ werden. In der Realität wird dagegen ein Teil der Abfälle, z.B. Folien für den Vakuumaufbau, erst am Ende der Prozesskette beim Prozessschritt des Entformens anfallen.

Mit Ausnahme des Materialzuschnitts werden alle Teilprozesse als Black-Box mit nur einem positiven Ausgangsprodukt (single output) betrachtet und modelliert, um Allokationen zu vermeiden, da diese aus wissenschaftstheoretischer Sicht grundsätzlich als problematisch anzusehen sind (vgl. Klöpffer, Grahl 2009, S. 94ff.).

Dabei ist in den Umweltwissenschaften unter Allokation die Zuordnung von auftretenden Umweltbelastungen bei Koppelproduktion zu verstehen. Allokationsverfahren sind daher bei einer gleichzeitigen Herstellung von mindestens zwei Produkten innerhalb eines Prozessmoduls anzuwenden (vgl. ebd.).

Eine weitere, einschränkende Vereinfachung in der Modellierung ist die Tatsache, dass die gesamte aufgewendete Energie eines Teilprozesses in - nicht näher spezifizierte und aufgeteilte - genutzte Energie und Abwärme („Waste, Residues, Used Power, Heat & Emissions“) umgewandelt wird. In der Realität dagegen wird ein Teil der Energie auch in der CFK-Struktur zur Vernetzung der Harz-Polymerketten aufgewendet und gespeichert.

Für den Aufbau des Grundmodells der Fertigung der beiden CFK-Flügelrippen werden die in der Software Umberto unter Abschnitt 3.2.3 beschriebenen Modellierungselemente Stellen (Input, Output & Verbindung), Transitionen (Prozess) und Verbindungen (Stoff- und/ oder Energiestrom) verwendet.

Wegen der Übersichtlichkeit und Qualität der Abbildungen des Gesamtmodells aus der Software befinden sich im Anhang unter VI.X (Seite 91) bis VI.XIV (Seite 95) die einzelnen Module ausschnittsweise für den jeweiligen Teilprozess.

An dieser Stelle wird in Abbildung 4-6 exemplarisch der erste Teilprozess des Materialzuschnitts aus dem Gesamtmodell dargestellt (vgl. Anhang VI.X). Anhand dieser Abbildungen sollen die bisherigen und weiter folgenden Erläuterungen veranschaulicht werden.

Für jedes verwendete Material wurde eine Inputstelle (grüne Kreise mit senkrechtem Strich) verwendet und zur besseren Nachvollziehbarkeit entsprechend bezeichnet (Beispiel: „P1-3, Fiber Triaxial). In den Outputstellen (rote Kreise mit senkrechtem Strich) sind dagegen alle Übel aus dem jeweiligen Teilprozess (Bsp. P7) zusammengefasst, wie z.B. Abfälle, genutzte Energie und Abwärme sowie Emissionen.

Die Connection-Stellen (gelbe Kreise) sind Verbindungsstellen bzw. Verknüpfungen zum nachgelagerten Prozess, sodass der Output zugleich als Input in den nachfolgenden Schritt „fließen“ kann.

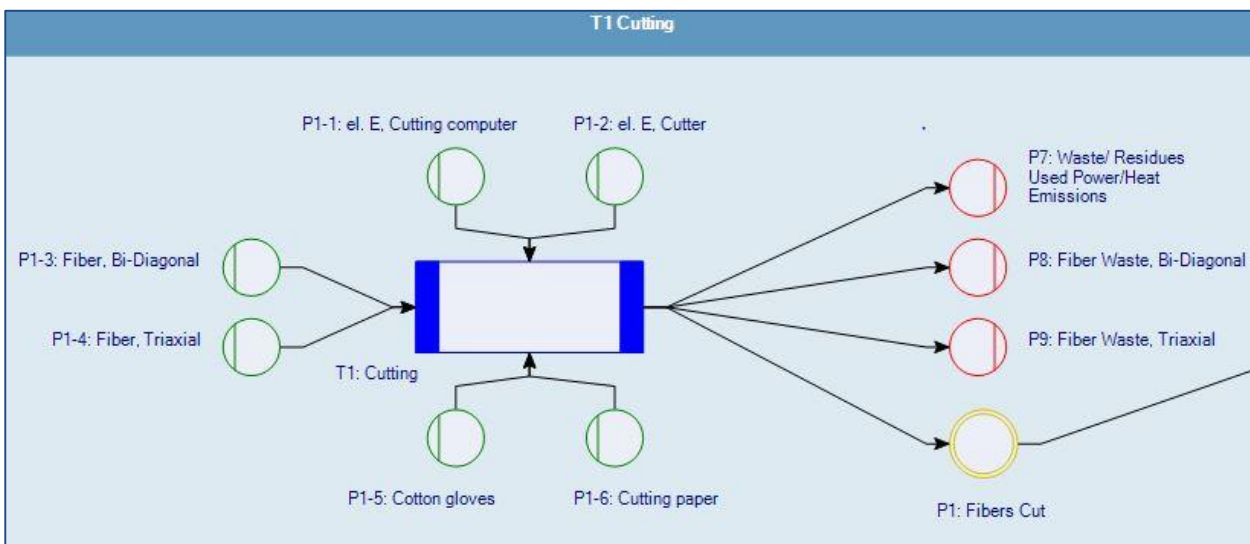


Abbildung 4-6: Ausschnitt aus dem Grund- und Referenzmodell in Umberto - Teilprozess 1 Cutting

In diesem ersten Teilprozess „Cutting“ tritt der „Sonderfall“ der Koppelproduktion ein. Die beiden textilen Halbzeuge (zwei verschiedene Gelegevarianten) werden innerhalb der Connection Stelle der zugeschnittenen Fasern (P1: Fibers Cut) im Ausgangsbereich noch getrennt voneinander als zwei positive Ausgangsprodukte geführt, sodass eine Allokation angewendet werden muss. In dem nachfolgenden Teilprozess werden die Faserhalbzeuge dann bereits als ein (fertiger) zusammenhängender Preform (Single Output) aufgefasst.

Im Prozess des Materialzuschnitts (TP 1 Cutting) wird eine „gerechte“ Allokation über den Anteil an der gesamten Outputmenge (und deren Einheit) angewendet. Da die gleiche Menge an Triaxial- und Bi-Diagonal-Gelege zugeschnitten wurde, werden die von beiden Halbzeugen genutzten Eingangsgrößen (z.B. die verbrauchte Energie des Cutter) gemäß der 50:50 Regel zu gleichen Anteilen beiden zugeschnittenen Gelegen zugerechnet (vgl. Klöpffer, Grahl 2009, S. 94ff. & S.123).

In Bezug auf das gesamte Modell werden alle Transitionen (Rechtecke) durch Hinzufügen der verwendeten Materialien aus der Materialliste und über benutzerdefinierte Funktionen (UDF= user defined functions) spezifiziert. Dabei wurden die in Abschnitt 4.3.1 aufgenommenen Prozessdaten mit den Quantitäten und Einheiten als „fixe“ Werte über Formeln ohne zusätzliche Parameter definiert. Um die Vorgehensweise nachvollziehen zu können, befinden sich im Anhang unter VI.XV (Seite 96f.) benutzerdefinierte Funktionen, die zur Spezifikation der einzelnen Teilprozesse des Grundmodells angelegt wurden.

Die Verwendung von benutzerdefinierten Funktionen lässt in der Zukunft die Möglichkeit offen, die Transitionen mit beliebig komplexen Funktionen zur Abbildung der Realität zu erweitern. In dieser Arbeit werden dagegen nur die festen Zahlenwerte aus der Prozessaufnahme verwendet.

Abschließend ist bei der Modellierung mit einer Ökobilanz-Software auf die Sicherstellung der sachgerechten Verknüpfung und auf die Einhaltung von logischen Kausalitätsbeziehungen und naturwissenschaftlichen Grundlagen zu achten und auf Konsistenz zu überprüfen (vgl. ebd., S. 63 ff. & 167).

Allgemein ist die Konsistenz bei den Single-Output-Prozessen (TP 2-6) dadurch gegeben, dass mit den beschriebenen Annahmen und benutzerdefinierten Funktionen zur Prozessspezifikation die jeweiligen eingehenden Materialien als Abfälle oder im CFK-Bauteil auch das System eines Teilprozesses verlassen. So sind unter den benutzerdefinierten Funktionen die Ausgänge abhängig von dem jeweiligen Input definiert (vgl. Anhand unter VI.XV mit den UDF: Output Y= Input X). Bei einem Einheitenwechsel eines Materials innerhalb eines Prozessschrittes wurde dies entsprechend berücksichtigt und entsprechend in den Funktionen kommentiert. Weiterhin entspricht die Summe der Systemeingänge an elektrischer Energie der Summe der Systemausgänge an verbrauchter Energie/ Abwärme eines Teilprozesses.

Die aufrecht zu erhaltende Logik bei der Koppelproduktion in dem Fall des Materialzuschnitts (TP 1) besteht darin, dass der Ausschuss an verschnittenem Material nur dem jeweiligen Ursprungsmaterial zugerechnet werden kann. Aus dem Zuschneiden von Triaxial-Gelegen kann logisch gesehen kein Verschnitt an Bi-Diagonal-Gelege resultieren. Dies wurde bei der Modellierung des Prozesses berücksichtigt und überprüft.

Dieses Grundmodell stellt somit zunächst ein „funktionierendes“ Modell zur Sachbilanzierung mit den aufgenommenen Prozessdaten dar. Es ist im weiteren Verlauf einerseits die Grundlage für das Hinzufügen der LCIA-Faktoren in Abschnitt 4.4 zum Referenzmodell mit den CO₂-Äquivalenten aus den Literaturquellen. Andererseits ist es auch die Grundlage für die Erweiterung um Datensätze aus der Umweltdatenbank zur Einbeziehung der „Vorketten“ im folgenden Abschnitt.

4.3.3 Erweiterung des Grundmodells um generische Daten aus der Umweltdatenbank

Im folgenden Abschnitt wird das zuvor beschriebene Grundmodell in der Software Umberto NXT, in dem bisher nur die gesammelten Prozessdaten (der Verbrauch an Energie und Materialien) berücksichtigt sind, um generische Datensätze (vgl. S.16) aus der softwareintegrierten Umweltdatenbank zur Berücksichtigung von Vorketten erweitert und somit das „Vorkettenmodell“ aufgebaut.

In den generischen Datensätzen sind neben den verwendeten Inputs und Outputs auch die zugehörigen LCIA-Faktoren für verschiedene Umweltindikatoren (nicht nur GWP₁₀₀ auf der Basis von CO₂-Äquivalenten) enthalten. Sie bilden somit auch die potentiellen Umwelteinwirkungen ab, die aus den vorgelagerten Prozessen zur Herstellung des jeweiligen Materials oder der Energie resultieren.

Abbildung 4-7 veranschaulicht die Berücksichtigung der Vorketten für eine vollständige Sachbilanzierung an dem Beispiel des Verbrauchs von elektrischer Energie durch Nutzung von Ecoinvent-Datensätzen zur Stromerzeugung. Die Informationen und Elementarflüsse in einem generischen Datensatz werden dabei auch auf die funktionelle Einheit (fE) skaliert.

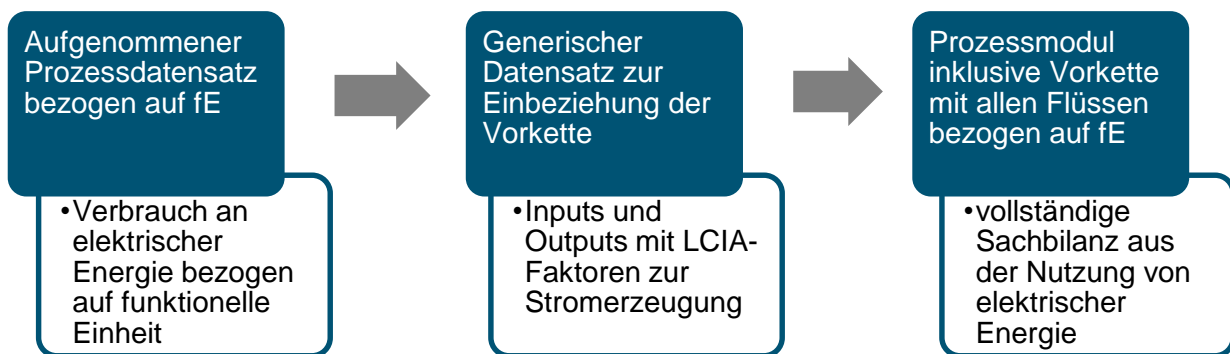


Abbildung 4-7: Berücksichtigung von Vorketten in der Sachbilanz über generische Datensätze (in Anlehnung an Klöpffer, Grahl 2009, S. 133)

Dadurch wird gemäß der Zielsetzung dieser Untersuchung eine vollständige Sachbilanzierung „von der Wiege bis zum Fabrikator“ bezogen auf die funktionelle Einheit erreicht (vgl. Klöpffer, Grahl 2009, S. 133ff.). Auf die LCIA-Faktoren der generischen Daten wird im Schritt der Wirkungsabschätzung unter 4.4 weiter eingegangen.

Um nun diese generischen Datensätze in das Grundmodell zu integrieren, werden die zuvor manuell definierten Materialien durch ähnliche bzw. entsprechende Materialien, die als „gebräuchliche“ Materialien in der Umweltdatenbank Ecoinvent 3 Version 3.1 vorhanden sind, substituiert.

Da die während der Herstellung der CFK-Flügelrippen verwendeten Roh- und Hilfsstoffe in dieser Form nicht in der Datenbank zu finden sind, erfolgen bei der Substituierung sinnvolle Annahmen und Abschätzungen. Diese orientieren sich an Produktdatenblättern aus der Fertigung, Angaben der Hersteller und Lieferanten oder weiterer Quellen. Beispielsweise diente die im Anhang unter VI.XVI auf Seite 102 dargestellte Übersicht eines Aufbaus mit den verwendeten Materialien einer Vakuuminfusion als Informationsquelle für die Rohstoffbasis, z.B. wird Siegelkit aus Kautschuk und Abreißgewebe aus Polyamid hergestellt.

Nach der Auswahl eines adäquaten Substituierungsproduktes aus der Umweltdatenbank erfolgt bei dem Hinzufügen zur Modellierung in der Software Umberto noch die Festlegung von weiteren Modelleigenschaften des generischen Datensatzes in Bezug auf das Systemmodell, dem Typ und der Bezugsregion. Dabei ist nach Möglichkeit auf eine konsequente Umsetzung der gleichen Modelleigenschaften bei den jeweiligen Datensätzen zu achten.

Für alle generischen Modelle wurden als Systemmodell „allocation default“ und als Typ ein „result“-Prozess ausgewählt. Als Bezugsregion, aus der die generischen Daten stammen und auch gelten, wurde nach Möglichkeit immer die Region Europa (RER= Region Europe) und in Ausnahmefällen (wenn nicht anders vorhanden) Deutschland (DE) oder globale Welt (GLO=Global) festgelegt. Da für diese Arbeit nur eine begrenzte Anzahl an verfügbaren Daten mit Bezugsregion DE zur Verfügung stand, wurde Deutschland nicht als „Standard“-Bezugsregion ausgewählt.

Des Weiteren ist zu beachten, dass sich die bisher verwendeten Einheiten, die aus der Prozessaufnahme resultieren, von den Einheiten in den generischen Datensätzen unterscheiden, sodass Umrechnungen der Einheiten durchzuführen sind, um weiterhin die gewonnenen Zahlenwerte aus der Prozessaufnahme nutzen zu können. Diese Umrechnungen basieren auf den Angaben zur Masse pro Einheit aus den Tabellen mit den Prozessdaten im Anhang unter VI.III (Seite 83) bis VI.VIII (Seite 89).

Die verwendeten Vorketten zum Austausch der bisherigen Materialien aus der Umweltdatenbank und die entsprechend umgerechneten Zahlenwerte für den Aufbau des Modells mit Vorketten in Umberto befinden sich gegliedert nach den Teilprozessen im Anhang dieser Arbeit. Weitere Informationen insbesondere zu den entsprechenden CO₂-Äquivalenten sind unter VI.XVII (Seite 103) bis VI.XXII (Seite 109) zu finden.

Auf diese Weise werden alle Materialien des Grundmodells durch generische Datensätze mit Vorketten ausgetauscht und ebenfalls die benutzerdefinierten Funktionen zur Spezifikation der Transitionen an die veränderten Zahlenwerte durch den Einheitenwechsel angepasst. Zu erwähnen ist dabei, dass es in der **Umweltdatenbank Ecoinvent** **aktuell keinen passenden Datensatz für die Herstellung der Kohlenstofffasern** gibt und somit die Fertigung der CFK-Flügelrippen allein mit generischen Daten aus dieser Datenbank nicht abgebildet werden kann. Alternativ wurde für die Herstellung der Kohlenstofffasern auf einen generischen Datensatz aus der **Umweltdatenbank GaBi** (Nr. 7 „Plastics SP 27“) zurückgegriffen, um eine Vorkette mit den potentiellen Umweltwirkungen der Kohlenstofffasern in dem Modell umzusetzen.

Die Teilprozesse des „fertigen Vorkettenmodells“ sind im Anhang unter VI.XXIII (Seite 110) bis VI.XXIX (Seite 116) dargestellt. Hervorzuheben ist dabei, dass die Vorketten jeweils zugehörige In- und Outputstellen besitzen, über die die Stoff- und Energieflüsse mit der Umwelt ausgetauscht und für die Sachbilanz bilanziert werden.

Die veränderten benutzerdefinierten Funktionen sind im Anhang unter VI.XXX ab der Seite 117 zu finden. Abschließend ist wiederum die Logik bzw. Konsistenz der Modellierung, wie am Ende von Abschnitt 4.3.2 beschrieben, zu überprüfen.

Als Ergebnis dieses Kapitels sind die erhobenen Prozessdaten in einem Grundmodell umgesetzt worden und dieses ist um generische Daten zur Darstellung der Vorketten bei der Fertigung der zwei CFK-Flügelrippen erweitert worden. Nun lassen sich alle Stoff- und Energieflüsse mit der Software Umberto bezogen auf die funktionelle Einheit der beiden CFK-Flügelrippen berechnen. Daraus resultiert die vollständige Sachbilanz mit den jeweiligen Mengenangaben. Eine solche „reine“ Auflistung der Bilanzposten ohne die Verknüpfung mit Umweltfaktoren ist in dieser Arbeit nicht weiter von Interesse. Daher folgt nun der Abschnitt der Wirkungsabschätzung.

4.4 Wirkungsabschätzung mit Aufbau des Referenzmodells

In diesem Abschnitt werden dem Grundmodell aus Abschnitt 4.3.2 die entsprechenden CO₂-Äquivalente aus den Literaturquellen hinzugefügt, die bereits in der Excel-Datenbank von Herrn Al-Lami verwendet worden sind. Dies dient dem Aufbau eines so genannten „Referenzmodelles“ in Umberto, um bei der Auswertung die generischen Datensätze in dem Vorkettenmodell vergleichen zu können. Weitere LCIA-Faktoren werden in dem Referenzmodell nicht berücksichtigt, sodass in diesem Abschnitt zur Wirkungsabschätzung und im späteren Vergleich der beiden Modelle nur der midpoint Umweltindikator GWP₁₀₀ der Wirkungskategorie „climate change“ (Klimawandel) aus der Methode „ReCiPe“ berücksichtigt und angewendet wird (siehe dazu auch Abschnitt 3.3).

Die LCIA-Faktoren zu den weiteren Wirkungsindikatoren in der Methode „ReCiPe“ sind dagegen über die Einbindung der generischen Datensätze aus den Umweltdatenbanken Ecoinvent Version 3.1 und im Fall der Kohlenstofffaser über die GaBi-Datenbank in der Umweltdatenbank Nr. 7 „Plastics SP 27“ in der Modellierung der Vorketten integriert. Auf eine umfassende Darstellung wird an dieser Stelle verzichtet. Allerdings können sämtliche LCIA-Faktoren jedes verwendeten Materials bei Bedarf mit den Erläuterungen aus Abschnitt 4.3.3 über die jeweilige Umweltdatenbank nachvollzogen werden.

Für den Aufbau des Referenzmodelles in Umberto werden den im Grundmodell definierten Materialien die zugehörigen CO₂-Äquivalente hinzugefügt. Diese LCIA-Faktoren müssen für die Verwendung zunächst auf Grundlage der Excel-Datenbank berechnet und ggf. angepasst werden. Dabei befinden sich die verwendeten Werte (und deren Quellen) in den Tabellen im Anhang unter VI.III (Seite 83) bis VI.VIII (Seite 89).

Die folgenden Erläuterungen zu der Berechnung dieser LCIA-Faktoren sollen exemplarisch anhand der Tabelle 4-2 veranschaulicht werden. Diese ist ein Ausschnitt aus der Tabelle im Anhang VI.III (Seite 83) und bezieht sich auf den Teilprozess des Materialzuschnitts (TP 1 Cutting).

Tabelle 4-2: Exemplarischer Ausschnitt zur Berechnung des LCIA-Faktors für das Referenzmodell

Factors	Unit	Mass/ Unit	Source: mass	CO ₂ -Eq. [kg CO ₂ / unit]	Source: CO ₂	kg CO ₂ -Eq.- Factor Umberto
Equipment & Tools (source [Gro]= Großklos 2014)						
Cutting computer (el. E)	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Cutter (el. E)	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Fiber (source [Wit]= Witik et al. 2012)						
Bi-Diagonal	m ²	0,400 kg/m ²	Anhang VI.I; LDS, p. 7	50 kg/kg	50~46.8; vgl. [Wit], p. 99	20 / m ²
Triaxial	m ²	0,600 kg/m ²	Anhang VI.I; LDS, p. 5	50 kg/kg	50~46.8; vgl. [Wit], p. 99	30 / m ²
Supplies						
Cotton gloves	pair	0,403 kg	Database Al- Lami, ID: 9009	2,20 kg/kg	Database Al- Lami, ID: 9009	0,8866 / pair
Cutting paper	m ²	0,080 kg/m ²	Database Al- Lami, ID: 9011	2,42 kg/kg	Database Al- Lami, ID: 9011	0,1936 / m ²

Generell sind die CO₂-Äquivalente (in der Tabelle grau markiert) bezogen auf ein Kilogramm des jeweiligen Materials (oder Kilowattstunde) in verschiedenen Quellen zu finden (kg CO₂-Eq./unit). Diese Werte sind der Excel-Datenbank von Herrn Al-Lami entnommen und können über die entsprechende Bezeichnungsnummer (ID) nachvollzogen werden.

Im Fall der elektrischen Energie und auf Grund der großen Bedeutung der Kohlenstofffasern wurden diese CO₂-Äquivalente anhand eigener Quellen überprüft und aktualisiert (vgl. Großklos 2014 sowie Witik et al. 2012, S.99). Dabei orientieren sich die CO₂-Äquivalente zur Herstellung der Kohlenstofffasern gemäß einer konservativen Betrachtungsweise an dem höchsten in der Literatur aufgefundenen Wert von 46,8 kg CO₂ je Kilogramm Faser-Halbzeug (vgl. ebd.).

Um die Werte und deren Einheiten aus der Prozessaufnahme mit den CO₂-Äquivalente je Kilogramm verwenden zu können, erfolgt eine Normierung über das Gewicht des Materials bezogen auf die verwendete Einheit (Spalte: Mass/unit).

Diese Werte wurden gewogen und sind ebenfalls der Excel-Datenbank entnommen oder entstammen anderen nützlichen Quellen, wie zum Beispiel dem LDS mit den Herstellerangaben. So ergeben sich die zu verwendenden LCIA-Faktoren für die CO₂-Äquivalente (Spalte „kg CO₂-Eq.-Factor Umberto“) in Umberto aus der Multiplikation der beiden Spalten „Mass/unit“ und „kg CO₂-Eq./unit“.

Bei einigen Materialien wurde für die Verwendung im Wirkungsindikator GWP₁₀₀ der Methode ReCiPe eine zusätzliche Umrechnung von Einheiten in Umberto notwendig, um die Prozessdaten konsistent in dem Referenzmodell nutzen zu können. Beispielsweise werden CO₂-Äquivalente von genutzter Energie auf der Basis von der Einheit Megajoule berechnet, sodass die CO₂-Äquivalente von Kilowattstunden noch durch den Umrechnungsfaktor von 3,6 dividiert wurden.

Den Abfällen an verschnittenen Fasern (und auch später an überschüssigem Harz) wird kein CO₂-Äquivalent beigemessen, da diese schon im Eingangswert berücksichtigt sind und keine Betrachtung der Verwertungsmaßnahmen erfolgt, wodurch weitere Umweltbelastungen aber auch eventuelle Gutschriften durch Recycling denkbar wären.

Die LCIA-Faktoren in der letzten Spalte der Tabelle 4-2 und somit allgemein jeweils in den letzten Spalten der Tabellen in den Anhängen von VI.III (Seite 83) bis VI.VIII (Seite 89) werden für alle Teilprozesse der Materialien im Grundmodell hinzugefügt. Da diese LCIA-Faktoren „im Hintergrund“ bei der Wirkungsabschätzung für eine Auswertung mit den Sachbilanzposten verknüpft werden, ist der Modellaufbau des Grundmodells dem des Referenzmodells sowie den benutzerdefinierten Funktionen identisch. Auf deren Darstellung wird an dieser Stelle nochmal auf die Abschnitte VI.X (Seite 91) bis VI.XV (Seite 96f.) verwiesen.

Das Referenzmodell und das Modell mit den Vorketten aus generischen Datensätzen der Umweltdatenbanken bilden die Grundlage für die Auswertung im folgenden Kapitel 5. Um mögliche Unterschiede der beiden verschiedenen Modelle abschätzen und nachvollziehen zu können, sind in den Tabellen der Teilprozesse im Anhang VI.XVII (Seite 103) bis VI.XXII (Seite 109) in den grau markierten Spalten die jeweiligen CO₂-Äquivalente des Referenz- und des Vorkettenmodells vergleichend dargestellt. Dabei liegen viele Äquivalente für das jeweilige Material auf einem ähnlichen Niveau. Da sich die Äquivalente bei den Kohlenstofffasern jedoch stark unterscheiden (50 kg gegenüber 20,12 kg) und diese nicht nur einen starken Einfluss besitzen, sondern auch in einer vergleichsweise hohen Quantität verwendet werden, sind im weiteren Verlauf Unterschiede bei der Auswertung in den verschiedenen Modellen zu erwarten.

5 Ergebnisse aus der ökologischen Bewertung der CFK-Flügelrippen

In diesem Kapitel erfolgt eine Bewertung der ökologischen Auswirkungen mit der Methode „ReCiPe“ (Abschnitt 3.3). Verschiedene Aspekte werden aus unterschiedlichen Blickwinkeln betrachtet, die daraus resultierenden Ergebnisse dargestellt und diskutiert. Umfassendere Erläuterungen zu den Referenzsubstanzen sowie zu den Berechnungen der verschiedenen Umweltindikatoren aus der Methode „ReCiPe“ sind der Literatur von GOEDKOOPT ET. AL. 2013 zu entnehmen. Die Auswertungen erfolgen an den in Kapitel 4 beschriebenen Modellen und Modellvarianten in Umberto.

Abschnitt 5.1 vergleicht die CO₂-Äquivalente zwischen den zwei verschiedenen Modellen (Referenzmodell gegenüber Vorkettenmodell mit generischen Datensätzen) nach dem Wirkungsindikator GWP₁₀₀. Abschnitt 5.2 thematisiert anhand zusätzlicher Indikatoren weitere potentielle Umweltwirkungen aus den einzelnen Phasen zur Herstellung der Flügelrippen. Zusätzlich wird die Software Umberto aus Sicht eines Konstrukteurs angewendet, um potentielle Umweltwirkungen von CFK vergleichend zu einer fiktiven Struktur aus Aluminium zu untersuchen. Weiterhin werden in Abschnitt 5.3 die Ergebnisse zum Aufzeigen von Einsparpotentialen genutzt und ein Szenario zur Steigerung der Öko-Effizienz erstellt. Abschließend werden anhand von „Extremszenarien“ (Abschnitt 5.4) die Ergebnisse der CO₂-Äquivalente in Relation zu Literaturquellen gesetzt.

5.1 Vergleich der CO₂-Äquivalente zwischen beiden Modellen

In diesem Abschnitt wird das „Referenzmodell“ (RM) mit dem „Vorkettenmodell“ (VM) verglichen. Im RM werden für die C-Faserherstellung CO₂-Äquivalenten aus verschiedenen Literaturquellen und im VM generische Datensätze aus den Umweltdatenbanken Ecoinvent und GaBi für die Herstellung verwendet. Für die Auswertung wird der Umweltindikator GWP₁₀₀ aus der Wirkungskategorie „climate change“ nach der Bewertungsmethode ReCiPe angewendet.

In Abbildung 5-1 sind die Ergebnisse der CO₂-Äquivalente sowohl für jeden Teilprozess (TP 1 bis TP 6) als auch für die gesamte Herstellung der CFK-Flügelrippen (funktionelle Einheit 10 kg CFK-Bauteil) vergleichend in einem Balkendiagramm dargestellt. Zusätzlich sind dem Diagramm die zugehörigen Zahlenwerte zu entnehmen.

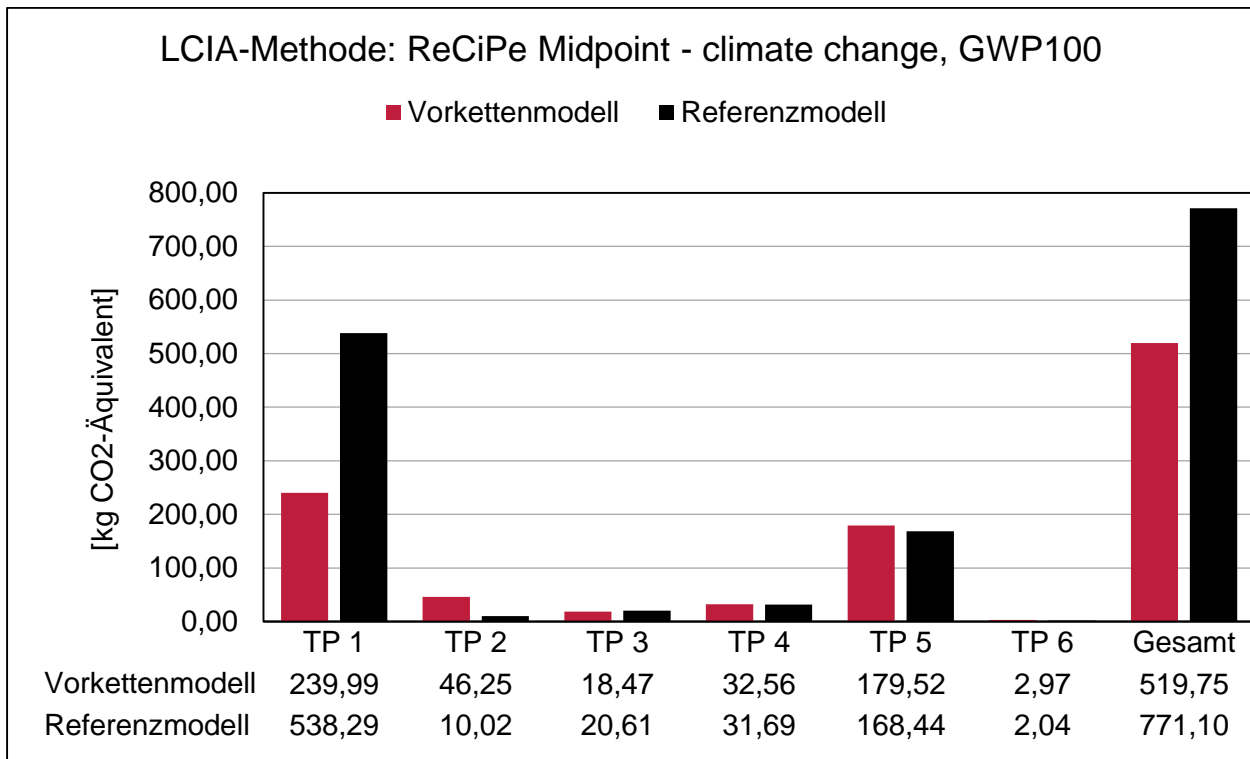


Abbildung 5-1: Vergleich der CO₂-Äquivalente zwischen dem Vorketten- und dem Referenzmodell (fE 10kg)

Insgesamt liegt das Gesamtergebnis aus dem Referenzmodell (771,10 kg) deutlich über dem des Vorkettenmodells (519,75 kg). Weiterhin ist der Abbildung zu entnehmen, dass bei beiden Modellen die größten CO₂-Äquivalente in dem ersten Teilprozess des Materialzuschnitts (TP 1) anfallen und sich die Werte schon innerhalb dieses Prozesses (239,99 kg gegenüber 538,29 kg CO₂-Äquivalente) prozentual und absolut gesehen stark unterscheiden.

Die im Vergleich zu den anderen Teilprozessen resultierenden, hohen Werte an klimaschädlichen Emissionen sind darauf zurückzuführen, dass im Prozess des Materialzuschnitts die energieintensive Herstellung der Kohlenstofffasern berücksichtigt wird.

In dem zweiten Teilprozess (TP 2) ist dagegen der prozentual und absolut gesehene Wert aus dem Vorkettenmodell deutlich höher als der des Referenzmodells (46,25 kg zu 10,02 kg). Prozentual ist dieses auch der Fall bei einem paarweisen Vergleich der Werte (VM 2,97 kg gegenüber RM 2,04 kg) des letzten Teilprozesses (TP 6). In den übrigen Teilprozessen (TP 3, 4, & 5) betragen die prozentualen Abweichungen aus den Wertepaaren beider Modelle weniger als 10,5%. Die absoluten Werte der Teilprozesse 3 bis 6 liegen auf einem nahezu ähnlichen Niveau.

Die Differenzen sind auf die unterschiedlichen CO₂-Äquivalente pro Kilogramm der jeweiligen Materialien, die in den Prozessschritten als Input verwendet werden, zurückzuführen.

Hierzu wird auf die Daten in den entsprechenden Tabellen im Anhang unter VI.XVII (Seite 103) bis VI.XXII (Seite 109) verwiesen. An dieser Stelle sind auf Grund des großen Einflusses und der Verschiedenheit auszugswise die Kohlenstofffasern (VM 20,12 kg & RM 50), die Baumwoll-Handschuhe (VM 24,82 kg & RM 2,2 kg) sowie die Gummi-Handschuhe (VM 1,63 kg & RM 11,32 kg) zu nennen.

Wegen des großen Einflusses auf das Gesamtergebnis wurde der generische Datensatz der Kohlenstofffasern aus der Umweltdatenbank GaBi überprüft. Nähere Angaben zu diesem Datensatz sind auszugswise im Anhang unter VI.XXXI auf Seite 123 zu finden. Daraus ist zu entnehmen, dass es sich bei diesem Datensatz „nur“ um **einen Datensatz zur Herstellung von Kurzfasern** handelt. So ist bereits an dieser Stelle festzuhalten, dass das eigentliche Ziel der Betrachtungen und Abbildung der Herstellung von **endlofaserverstärkten CFK-Strukturen nicht** erreicht wurde. Diese Erkenntnis wird später im Fazit diskutiert.

Für eine entsprechende Modellierung der Fertigung von endlofaserverstärkten CFK-Bauteilen müssten die CO₂-Äquivalente bezogen auf ein Kilogramm an Kohlenstofffasern deutlich über diesem Wert von 20,12 kg aus dem Vorkettenmodell liegen. Deutlich höhere Werte aus der Literatur nach WITIK ET AL. 2012 lassen darauf schließen, dass die Herstellung von Endlofasern mit höheren CO₂-Äquivalenten pro Kilogramm als bei Kurzfasern verbunden ist. Daher wird im Folgenden auch das Vorkettenmodell ohne den C-Faser-Datensatz aus der Umweltdatenbank GaBi, sondern mit dem C-Faser-Wert von 50 kg verwendet.

Zur weiteren Validierung des Referenzmodell bzw. der zugrundeliegenden Excel-Datenbank werden beide Modelle (VM und RM) jeweils mit den gleichen CO₂-Äquivalenten bezogen auf ein Kilogramm an Kohlenstofffasern miteinander verglichen (20,12 kg & 50 kg). So werden insgesamt vier verschiedene Modellvarianten betrachtet. Die daraus resultierenden Ergebnisse weichen nur in dem ersten Teilprozess und somit auch im Gesamtergebnis von den bisherigen Ergebnissen der Ausgangsmodelle (VM und RM in Abbildung 5-1) ab.

Die aus diesen vier verschiedenen Szenarien resultierenden Gesamtergebnisse für die Herstellung der zwei CFK-Flügelrippen sind dem Balkendiagramm Abbildung 5-2 zu entnehmen.

Der Unterschied zwischen den verschiedenen C-Faser-Werten (20,12 kg gegenüber 50 kg) hat einen hohen Einfluss auf das Gesamtergebnis, sodass erwartungsgemäß aus den Szenarien mit den höheren C-Faser Werten ein deutlich höheres Gesamtergebnis an CO₂-Äquivalenten resultiert. Des Weiteren liegen bei beiden C-Faser-Werten die Gesamtergebnisse aus dem Vorkettenmodell jeweils über den Werten aus dem Referenzmodell. Dieser **Unterschied** zwischen dem **VM** und dem **RM** beträgt unabhängig von den jeweiligen C-Faser-Werten den **absoluten Wert von ca. 62,5 kg CO₂-Äquivalenten** (genau 62,37 und 62,39).

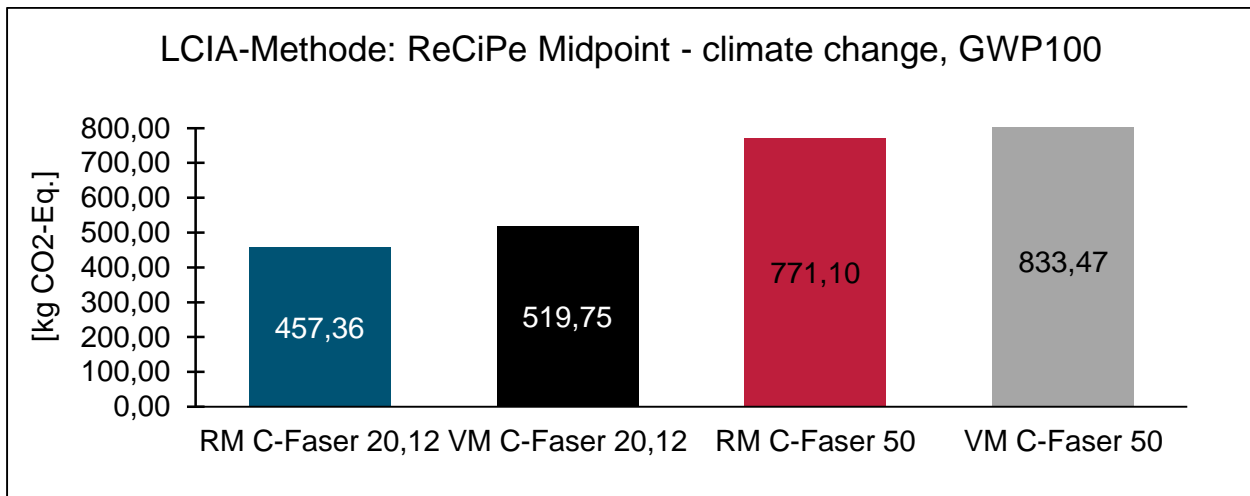


Abbildung 5-2: Vergleich des Vorketten- und des Referenzmodells mit C-Faser-Werten von 20,12 & 50 kg (fE 10kg)

Die Unterschiede beider Teilprozesse 2-6 entsprechen den bereits zuvor dargestellten Differenzen zwischen dem VM und RM in Abbildung 5-1. Im ersten Teilprozess (TP 1) beträgt die Differenz beider Modelle bei der Verwendung identischer C-Faser-Werte 15,45 kg CO₂-Äquivalente.

Die einzelnen Unterschiede sind mit den Daten aus den Tabellen im Anhang unter VI.XVII (Seite 103) bis VI.XXII (Seite 109) zu erklären. Haupteinflussfaktoren sind wegen dem starken Unterschied, zum Einen die Baumwoll-Handschuhe (VM 24,82 kg & RM 2,2 kg) zum Anderen die Gummi-Handschuhe (VM 1,63 kg & RM 11,32 kg) sowie auf Grund der hohen Nutzung an elektrischer Energie (Beispielsweise durch die Nutzung des Autoklaven in Teilprozess 5 „Tempering“) auch die Differenz der CO₂-Äquivalente bezogen auf eine Kilowattstunde (VM 0,66 kg & RM 0,617 kg).

Die Differenz zwischen dem VM und RM bei gleichen C-Faser-Werten von 62,5 kg ist ein nennenswerter und nicht zu vernachlässigender Unterschied. Dennoch liegen in Anbetracht der Vielzahl an verwendeten Materialien und den somit verbundenen Annahmen zur Substituierung die Ergebnisse von beiden Modellen auf einem ähnlichen Niveau und nicht um Faktoren auseinander. Daraus ist zu schließen, dass bei gleichen C-Faser-Werten das Referenzmodell mit den CO₂-Äquivalenten aus verschiedenen Literaturquellen ähnliche Ergebnisse, wie das Modell mit den generischen Datensätzen aus den Umweltdatenbanken liefert.

Abschließend ist nochmal der große Unterschied zwischen beiden Modellen (VM und RM) mit den verschiedenen C-Faser-Werten zu erwähnen und die Tatsache, dass es sich bei dem GaBi-Datensatz um generische Daten zur Herstellung von Kohlenstofffaser-Kurzfasern handelt.

5.2 Potentielle Umweltwirkungen von CFK aus der Umberto-Modellierung

Ein wesentliches Ziel dieser Arbeit besteht darin, Erkenntnisse zu weiteren Umweltaspekten aus der Herstellung von CFK-Bauteilen anhand der Flügelrippen zu gewinnen. Zur Ermittlung der potenziellen Umweltwirkungen werden neben dem Umweltindikator GWP₁₀₀ mit den CO₂-Äquivalenten aus der Wirkungskategorie „climate change“ die weiteren midpoint-Umweltindikatoren und Wirkungskategorien aus der Bewertungsmethode „ReCiPe“ (Abschnitt 3.3) angewendet.

Weiterhin wird das Modell mit den generischen Datensätzen aus den Umweltdatenbanken Ecoinvent und GaBi für die Herstellung der Kohlenstofffasern verwendet (VM). Auch wenn es sich bei dem GaBi-Datensatz um Kurzfasern handelt, ist dieser Datensatz die einzig verfügbare Datengrundlage zu den weiteren Umweltindikatoren mit LCIA-Faktoren. Folglich ist zu erwähnen, dass sich die folgenden Werte und Aussagen nicht eins zu eins auf die Herstellung eines endlosfaserverstärktem CFK-Bauteils übertragen bzw. anwenden lassen.

Im Rahmen dieser Arbeit erfolgt keine „reine“ Auflistung sämtlicher Ergebnisse aus den verschiedenen Umweltindikatoren. Die Ergebnisse der 18 Wirkungsindikatoren sind im Anhang unter VI.XXXIV (Seite 126) zu finden. Im Folgenden werden exemplarisch einige Umweltindikatoren behandelt. Zum Einen wird das „Verschieben“ von Umweltwirkungen zwischen den Teilprozessen in Abschnitt 5.2.1 thematisiert, da sich je nach Umweltindikator der Anteil der resultierenden Belastungen aus einem Teilprozess unterscheidet. Des Weiteren erfolgt anhand einiger Umweltindikatoren in Abschnitt 5.2.2 ein Vergleich zu der Herstellung eines Bauteils aus Aluminium, das ebenfalls für diesen Vergleich in Umberto modelliert wurde.

5.2.1 „Verschiebung“ der Auswirkungen zwischen den Teilprozessen

Mit diesem Abschnitt werden exemplarisch die Auswirkungen der einzelnen Teilprozesse und die Zusammenhänge verschiedener Umweltindikatoren verdeutlicht.

Da Energieumwandlungsprozesse zu maßgeblichen Verursachern für umweltschädliche Auswirkungen gehören, korrelieren einige Umweltindikatoren miteinander (vgl. 3.3.). Dementsprechend weisen einige Ergebnisse zu den potentiellen Umweltwirkungen eine ähnliche prozentuale Verteilung auf die einzelnen Teilprozesse auf. Exemplarisch werden hierfür noch einmal die CO₂-Äquivalente nach dem Umweltindikator GWP₁₀₀ aus der Wirkungskategorie „climate change“ betrachtet. In Abbildung 5-3 sind diese aus der Herstellung der zwei CFK-Flügelrippen (Gesamtergebnis 519,75 kg) prozentual auf die einzelnen Teilprozesse verteilt dargestellt.

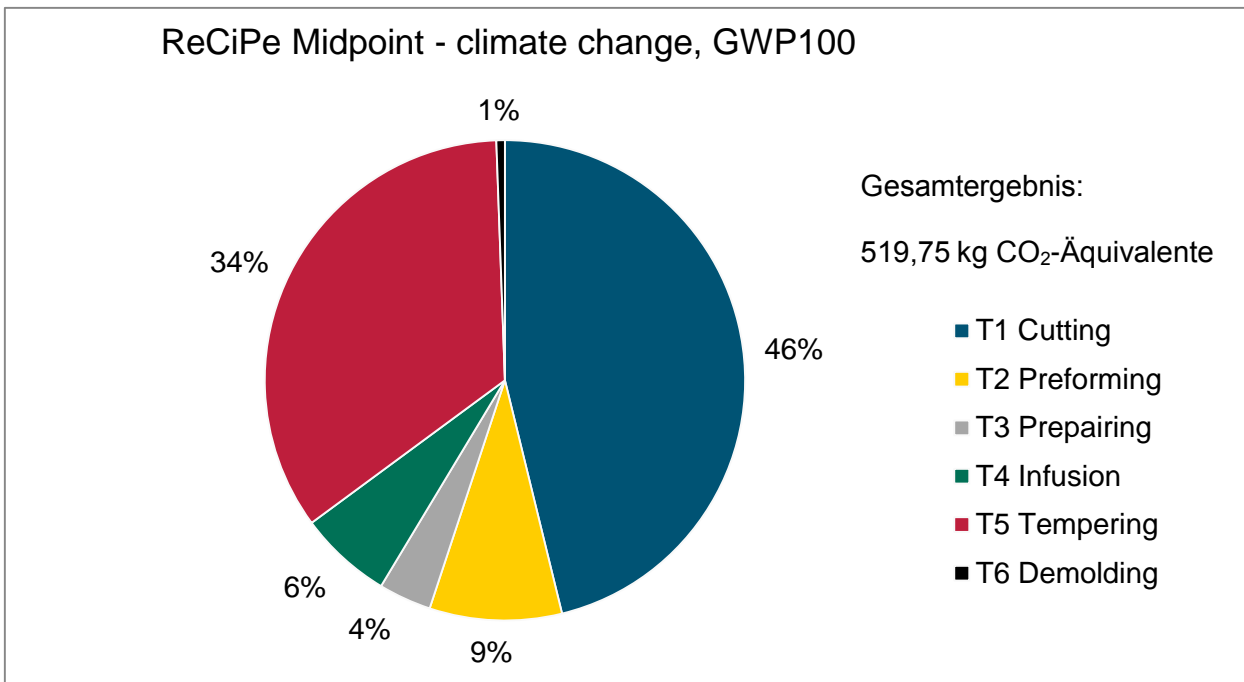


Abbildung 5-3: Prozentuale Verteilung der CO₂-Äquivalente auf die Teilprozesse nach dem GWP₁₀₀

Jeweils große Anteile entfallen auf die Teilprozesse des Materialzuschnitts und des Aushärtens und führen zusammengerechnet zu 80% der gesamten CO₂-Äquivalente. Dies ist auf die energieintensive Herstellung der Kohlenstofffasern zurückzuführen, die in Teilprozess 1 berücksichtigt ist, und auf die Nutzung des Autoklaven zur Aushärtung (TP 5).

Andere Umweltindikatoren, die zu einer ähnlichen prozentualen Verteilung wie dem GWP₁₀₀ auf die einzelnen Teilprozesse führen, sind beispielsweise der Umweltindikator „ionising radiation potential“ der Wirkungskategorie „ionising radiation“ oder der Indikator „fossil depletion potential“ aus der Kategorie „fossil resource depletion“. Diese Korrelation der verschiedenen Indikatoren kann in Bezug auf den Teilprozess 5 (Tempering) nur auf den Verbrauch von elektrischer Energie zurückgeführt werden, da keine weiteren Eingangsgrößen bei dem Aushärten verwendet werden. Daher wird vermutet, dass die potentiellen Umweltwirkungen von diesen beiden genannten Indikatoren mit der verbrauchten Energie und der zu Grunde liegenden Stromerzeugung nach dem Strom-Mix in Deutschland zusammenhängen.

Im Gegensatz zu der prozentualen Verteilung nach dem GWP₁₀₀ (Abbildung oben) weisen einige Umweltindikatoren deutlich andere prozentuale Verteilungen auf, als die einzelnen Teilprozesse. In einem weiteren Beispiel sind die 1,4-DCB-Äquivalente nach dem Umweltindikator HTP („human toxicity potential“) aus der Wirkungskategorie „human toxicity“ prozentual auf die einzelnen Teilprozesse verteilt dargestellt (Abbildung 5-4; Gesamtergebnis aus der Herstellung der zwei Flügelrippen 34,92 kg).

Bei diesem Umweltindikator und den zugehörigen potentiellen Umweltwirkungen spielt der Teilprozess 5 des Aushärtens eine geringere Rolle als im Vergleich zu der Verteilung nach CO₂-Äquivalenten.

Bei Auswirkungen auf die Humangesundheit steigt prozentual gesehen die Bedeutung des dritten Teilprozesses (Preparing) stark an.

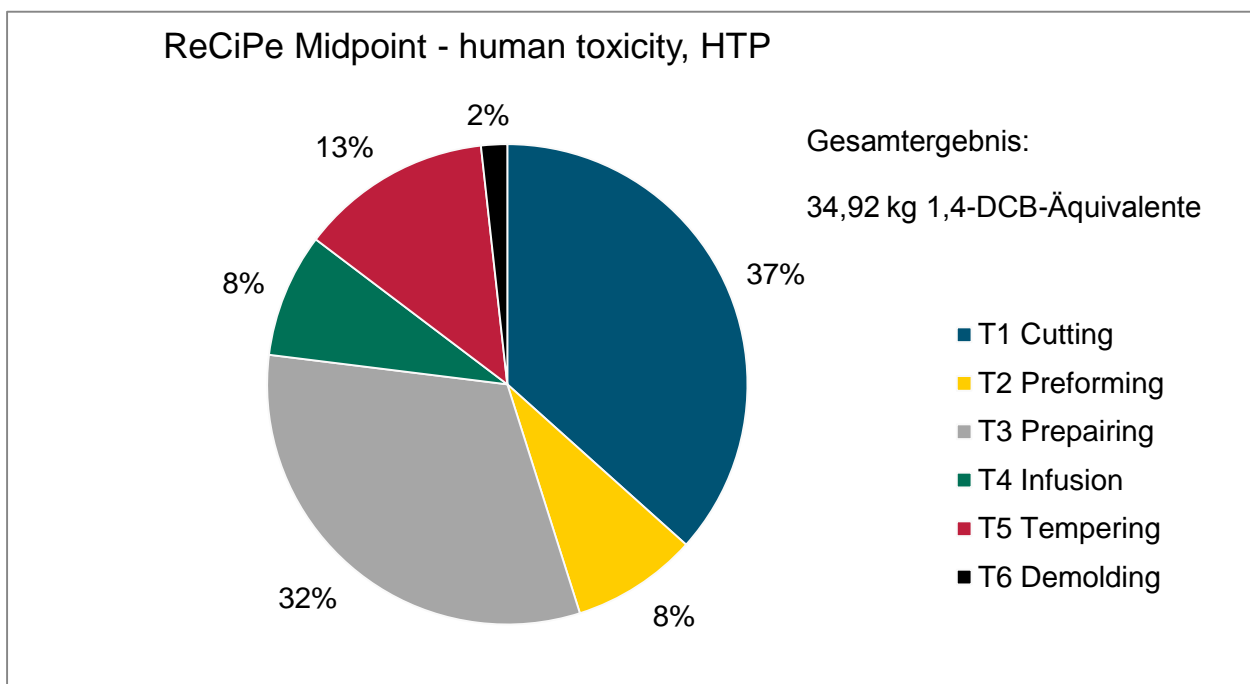


Abbildung 5-4: Prozentuale Verteilung der 1,4-DCB-Äquivalente auf die Teilprozesse nach dem HTP

Des Weiteren sind exemplarisch die prozentualen Verteilungen der potentiellen Umweltwirkungen auf die Toxizität der Meeresgewässer und den Wasserverbrauch anhand entsprechender Umweltindikatoren auf die Teilprozesse im Anhang unter VI.XXXII (Seite 124) dargestellt. Daraus ist zu entnehmen, dass Teilprozess 3 mit 44% sogar den größten Anteil der Emissionen mit Auswirkungen auf die Toxizität der Meeresgewässer ausmacht.

Die Auswirkungen des Preparing-Prozesses auf die Humangesundheit und die Toxizität der Meeresgewässer sind auf die dort eingesetzten Materialien für den Vakuumaufbau zurückzuführen. Beispiele dafür sind Chemikalien zum Eintrennen des Formwerkzeuges und diverse weitere kunststoffbasierende Materialien für den Vakuumaufbau.

Eine ganz andere prozentuale Verteilung der Umweltwirkungen auf die Teilprozesse bietet die Auswertung des Indikators für den Wasserverbrauch (ebenfalls Anhang VI.XXXII, Seite 124). Demnach werden insgesamt 307 Kubikmeter Wasser für die Herstellung der beiden CFK-Flügelrippen benötigt, wovon 99% bereits bei der Herstellung der Kohlenstofffasern (in TP 1) verbraucht werden.

Insgesamt bedeuten diese „Verschiebungen“ der prozentualen Verteilung zwischen den Teilprozessen je nach Wirkungsindikator, dass eine ökologische Bewertung der Fertigung auf der Grundlage eines einzigen Wirkungsindikators (Bsp. GWP_{100}) als kritisch anzusehen ist.

5.2.2 Vergleich potentieller Umweltwirkungen zu Aluminium

Um die Ergebnisse bzw. die absoluten Werte für die potentiellen Umweltwirkungen aus der Herstellung der CFK-Flügelrippen einordnen zu können, werden diese mit einer Modellierung des Werkstoffes Aluminium verglichen. Auf Grund der besseren mechanischen Eigenschaften eines Faserverbundbauteils bei fasergerechter Beanspruchung wird ein Vergleich bezogen auf jeweils ein Kilogramm Primärwerkstoff als nicht zielführend im Leichtbau angesehen. Für ein funktionsgleiches Bauteil wird daher aus Sicht eines Konstrukteurs weniger Material benötigt (vgl. Ehrenberger et al. 2013, S. 733).

Im Rahmen dieser Arbeit wird eine Gewichtsreduktion um 25% durch den Einsatz von CFK gegenüber der Aluminiumbauweise angenommen (vgl. ebd. sowie Leohold 2011, S. 36), sodass den Flügelrippen aus CFK (Masse 10 kg) ein „fiktives Referenzbauteil“ aus Aluminium mit einer Masse von 13,33 kg gegenübergestellt wird. Die Herstellung eines solchen Bauteils wurde ebenfalls in Umberto modelliert, wobei generische Datensätze bezogen auf die funktionelle Einheit von 13,33 kg genutzt wurden. In Anhang unter VI.XXXIII (Seite 125) befinden sich nähere Informationen zu dem verwendeten Datensatz und dessen Modelleigenschaften. Dabei besteht die Fertigung eines solchen Referenzbauteils aus der Herstellung des Rohmaterials und einem Bearbeitungsschritt von Aluminium, der in der Umweltdatenbank Ecoinvent mit der Bezeichnung „metal working, average for aluminium product manufacturing“ bezeichnet ist. Die Quantitäten aus beiden Schritten (insbesondere mehr Input an Rohmaterial) wurden so kombiniert, dass das CO_2 -Äquivalent pro erzeugtem Kilogramm Primärwerkstoff an den Wert für Aluminium aus der Literatur nach EHRENBERGER ET AL. 2013, S.733 angelehnt ist.

Allgemein sind die Ergebnisse mit Vorsicht zu bewerten, da aus einer Vielzahl generischen Datensätzen zur Herstellung eines Aluminiumbauteils ausgewählt wurde, die sich von anderen Datensätzen unterscheiden können. Zusätzlich wurde das Aluminium-Modell für diesen Vergleich nicht weiter validiert bzw. überprüft, sodass die Werte für Aluminium von der Realität abweichen und höher liegen können. Die Werte für die einzelnen Materialien im CFK-Modell resultieren dagegen aus einer konservativen Betrachtungsweise und liegen somit vom Ansatz her über denen der Realität. CFK wird folglich in der Tendenz „schlechter“ als in der Realität bei der Bewertung beider Modelle abschneiden.

Alle Ergebnisse zu den 18 Wirkungsindikatoren der Methode „ReCiPe“ und der jeweils prozentualen Abweichungen der Umweltwirkungen von Aluminium im Vergleich zu CFK befinden sich im Anhang unter VI.XXXIV (Seite 126). Bei vielen Wirkungsindikatoren unterscheiden sich die absoluten Werte erst im Bereich der Nachkommastellen. Deutliche Unterschiede ergeben sich dabei bei den prozentualen Anteilen.

CFK schneidet bei den vier Wirkungskategorien (und den zugehörigen Wirkungsindikatoren) „particulate matter formation“ (PMFP), „urban land occupation“ (ULOP), „natural land transformation“ (NLTP) und „mineral resource depletion“ (MDP) besser ab. Dabei ist die prozentuale Abweichung mit über 50 Prozent bei dem Abbau bzw. dem Verbrauch mineralischer Ressourcen (MDP) mit 42,76 kg Eisen-Äquivalente von Aluminium gegenüber 19,74 von CFK am größten.

In den übrigen Wirkungskategorien sind die potentiellen Umweltwirkungen aus der Modellierung von Aluminium besser als die von CFK. Die Unterschiede variieren dabei sehr stark. Mit weniger als 5%-Abweichung liegen demgegenüber die Werte des Wirkungsindikators TAP₁₀₀ (Al 1,3 kg Schwefeldioxid-Äquivalente, CFK 1,343 kg) aus der Wirkungskategorie „terrestrial acidification“ nah beieinander. Demgegenüber steht beispielsweise ein großer Unterschied der resultierenden Ergebnisse bei dem Wirkungsindikator WDP aus der Wirkungskategorie „water depletion“. Der Wasserverbrauch aus dem Aluminium-Modell beträgt ca. 1 Kubikmeter und aus dem CFK-Modell knapp über 300 Kubikmeter.

Exemplarisch wird in Abbildung 5-5 anhand des Indikators GWP₁₀₀ das Treibhauspotential aus den Modellen zur Herstellung der Flügelrippen aus CFK und ein „fiktives“, funktionsgleiches Referenzbauteil aus Aluminium dargestellt.

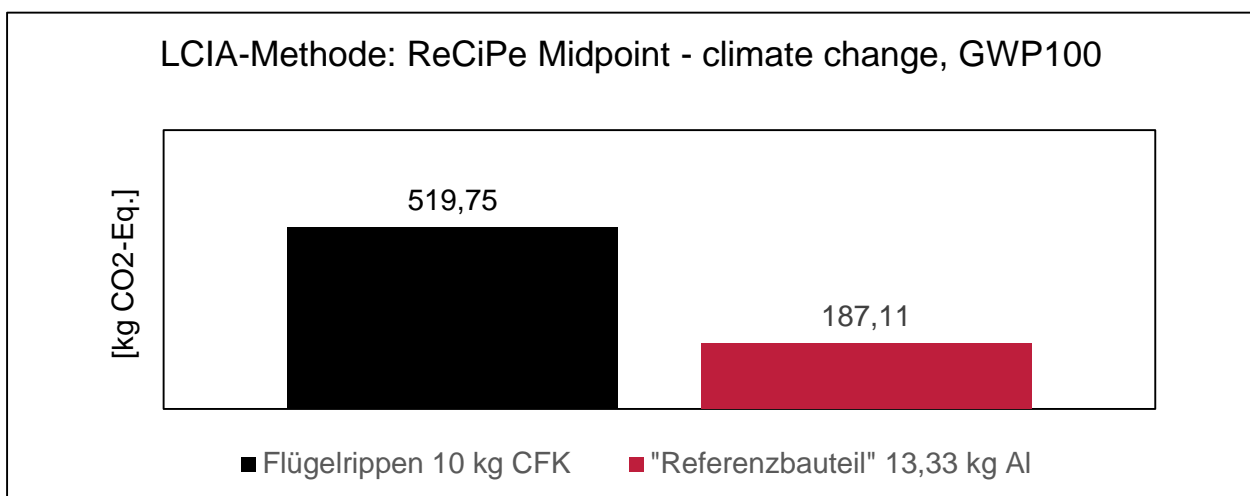


Abbildung 5-5: Vergleich der CO₂-Äquivalente aus der Herstellung eines Bauteils aus CFK und Aluminium

Gegenüber den 519,75 kg CO₂-Äquivalenten aus der Modellierung und Bewertung der CFK-Flügelrippen, beträgt das Ergebnis für Aluminium mit 187,11 kg deutlich weniger. Allerdings zählt die Aluminiumindustrie auch zu einer sehr energieintensiven Branche (vgl. Heinemann et al. 2013, S. 278), sodass das deutlich „bessere“ Abschneiden von Aluminium gegenüber CFK in vielen Wirkungskategorien im Rahmen dieser Arbeit als kritisch zu sehen und zu hinterfragen ist. In einem Beispiel aus der Literatur schneidet beispielsweise in der Kategorie des Klimawandels CFK bei den Treibhausgasen bei der Herstellung einer Referenzkomponente sogar besser ab als Aluminium (vgl. Ehrenberger et al. 2013, S. 733). Folglich sind die Ergebnisse in der Zukunft zu überprüfen.

Insgesamt kann basierend auf diesen Daten keine Aussage zu den ökologischen Vorteilen von CFK oder Aluminium getroffen werden. Allerdings wurden die potentiellen Umweltwirkungen von CFK vergleichend zu Aluminium ausgewertet und bilden eine Grundlage für weitere Analysen. Beispielsweise können Vergleiche zu weiteren Materialien gezogen werden und Einschätzungen anhand von Grenzwerten aus Umweltschutzgesetzen erfolgen. Weiterhin sind Gewichtungen einzelner Umweltindikatoren und Aggregationen zu Spitzenkennzahlen für weitere Auswertungen und Aussagen über die ökologischen Vorteile verschiedener Leichtbaumaterialien denkbar.

5.3 Szenario zur Steigerung der Öko-Effizienz

In diesem Abschnitt werden das Modell und die Ergebnisse aus dem Herstellungsprozess von CFK-Flügelrippen aus Sicht eines Prozessoptimierers betrachtet. Zur Steigerung der Öko-Effizienz werden an einem konkreten Beispiel die Auswirkungen bei entsprechender Veränderung als Szenario in dem Vorkettenmodell in Umberto simuliert.

Die Öko-Effizienz des Fertigungsprozesses kann anhand der verschiedenen Wirkungsindikatoren und nach den jeweiligen Teilprozessen in Umberto analysiert werden. Diese Arbeit orientiert sich am Wirkungsindikator GWP₁₀₀ zur Verbesserung des ökologischen Fußabdruckes der CFK-Flügelrippen.

Wie bereits in Abschnitt 5.2.1 erwähnt, fällt mit 46% der größte Anteil an CO₂-Äquivalenten im ersten Teilprozess des Materialzuschnitts an. Innerhalb dieses Prozesses liegt der Fokus auf dem Haupteinflussfaktor, dem Einsatz von textilen Halbzeugen. Die Herstellung der Kohlenstofffasern selbst wird als fest bzw. kurzfristig nicht veränderbar angenommen. Optimierungspotentiale werden daher bei einer höheren Materialausnutzung der Halbzeuge gesehen. Bei der Anlieferung des Materials mit einer Rollenbreite von 1270 Millimetern beträgt der bisherige Materialausnutzungsgrad ca. 65% und wurde bisher in dieser Größenordnung in den Modellen berücksichtigt.

Auf Grund der Geometrie der Zuschnitte ließe sich dieser Ausnutzungsgrad mit der Anlieferung einer breiteren Rolle für das Fasermaterial deutlich erhöhen. Im Anhang unter VI.XXXV (Seite 127) sind die Zuschnitte mit dem Cutter-Programm für eine Rollenbreite von 1500 Millimeter simuliert. Es kann gezeigt werden, dass dies Materialausnutzung von ca. 85% ermöglicht.

An dieser optimierten Materialausnutzung orientieren sich die weiteren Szenarien, die mit der Software Umberto durch leichte Veränderungen in dem Vorkettenmodell umgesetzt wurden. Dabei werden als zusätzliche Szenarien die Auswirkungen dieser Prozessoptimierung jeweils auf das Vorkettenmodell mit den CO₂-Äquivalenten für die C-Faser-Werte von 20,12 kg und 50 kg aus Abschnitt 5.1 betrachtet.

Das genutzte Fasermaterial (Output des ersten Teilprozesses) zur Herstellung der Flügelrippen beträgt weiterhin insgesamt 7 kg. Der Verschnitt wird allerdings von vorher 3,5 kg Fasermaterial auf 1,25 kg (entspricht dem Materialausnutzungsgrad von ca. 85%) reduziert, sodass anstatt 10,5 kg nur noch 8,25 kg an textilem Halbzeug als Input benötigt werden.

Da sich diese Veränderungen nur auf den ersten Teilprozess beziehen, können diese Veränderungen auch über die geringere Inputmenge und mit den entsprechenden CO₂-Äquivalenten pro Kilogramm Werkstoff (20,12 kg und 50 kg) berechnet werden. In Abbildung 5-6 sind die Auswirkungen der Verschnitt-Optimierung (VO) auf die potentiellen Umweltwirkungen nach dem Indikator GWP₁₀₀ dargestellt. Berücksichtigt sind jeweils die Ausgangssituationen ohne Maßnahmen zur Prozessoptimierung und im weiteren Verlauf mit höherer Materialausnutzung (mit Verschnitt-Optimierung) jeweils bezogen auf die zwei verschiedenen C-Faser-Werte.

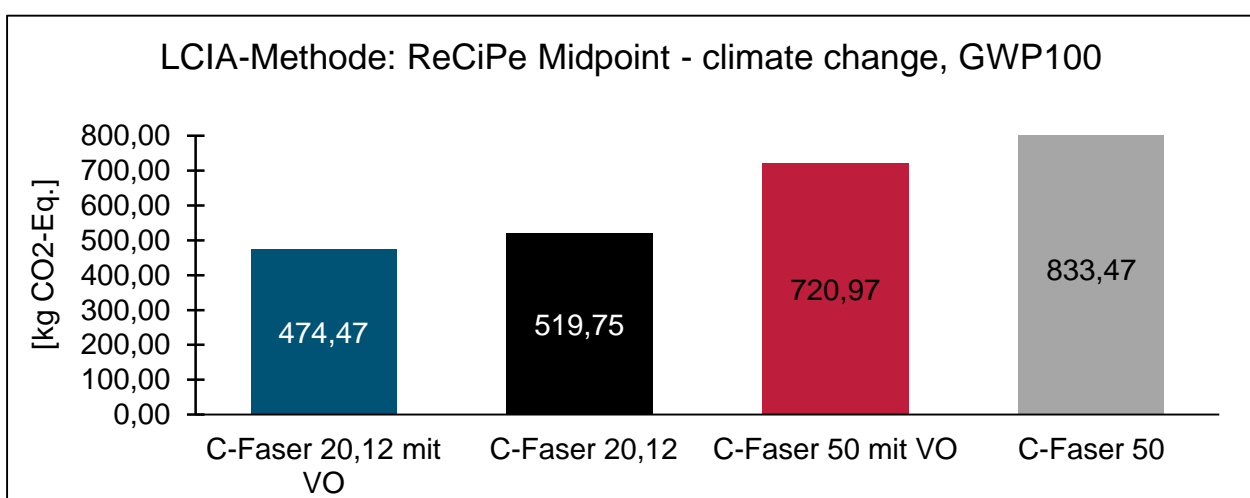


Abbildung 5-6: Verschnitt-Optimierungen (VO) bei dem Vorkettenmodell mit C-Faser-Werten von 20,12 & 50 kg (fE 10kg)

Mit der Verschnitt-Optimierung können in den Vorkettenmodellen mit niedrigeren C-Faser-Werten die gesamten CO₂-Äquivalente von ursprünglich 519,75 kg um 45,27 kg auf 474,47 kg gesenkt werden. Dies entspricht einer Steigerung der Öko-Effizienz um 8,7% nach dem Indikator GWP₁₀₀.

In Vorkettenmodellen mit entsprechend höheren C-Faser-Werten kann beispielsweise der Ausstoß von klimawirksamen Emissionen von 833,47 kg auf 720,97 kg CO₂-Äquivalente gesenkt werden. Dies entspricht einer Senkung um 112,5 kg bzw. 13,5%.

Bei den höheren C-Faser-Werten wirkt sich erwartungsgemäß eine optimierte Materialausnutzung insgesamt größer auf die Senkung der gesamten CO₂-Äquivalente aus.

Weitere Prozessverbesserungen anhand des Umweltindikators GWP₁₀₀ können Einsparungen bei dem Verbrauch an elektrischer Energie sein. Neben dem Verbrauch elektrischer Energie wäre hier auch mittelfristig eine Veränderung des Strom-Mix zur Erzeugung der Energie aus erneuerbaren Energiequellen zu betrachten. Ferner würde auch eine höhere Auslastung des Autoklaven zu einer geringeren Menge an CO₂-Äquivalente bezogen auf ein Bauteil führen. Auch eine Nutzung der aus dem Autoklav-Prozess resultierenden Abwärme bewirkt eine Steigerung der Öko-Effizienz.

Die anderen Wirkungsindikatoren können ebenso zur Prozessoptimierung bzw. Steigerung der Öko-Effizienz herangezogen werden. Beispielsweise können Verbesserungspotentiale für den Arbeits- und Gesundheitsschutz der Arbeitnehmer sinnvoll mit dem Wirkungsindikator der Humantoxizität (HTP „human toxicity potential“) identifiziert werden. Mit Risiko behaftete Teilprozesse und Stoffe können dann nach den Grundsätzen des betrieblichen Umweltschutzes behandelt und umgestaltet werden. Auf diese Weise können Beispiele zur Steigerung der Öko-Effizienz fortgeführt werden, sodass in diesem Abschnitt die Möglichkeiten ökologischer Auswertungen mit Computerunterstützung nur auszugsweise betrachtet wurden.

5.4 Einordnung der CO₂-Äquivalente mit „Extrem-Szenarien“

Zum Abschluss werden die bisherigen Ergebnisse zu den potentiellen Umweltwirkungen aus der Herstellung eines CFK-Bauteils auf den Klimawandel in Relation zu Literaturquellen gesetzt. Dazu werden zwei „Extrem“-Szenarien mit möglichst hohen und niedrigen Umweltauswirkungen nach dem Indikator GWP₁₀₀ aus den Modellierungen und den bisherigen Ergebnissen gebildet. Für den Vergleich zu Werten aus der Literatur werden die Ergebnisse auf 1 kg CFK-Bauteil bezogen, indem die Ergebnisse der CFK-Flügelrippen über die Masse der funktionellen Einheit von 10 kg normiert werden.

Tabelle 5-1 enthält weitere Erläuterungen zu den „Extrem-Szenarien“ und die daraus resultierenden Ergebnisse aus den Modellen und Auswertungen dieser Arbeit.

Das „positive Extremszenario“ basiert auf dem Referenzmodell und den C-Faser-Werten von 20,12 kg. Dieser C-Faser-Wert ist auf den GaBi-Datensatz zur Herstellung von Kurzfasern zurückzuführen.

Um die daraus resultierenden CO₂-Äquivalente (Abschnitt 5.1: 457,36 kg) weiter gemäß eines positiven Extremszenarios zu reduzieren, wird die potentielle Verschnitt-Optimierung aus Abschnitt 5.3 zur Einsparung von 45,27 kg berücksichtigt. Daraus ergibt sich ein Endwert für die Herstellung der Flügelrippen (funktionelle Einheit 10 kg) von 412,09 kg und bezogen auf 1 kg CFK-Struktur 41,21 kg.

Tabelle 5-1: „Positives und negatives Extremszenario“ aus den Modellvarianten

Szenario	Erläuterungen Auswertung: Umweltindikator GWP ₁₀₀	CO ₂ -Eq. für 10 kg Flügelrippen	CO ₂ -Eq. für 1 kg CFK-Struktur
„Positives Extrem- Szenario“	<u>Niedrigster Wert an CO₂-Äquivalenten:</u> <ul style="list-style-type: none"> Referenzmodell mit C-Faser Werten von 20,12 kg: 457,36 (vgl. Abschnitt 5.1) Zusätzlich Verschnitt-Optimierung 45,27 kg weniger (vgl. Abschnitt 5.3) 	412,09 kg	41,21 kg
„Negatives Extrem- Szenario“	<u>Höchster Wert an CO₂-Äquivalenten:</u> <ul style="list-style-type: none"> Vorkettenmodell mit generischen Datensätzen aus der Umweltdatenbank Ecoinvent Ohne GaBi-Datensatz der Kurzfasern, sondern maximale C-Faser-Werte aus der Literatur von 50 kg (vgl. Abschnitt 5.1) 	833,47 kg	83,35 kg

Das „negative Extremszenario“ ist in Abschnitt 5.1 mit dem Endergebnis für die Flügelrippen von 833,47 kg zu entnehmen. Dieses Szenario beruht der konservativen Anwendung von generischen Datensätzen aus der Umweltdatenbank Ecoinvent und einem C-Faser-Wert von 50 kg, der sich wiederum konservativ an dem höchsten Literaturwert für die Herstellung der C-Fasern orientiert. Bezogen auf ein 1 kg CFK-Struktur resultieren aus diesem Modell zur Abbildung des Fertigungsprozesses 83,35 kg CO₂-Äquivalente.

Zur weiteren Diskussion werden diese beiden Endergebnisse ebenfalls mit den beiden „Extrem“-Ergebnissen aus der Literatur verglichen.

Die Werte aus der Abbildung 2-5 (Abschnitt 2.2, Seite 11) enthalten bereits den – in der Literatur gefundenen - niedrigsten und höchsten Wert an resultierenden CO₂-Äquivalenten aus der Herstellung von 1 kg CFK-Struktur. Die verwendeten CO₂-Äquivalente aus den Literaturquellen und den Extremszenarien bezogen auf ein Kilogramm CFK-Struktur sind vergleichend in der Abbildung 5-7 dargestellt.

Bei der Quelle DAS 2011 mit dem Wert von 16,9 kg CO₂-Äquivalente handelt es sich um ein SMC-Bauteil mit einem Faservolumengehalt von 34 % (vgl. Das 2011, S.270 & 278).

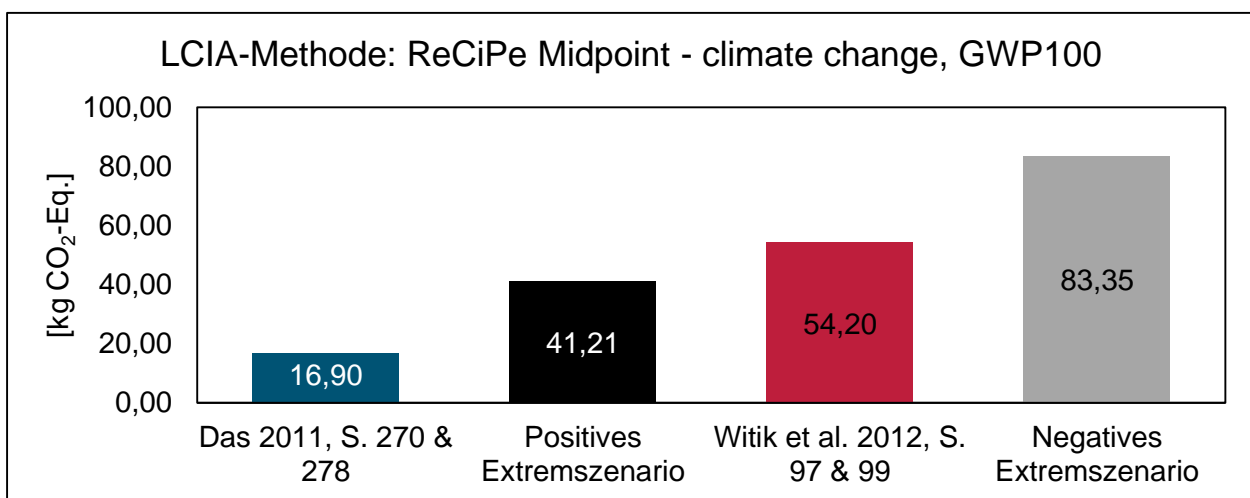


Abbildung 5-7: Vergleich der „Extremszenarien“ zu Literaturquellen (fE 1 kg)

Das „positive Extremszenario“ (41,21 kg CO₂-Äquivalente) aus dieser Prozessoptimierung lässt sich damit nur bedingt vergleichen. In diesem Szenario wird ein Bauteil aus Kurzfasern mit einem Faservolumengehalt von ca. 60% im SLI-Verfahren gefertigt und besitzt daher andere mechanische Eigenschaften und gewichtsspezifisch mehr Kohlenstofffasern mit höheren CO₂-Äquivalenten. Weiterhin beinhaltet das „positive Extremszenario“ noch die energieintensive Nutzung eines Autoklaven und die Materialien für den entsprechenden Vakuumaufbau.

Auch hier ist für die Zukunft ein Vergleich über ein funktionsgleiches CFK-Bauteil aus unterschiedlichen Herstellungsprozessen und Prozessvarianten sinnvoll. Die CO₂-Äquivalente aus dem „positiven Extremszenario“ würden sich bei einer Betrachtung von Kurzfasern und einem weniger aufwendigem Herstellungsverfahren in Richtung des Wertes von 16,9 kg verschieben. Eine interessante Untersuchung in der Zukunft ist, ob bei ähnlichen Betrachtungen und einer ökologischen Auswertung der Wert von 16,9 kg nach DAS 2011 erreicht werden kann.

Diesen beiden auf Kurzfaser basierenden Ergebnissen (links in der Abbildung) stehen die zwei nachfolgend diskutierten Werte, die sich auf Endlosfasern beziehen, gegenüber.

Auf Grund der verschiedenen mechanischen Eigenschaften werden unterschiedlicher Fasertypen ohne den Vergleich über eine funktionsgleiche CFK-Struktur an dieser Stelle nicht weiter miteinander betrachtet.

Die Quelle WITIK ET AL. 2012 weist einen Wert von 54,2 kg CO₂-Äquivalenten auf, wobei die CFK-Struktur in einem nicht weiter spezifizierten Infusionsprozess und der Aushärtung in einem Ofen gefertigt wurde (vgl. Witik et al. 2012, S.97ff.). In der gleichen Literaturquelle ist ebenfalls ein Wert von 53,6 kg CO₂-Äquivalenten für 1 kg Prepreg-Material aus einem Autoklav-Prozess angegeben (vgl. ebd.).

Die Ergebnisse aus dem „negativen Extremszenario“ basieren auf dem Vorkettenmodell mit generischen Datensätzen aus der Umweltdatenbank Ecoinvent ohne den GaBi-Datensatz für die Herstellung der Kohlenstofffasern. Als C-Faser-Wert wurde konservativ der Wert von 50 kg angenommen. Dieser orientiert sich an dem Wert von 46,8 kg aus eben dieser Quelle WITIK ET AL. 2012 (vgl. Witik et al. 2012, S. 99).

Der Unterschied an CO₂-Äquivalenten für 1 kg CFK-Struktur zwischen dem Wert von 54,2 kg nach WITIK ET AL. 2012 und 83,35 kg aus dem „negativen Extremszenario“ dieser Arbeit kann einerseits damit begründet werden, dass zur Aushärtung bei WITIK ET AL. 2012 kein Autoklav verwendet worden ist und die exakten mechanischen Eigenschaften nicht weiter angegeben sind. Bei der Annahme von ähnlichen mechanischen Eigenschaften einer Struktur von Prepreg-Material aus dem Autoklav-Prozess und textilem Halbzeug aus dem SLI-Prozess werden im Folgenden andere potentielle Gründe für den Unterschied von 53,6 kg (vgl. ebd.) zu dem negativen Extrem-Szenario in dieser Arbeit von 83,35 kg diskutiert.

Im Wesentlichen ist dies auf die allgemein konservative Betrachtungs- und Herangehensweise im Rahmen dieser Arbeit zurückzuführen. So wurden bereits bei der Prozessaufnahme die Prozessdaten aufgerundet und ebenfalls bei der Auswahl geeigneter Datensätze aus der Umweltdatenbank konservativ agiert. Auch der LCIA-Faktor der C-Fasern wurde, wie oben bereits beschrieben, konservativ behandelt. In weiteren Schritten gilt es, diese Annahmen weiter zu validieren und ggf. zu justieren.

Neben diesen konservativen Annahmen führt die geringe „Auslastung“ des Labor-Autoklaven, der in dieser Arbeit betrachtet wurde, zu hohen CO₂-Äquivalenten bezogen auf 1 kg CFK-Struktur. Eine höhere Auslastung des Autoklaven würde heruntergerechnet zu einer geringeren Menge an CO₂-Äquivalenten pro Kilogramm CFK-Struktur führen.

Insgesamt kann also bei dem „negativen Extremszenario“ in dieser Arbeit von einer „worst-case-Betrachtung“ gesprochen werden, wodurch das Ergebnis auch deutlich über dem höchsten Wert aus der zur Verfügung stehenden Literatur liegt und als Maximum anzusehen ist.

6 Fazit und kritische Würdigung

In diesem Abschnitt werden die bisherigen Ergebnisse zu einem Fazit kurz zusammengefasst und in Bezug zur Forschungshypothese kritisch gewürdigt.

Zuerst wurden die CO₂-Äquivalente nach dem GWP₁₀₀ für die Herstellung der Flügelrippen aus dem Vorkettenmodell (519,75 kg) mit dem Referenzmodell (771,10 kg) verglichen (Abschnitt 5.1). Große Unterschiede resultierten daraus, dass auf der einen Seite Kurzfasern (Vorkettenmodell) und auf der anderen Seite Literaturwerte für Endlosfasern (Referenzmodell) berücksichtigt wurden. Bei Betrachtung gleicher Faserhalbzeuge liegen die Werte aus dem Referenzmodell um einen festen Wert von 62,5 kg niedriger. Diese Differenz kann über die verwendeten Datensätze aus der Umweltdatenbank nachvollzogen werden. Hierzu wird auf die Daten in den entsprechenden Tabellen im Anhang unter VI.XVII (Seite 103) bis VI.XXII (Seite 109) verwiesen.

Dann wurden anhand des Vorkettenmodells mit Kurzfasern die potentiellen Umweltwirkungen mit allen Wirkungsindikatoren nach der Methode ReCiPe ausgewertet (Abschnitt 5.2). Bei einigen Indikatoren, wie zum Beispiel der Humantoxizität, können sich die resultierenden Umweltbelastungen im Vergleich zu den CO₂-Äquivalenten zwischen den einzelnen Teilprozessen verschieben. Die absoluten Werte einiger Umweltindikatoren wurden zusätzlich aus Sicht eines Konstrukteurs mit einem Referenzbauteil aus Aluminium verglichen. Die Ergebnisse aus dem Vergleich sind auf Grund der fehlenden Validierung der Werte aus dem Aluminium-Modell kritisch zu sehen. Das Ergebnis des Wasserverbrauchs von Aluminium (1 m³) gibt zumindest Anlass für Zweifel an dem Modell, da bei der Aluminiumproduktion deutlich mehr Wasser verwendet werden müsste. Zu prüfen sind die System- und Bilanzgrenzen der verwendeten generischen Datensätze. Ferner ist bei dem Indikator des Wasserverbrauchs fraglich, welcher Verbrauch an Wasser bei dem Vergleich jeweils berücksichtigt bzw. gezählt wird. Beispielsweise könnte am Ende des Prozesses wieder aufbereitetes Wasser, z.B. über einen Filter, nicht als „verbrauchtes“ Wasser zählen. Somit bietet dieser Vergleich lediglich einen ersten Anhaltspunkt für weitere Analysen und Simulationen funktionsgleicher Bauteile.

Des Weiteren konnten weitere Auswertungsmöglichkeiten durch die Nutzung der Modelle in Umberto aufgezeigt werden. Exemplarisch wurde ein Szenario zur Steigerung der Ökoeffizienz durch eine erhöhte Materialausnutzung betrachtet und somit eine Prozessoptimierung simuliert (Abschnitt 5.3). In den Vorkettenmodellen mit niedrigeren C-Faser-Werten resultierte eine Verbesserung der CO₂-Äquivalente nach dem Indikator GWP₁₀₀ um 8,7% und bei höheren C-Faser-Werten um 13,5%.

In einer abschließenden Auswertung (Abschnitt 5.4) wurden mit der Bildung von „Extremszenarien“ die Ergebnisse dieser Arbeit in Relation zu Daten aus der Literatur gesetzt. Der Nutzen aus dieser Betrachtungsweise wird nachfolgend noch einmal behandelt.

Insgesamt wurde im Verlauf der Arbeit festgestellt, dass in der Umweltdatenbank Ecoinvent (Version 3.1) bisher kein Datensatz zur Abbildung der ökologischen Auswirkungen aus der Herstellung von Kohlenstofffasern existiert.

Es konnte nur ein generischer Datensatz aus der Umweltdatenbank GaBi (Nr. 7 „Plastics SP 27“) zur Herstellung von Kurzfasern in das Vorkettenmodell integriert werden. Die ökologischen Auswirkungen **aller potentiellen Umweltwirkungen** aus der Herstellung eines endlosfaserverstärkten CFK-Bauteils konnten damit **nicht bewertet** werden. Folglich ist die formulierte Hypothese mit dem Bezug auf **Endlosfasern** mit den Erkenntnissen aus der Arbeit an dieser Stelle zu falsifizieren.

Dagegen konnten die Teilaspekte der Hypothese bis auf den Bezug auf Endlosfasern bestätigt und als Teilziele umgesetzt werden: Es wurde ein Modell über einen autoklavunterstützten Fertigungsprozess zur Herstellung eines komplexen CFK-Bauteils am Beispiel der Flügelrippen mit der Software Umberto NXT Universal aufgebaut. Mit den Daten aus den softwareintegrierten Datenbanken bildet es die **ökologischen Auswirkungen aller potentiellen Umweltwirkungen eines kurzfaserverstärkten CFK-Bauteils modellhaft „von der Wiege bis zum Fabrikator“ ab.**

Über das Vorkettenmodell und einer Anpassung der LCIA-Faktoren für die Kohlenstofffasern (auf der Grundlage von CO₂-Äquivalenten aus Literaturquellen) wurden die potentiellen Umweltwirkungen nach dem **Indikator GWP₁₀₀ bezogen auf den Klimawandel auch** für ein **endlosfaserverstärktes CFK-Bauteil modellhaft abgebildet** und ausgewertet.

Die Diskussion der erzeugten „Extremszenarien“ leistet einen Beitrag, um der unsicheren und zum Teil unvollständigen Datengrundlage zu potentiellen Umweltwirkungen von CFK zu begegnen. Weiterhin können anhand dieser Arbeit Literaturwerte zukünftig besser eingeordnet werden.

Bei CO₂-Äquivalenten in der Größenordnung um die 20 kg pro Kilogramm Kohlenstofffaser (oder sogar bezogen auf ein gesamtes CFK-Bauteil) ist davon auszugehen, dass es sich in dem Fall um Kurzfasern handelt (vgl. GaBi-Datensatz im Anhang unter VI.XXXI, Seite 123 sowie Das 2011, S. 278).

Für die Betrachtung von endlosfaserverstärkten CFK-Bauteilen stellt der aus dieser Arbeit resultierende Wert aus dem „negativen Extremszenario“ von 83,35 kg CO₂-Äquivalenten ein Maximum aus einer „worst-case“ Betrachtung dar. Damit ist sichergestellt, dass in dieser Arbeit der Werkstoff CFK fälschlicherweise nicht „besser als in der Realität“ abschneidet.

Hingegen kann mit den Untersuchungen dieser Arbeit nicht beantwortet werden, welchen Wert das Minimum an emittierten CO₂-Äquivalenten pro Kilogramm endlosfaserverstärkter CFK-Struktur besitzt. Die Datengrundlage für den Haupteinflussfaktor (Herstellung der Kohlenstofffaser) ist zu unsicher. Insbesondere sind Literaturdaten oftmals nicht näher hinsichtlich der berücksichtigten Prozess- und Materialparameter spezifiziert.

Ein erster Ansatzpunkt für eine solche Einschätzung des Minimums bietet die Quelle DAS 2011 mit einem Literaturwert von 31 kg CO₂-Äquivalente pro Kilogramm hergestellter Kohlenstofffaser (vgl. Das 2011, S. 278). Ob es sich dabei um Endlosfasern handelt bzw. handeln kann, ist zukünftig zu prüfen. Die Differenz zu dem höchsten Wert von 46,8 kg pro Kilogramm hergestellter Kohlenstofffaser nach WITIK ET AL. 2012 würde in der Folge große Unterschiede im Endergebnis der CO₂-Äquivalente nach dem GWP₁₀₀ bewirken (vgl. Witik et al. 2012, S. 99).

Um letztendlich auch alle potentielle Umweltwirkungen aus der Herstellung von Endlos-Kohlenstofffasern korrekt abzubilden, wäre eine Sammlung von Primärdaten bei den Herstellern selbst bzw. eine transparente Darstellung bzw. Offenlegung der Hersteller von Kohlenstofffasern z.B. über einen entsprechenden generischen Datensatz, der in einer Umweltdatenbank für Anwender zugänglich ist, wünschenswert.

Die „Black-Box“-Betrachtungsweise bei der Prozessaufnahme führt dazu, dass keine Wirkungszusammenhänge im „Systeminneren“ berücksichtigt und abgebildet wurden. Folglich beziehen sich die aufgenommenen Daten und die resultierenden Ergebnisse nur auf die Herstellung der Flügelrippen. Für Vorhersagen über die potentiellen Umweltwirkungen bei der Fertigung anderer, komplexer CFK-Bauteile sind weitere Untersuchungen notwendig. Jedoch können die Flügelrippen als repräsentatives Bauteil für eine Vielzahl von Strukturbauteilen dieser Größe und Komplexität betrachtet werden.

Grundsätzlich kritisch zu sehen und zu hinterfragen sind die in dieser Arbeit festgelegten Systemgrenzen, die gerundeten Werte nach der Prozessaufnahme, die Vereinfachungen zur Modellerstellung sowie die getroffenen Annahmen bei der Verwendung – zur Verfügung stehender – generischen Datensätze der Umweltdatenbanken.

Mittels der ausführlichen Erläuterungen und transparenten Darstellungen können diese Punkte betrachtet und nachvollzogen werden. Insbesondere sind zukünftig die verwendeten Materialien zur Herstellung eines CFK-Bauteils und ihre Auswirkungen auf die weiteren Umweltindikatoren neben dem GWP₁₀₀ zu prüfen. Mit weitergehenden Untersuchungen sind dann die erstellten Modelle zu validieren.

Mögliche Fehler bei der Modellierung selbst können aus dem allgemeinen Modellbildungsprozess (Abbildung 3-3, Seite 21) resultieren.

Dabei können je nach Kenntnisstand des Anwenders die Vorstellungen und Abstraktionen über das zu modellierende Objekt abweichen und bereits zu verschiedenen mentalen Modellen führen. Der weitere Schritt der Systemabbildung mit zusätzlichen Abstraktionen ist dann ein weiteres Glied einer möglichen Fehlerkette bei einer Modellierung, sodass getroffene Annahmen überprüft und das Modell weiterhin validiert werden muss.

Auch in den entwickelten Modellen sind Vereinfachungen enthalten, um die Komplexität und den Modellierungsaufwand zu reduzieren. Beispielsweise wurde angenommen, dass Energieflüsse nicht aufgeteilt werden und als Outputs nur verbrauchte Energie oder Abwärme aus einem Teilprozess resultieren. Die im Bauteil gespeicherte Energie wurde nicht berücksichtigt.

7 Ausblick

Neben den bisherigen Auswertungen sind weitere Betrachtungen der einzelnen Teilprozesse mit den verschiedenen Umweltindikatoren aus der Methode ReCiPe möglich. Gewichtungen einzelner Umweltindikatoren, Aggregationen zu Spitzenkennzahlen bzw. endpoint-Indikatoren können ebenso wie grundsätzlich andere Bewertungsverfahren angewendet werden.

Ferner sind auf der Output-Seite die Auswirkungen auf die Umwelt von den gasförmigen Emissionen, Abfallprodukten, verbrauchter elektrischer Energie und Abwärme aus dem Herstellungsprozess zu untersuchen. Neben negativen Auswirkungen können dabei auch „Gutschriften“ an Umweltbelastungen aus Verwertungsmaßnahmen bzw. Abfallbehandlungen dieser Outputs resultieren. Beispiele hierfür wären die Weiterverwendung von Abfällen (unter anderem Recycling) oder die Nutzung der Abwärme.

Weiterhin lässt sich zukünftig der Komplexitätsgrad der Modellierungen aufbauend auf diesen entwickelten Modellen beliebig erhöhen und somit zu starke Abstraktionen rückgängig machen.

Die benutzerdefinierten Funktionen können zur Implementierung von Formeln genutzt werden, um zum Beispiel mit dem angestrebten Faservolumengehalt und den Sicherheitsfaktoren für die Zuleitungen den Bedarf bzw. Verbrauch an Harz zu berechnen. Zusätzlich könnte mit entsprechenden Formeln versucht werden, Kapazitätsgrenzen abzubilden und Losgrößenberechnungen für eine optimierte Auslastung eines Autoklaven durchzuführen.

Darüber hinaus bietet Umberto seit dem letzten Update auch die Möglichkeit, mit der Programmiersprache Python Schnittstellen zu anderen Softwarelösungen herzustellen. Ein automatisches Einlesen von Prozessdaten aus entsprechenden Datenbanken oder ähnlich sinnvollen Verknüpfungen ist damit möglich.

Von besonderem Interesse sind langfristig zuverlässige Modelle und aussagekräftige Vergleiche zu den Umweltwirkungen funktionsgleicher Bauteile aus verschiedenen Leichtbaumaterialien oder CFK-Strukturen aus unterschiedlichen Prozessvarianten. Um dabei letztendlich auch alle potentiellen Umweltwirkungen aus der Herstellung von endlosfaserverstärkten CFK korrekt abzubilden, sind zuverlässige Daten zu der Herstellung dieser Kohlenstofffasern anzustreben.

Die auch mit Auswirkungen auf die Umwelt verbundenen Nutzungs- als auch die End-of-Life-Phase im Lebenszyklus sind weiterhin bei einer vollständigen Ökobilanzierung mit einzubeziehen. Dabei stehen den möglichen Vorteilen von CFK durch Gewichts- und Treibstoffeinsparungen auch weitere Herausforderungen wie Reparatur und Recycling von CFK-Bauteilen gegenüber.

Abschließend wird auf den Ansatz der lebenszyklusbasierten Nachhaltigkeitsanalyse (LCSA) verwiesen, in die sich eine Ökobilanz integrieren ließe, da in der Praxis neben den ökologischen Aspekten auch ökonomische und soziale Faktoren von Bedeutung sind.

8 Literaturverzeichnis

- Achternbosch, M., Bräutigam, K.-R., Kupsch, C., Sardemann, G., 2003: Analyse der Umweltauswirkungen bei der Herstellung, dem Einsatz und der Entsorgung von CFK- bzw. Aluminiumrumpfkomponten, in: Wissenschaftliche Berichte des Forschungszentrums Karlsruhe in der Helmholtz-Gemeinschaft, FZKA 6879, <http://www.itas.kit.edu/pub/v/2003/acua03a.pdf>, Letzter Zugriff: 14.09.2015
- Al-Lami, A. M. H., 2015: Life Cycle Assessment and Life Cycle Cost Analysis for Manufacturing and Assembly of complex composite structures, Masterarbeit an dem Institut für Adaptronik und Funktionsintegration der Technischen Universität Braunschweig
- Ausberg, L., Ciroth, A., Feifel, S., Franze, J., Kaltschmitt, M., Klemmayer, I., Meyer, K., Saling, P., Schebek, L., Weinberg, J., Wulf, C., 2015: Lebenszyklusanalysen, in: Kaltschmitt, M., Schebek, L. (Hrsg.): Umweltbewertung für Ingenieure – Methoden und Verfahren, Springer Vieweg Verlag, Berlin / Heidelberg, S. 205-314
- AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. (Hrsg.), 2014: Handbuch Faserverbundkunststoffe / Composites – Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, 4. Aufl.
- Becker, J., Mathas, C., Winkelmann, A., 2009: Geschäftsprozessmanagement, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg
- Becker, J., Probandt, W., Vering, O., 2012: Grundsätze ordnungsmäßiger Modellierung – Konzeption und Praxisbeispiel für ein effizientes Prozessmanagement, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg
- Das, S., 2011: Life Cycle Assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites, in: The International Journal of Life Cycle Assessment, Springer Verlag, Berlin/ Heidelberg, volume 16, S. 268-282
- Deng, Y., 2014: Life Cycle Assessment of biobased fibre-reinforced polymer composites, KU Leuven
- DIN EN ISO 14040, 2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen (ISO 14040:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14040:2006, Beuth Verlag, Berlin

-
- DIN EN ISO 14044, 2006: Umweltmanagement – Ökobilanz – Anforderungen und Anleitungen (ISO 14044:2006); Deutsche und Englische Fassung EN ISO 14044:2006, Beuth Verlag, Berlin
- Duflou, J. R., Deng, Y., van Acker, K., Dewulf, W., 2012: Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study. MRS Bulletin (Materials Research Society), volume 37, S. 374-382
- Dyckhoff, H., Souren, R., 2008: Nachhaltige Unternehmensführung – Grundzüge industriellen Umweltmanagements, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg
- Dyckhoff, H., Spengler, T. S., 2010: Produktionswirtschaft – Eine Einführung, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg, 3. Aufl.
- Ehrenberger, S., Schmid, S., Knöfel, S., Schüler-Hainsch, E., 2013: Recycling, Life-Cycle-Assessment und Rohstoffverfügbarkeit, in: Friedrich, H. E. (Hrsg.): Leichtbau in der Fahrzeugtechnik, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden, S. 727-766
- Eickenbusch, H., Krauss, O., 2014: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien, Kurzanalyse Nr. 3 des VDI Zentrum Ressourceneffizienz, VDI ZRE Publikationen, Berlin, 2. Aufl.
- Engels, A., Roehrig, M., Witte, T., 2012: Possible optimization of the energy balance in the automotive sector by the use of carbon composite structures, in: Procedia Engineering, Elsevier Ltd, volume 49, S. 303-309
- Goedkoop, M., Heijungs, R., Huijbregts, M., de Schryver, A., Struijs, J., van Zelm, R., 2013: ReCiPe 2008 – A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level, version 1.08, https://35f23ee4-a-62cb3a1a-s-sites.googlegroups.com/site/lciarecipe/file-cabinet/ReCiPe_main_report_MAY_2013.pdf?attachauth=ANoY7cp8g3l4ANikYTo_jKjNG6XrYS5upBojQBvoFHPJ11dSZF4T4Fghlj_IRqG-WJhvpIW89Yd_OzRrYKlpHdDJAo3GxK4svR41PT_rLklcdhd-ezZq65248jnVUI-zc3QBNhSf0YsTU5P3OUZQfg9MKbliZcf74nSRDfNqMoXvt79zvwvjJT8tuRQY-1Y3ZPKSqtGLOluoIYWNG_Qc4U84ayzl5j-ogfYkIxNaG2l0X3hMY6kABRXjZ--VjzF_rA1-1vAwGpc&attredirects=1, Letzter Zugriff: 12.09.2015
- Großklos, M., 2014: Kumulierter Energieaufwand und CO₂- Emissionsfaktoren verschiedener Energieträger und -versorgungen, http://www.iwu.de/fileadmin/user_upload/dateien/energie/werkzeuge/kea.pdf, Letzter Zugriff: 12.05.2015

-
- Heinemann, T., Thiede, S., Herrmann, C., 2013: Handlungsfeld Bewertung von Energie- und Ressourceneffizienz in industriellen Prozessketten, in: Herrmann, C., Pries, H., Hartmann, G. (Hrsg.): Energie- und ressourceneffiziente Produktion von Aluminiumdruckguss, Springer Vieweg Verlag, Berlin / Heidelberg, S. 277-320
- Herrmann, C., 2010: Ganzheitliches Life Cycle Management – Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg
- Hesselbach, J., 2012: Energie- und klimaeffiziente Produktion – Grundlagen, Leitlinien und Praxisbeispiele, Springer Vieweg Verlag, Wiesbaden
- Kleineberg, M., 2008: Präzisionsfertigung komplexer CFK-Profile am Beispiel Rumpfspant, in: Forschungsbericht Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt in der Helmholtz-Gemeinschaft, Forschungsbericht 2008-23, Köln
- Klöpffer, W., Grahl, B., 2009: Ökobilanz (LCA) – Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf, WILEY-VCH Verlag, Weinheim
- Krcmar, H., 2015: Informationsmanagement, Springer Gabler Verlag, Berlin / Heidelberg, 6. Aufl.
- Lambrecht, H., 2011: Stoffstromnetzbasierter Optimalplanung des Ressourceneinsatzes industrieller Produktionssysteme, http://opus.uni-lueneburg.de/opus/volltexte/2011/14206/pdf/Lambrecht2011_Dissertation.pdf, Letzter Zugriff: 12.09.2015
- Lässig, R., Eisenhut, M., Mathias, A., Schulte, R. T., Peters, F., Kühmann, T., Waldmann, T., Begemann, W., 2012: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen – Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau, Roland Berger Studie, http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Serienproduktion_hochfester_Faserverbundbauteile_20120926.pdf, Letzter Zugriff: 15.09.2015
- Lehold, J., 2011: Chancen und Grenzen für einen nachhaltigen FVK-Einsatz im Automobil, CCev Automotive Forum 2011, Ingolstadt 30.06.2011
- Lüdemann, L., Feig, K., 2014: Vergleich von Softwarelösungen für die Ökobilanzierung – eine softwareergonomische Analyse, in Logistics Journal: nicht referierte Veröffentlichungen, Vol. 2014, http://www.logistics-journal.de/not-reviewed/2014/09/3991/luedemann_2014.pdf, Letzter Zugriff: 11.09.2015

-
- Martin, P., 2013: Produktion im Flugzeugbau – technisch anspruchsvolle Herstellungsverfahren in komplexen Leistungserbringungsprozessen, in: Hinsch, M., Olthoff, J. (Hrsg.): Impulsgeber Luftfahrt – Industrial Leadership durch luftfahrtspezifische Aufbau- und Ablaufkonzepte, Springer Vieweg Verlag, Berlin / Heidelberg, S. 159-190
- Neitzel, M., Mitschang, P., Breuer, U., 2014: Handbuch Verbundwerkstoffe – Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung, Carl Hanser Verlag, München, 2. Aufl.
- Posch, A., 2012: Darstellung und kritische Analyse ökologieorientierter Bewertungsverfahren, in: Tschandl, M., Posch, A. (Hrsg.): Integriertes Umweltcontrolling – Von der Stoffstromanalyse zum Bewertungs- und Informationssystem, Gabler Verlag, Wiesbaden, 2. Aufl., S. 99-128
- Qiu, L., Yuan, S., Zhang, X., Wang, Y., 2011: A time reversal focusing based impact imaging method and its evaluation on complex composite structures, in: Smart materials and structures, IOP Publishing Ltd, volume 20, S. 1-11
- Reinhardt, S. K. C., 2013: Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung, Utz-Verlag, München
- Schmidt, M., 1997: Stoffstromnetze zwischen produktbezogener und betrieblicher Ökobilanzierung, in: Schmidt, M., Häuslein, A. (Hrsg.): Ökobilanzierung mit Computerunterstützung – Produktbilanzen und betriebliche Bilanzen mit dem Programm Umberto, Springer Verlag, Berlin / Heidelberg / New York, S. 11-24
- Schmidt, M., Keil R., 2002: Stoffstromnetze und ihre Nutzung für mehr Kostentransparenz sowie die Analyse der Umweltwirkung betrieblicher Stoffströme, in: Beiträge der Hochschule Pforzheim, Nr. 103, <http://umwelt.hs-pforzheim.de/fileadmin/dokumente/2002/Beitraege103.pdf>, Letzter Zugriff: 12.09.2015
- Viere, T., Stock M., Hey, B., 2014: Ressourceneffizienz auf Unternehmensebene: Stoffstromnetzbasierende Energie- und Materialfluss(kosten)rechnung und Umweltbewertung, in: Prammer, H. K. (Hrsg.): Ressourceneffizientes Wirtschaften – Management der Materialflüsse als Herausforderung für Politik und Unternehmen, Springer Gabler Verlag, Wiesbaden, S. 91-112
- von Weizsäcker, E. U., Hargroves, K., Smith, M., 2010: Faktor Fünf – Die Formel für nachhaltiges Wachstum, Droemer Verlag, München
- Walther, G., 2010: Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke – Überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus, Gabler Verlag, Wiesbaden

-
- Witik, R. A., Payet, J., Michaud, V., Ludwig, C., Manson, J.-A., 2011: Assessing the life cycle costs and environmental performance of lightweight materials in automobile applications, in: Composites: Part A, Elsevier Ltd, volume 42, S. 1694-1709
- Witik, R. A., Gaille, F., Teuscher, R., Ringwald, H., Michaud, V., Manson, J.-A., 2012: Economic and environmental assessment of alternative production methods for composite aircraft components, in: Journal of Cleaner Production, Elsevier Ltd, volume 29-30, S. 91-102

VI Anhang

VI.I Auszüge aus dem Life Data Sheet zur Herstellung der CFK-Rippen

Quelle: LDS „LOCOMACHS Testpyramide – NCF – Rippen“ von M. Buggisch, DLR-FA-FVT

1. Allgemeine Informationen zum Versuch

Die hier herzustellenden Bauteile bzw. alle erforderlichen Prozessvorgänge dienen der Herstellung von Flügelrippen-Demonstratoren. Diese werden anschließend für Montageversuche an weitere Projektmitglieder zur Verfügung gestellt. Die zwei unterschiedlichen Rippengeometrien werden aus neuen, schlagzähmodifizierten NCF-Halbzeugen der Fa. Toho Tenax hergestellt. Die Infiltration mit Luftfahrtharz (Epikote EPS 600) erfolgt mit Hilfe des SLI-Verfahrens im Autoklaven unter 6 bar Druck.

2. Werkstoffdaten – Herstellerangaben

2.1. Faser: IMS Faser von Toho Tenax-E IMS65 E23 24K 830tex; spez. Gewicht $1,78 \text{ g/cm}^3$

2.2. Matrix: EP-Harz; EPS 600; spez. Dichte $1,11 \text{ g/cm}^3$ (RT flüssig), $1,14 \text{ g/cm}^3$ (RT fest)

2.3. NCF – Material

2.3.1. Triaxial – Carbon – Gelege:

Material: [-45/90/+45] & [+45/90/-45] (Nennflächengesamtgewicht: 600 g/m^2)

2.3.2. Bidiagonal – Carbon – Gelege:

Material: [+45/-45] & [-45/+45] (Nenngesamtflächengewicht: 400 g/m^2)

3. Fertigung

Fertigungsort :: DLR Braunschweig

Fertigungsart :: SLI (Open Mould), Kartuscheninfusion

VI.II Zuschnitt-Abmessungen & Lagenaufbau Rippe 2

Quelle: LDS „LOCOMACHS Testpyramide – NCF–Rippen“ von M. Buggisch, DLR-FA-FVT

Abschnitt 3.1

Anmerkungen:

- Im LDS und somit auch hier befinden sich nur ungefähre Angaben
- Genaue Maße sind in computerunterstützten Softwarelösungen enthalten
- Rippe 3 besitzt den gleichen Lagenaufbau mit „kleineren“ Abmaße

<u>Rippe 2</u>	Region	Länge [mm]	Breite [mm]	Material	Orientierung	Dicke
Ply 1	Full Ply	1406	371	Triax	135/90/45	0,582
Ply 2	Full Ply	1404	370	Biax	45/135	0,388
Ply 3	Full Ply	1402	369	Triax	45/90/135	0,582
Ply 4	Full Ply	1400	368	Biax	135/45	0,388
Ply 5	Full Ply	1398	367	Triax	135/90/45	0,582
Ply 6	Full Ply	1396	366	Biax	45/135	0,388
Ply 7	Full Ply	1394	365	Triax	45/90/135	0,582
Ply 8	Full Ply	1392	364	Biax	135/45	0,388
Ply 9	Full Ply	1390	363	Biax	45/135	0,388
Ply 10	Full Ply	1388	362	Triax	135/90/45	0,582
Ply 11	Full Ply	1386	361	Biax	135/45	0,388
Ply 12	Full Ply	1384	360	Triax	45/90/135	0,582
Ply 13	Full Ply	1382	359	Biax	45/135	0,388
Ply 14	Full Ply	1380	358	Triax	135/90/45	0,582
Ply 15	Full Ply	1378	357	Biax	135/45	0,388
Ply 16	Full Ply	1377	356	Triax	45/90/135	0,582

VI.III Prozessdaten Grundmodell & CO₂-Äquivalente Referenzmodell: TP 1 Cutting

Factor	Recorded values	Assumed value	Unit	Mass/ Unit	Source: mass	CO ₂ -Eq. [kg CO ₂ /unit]	Source: CO ₂	kg CO ₂ -Eq.-Factor Umberto
Equipment & Tools (source [Gro]= Großklos 2014)								
Cutting computer (el. E)	0,16 0,17	0,2	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Cutter (el. E)	6,15 10,62	10	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Fiber (Input = use + waste; *: no coherent data; **: value from software with cutting-layout; source [Wit]= Witik et al. 2012)								
Bi-Diagonal	- * use 6,6 **	10,5 (use 7)	m ²	0,400 kg/m ²	Anhang VI.I; LDS, p. 7	50 kg/kg	50~46.8; vgl. [Wit], p. 99	20 / m ²
Triaxial	- * use 6,6 **	10,5 (use 7)	m ²	0,600 kg/m ²	Anhang VI.I; LDS, p. 5	50 kg/kg	50~46.8; vgl. [Wit], p. 99	30 / m ²
Fiber Waste (*: no coherent data; **: value from software with cutting-layout; source [Wit]= Witik et al. 2012)								
Bi-Diagonal	- * 3,5 **	3,5	m ²	0,400 kg/m ²	Anhang VI.I; LDS, p. 7	-	-	-
Triaxial	- * 3,5 **	3,5	m ²	0,600 kg/m ²	Anhang VI.I; LDS, p. 5	-	-	-
Supplies								
Cotton gloves	2	2	pair	0,403 kg	Database Al-Lami, ID: 9009	2,20 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9009	0,8866 / pair
Cutting paper	26,86 27,18	27	m ²	0,080 kg/m ²	Database Al-Lami, ID: 9011	2,42 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9011	0,1936 / m ²

VI.IV Prozessdaten Grundmodell & CO₂-Äquivalente Referenzmodell: TP 2 Preforming

Factor	Recorded values	Assumed value	Unit	Mass/ Unit	Source: mass	CO ₂ -Eq. [kg CO ₂ /unit]	Source: CO ₂	kg CO ₂ -Eq.-Factor Umberto
Equipment & Tools (source [Gro]= Großklos 2014)								
Hot air blower (el. E)	4,80 4,93	5	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Vacuum pump (el. E)	2,58 2,90	3	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Supplies								
Adhesive tape, red	7,68	8	m	0,055 kg/m	Database Al-Lami, ID: 9003	2,70 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9003	0,1485/ m
Cotton gloves	4	4	pair	0,403 kg	Database Al-Lami, ID: 9009	2,20 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9009	0,8866/ pair
Release film	1,39	1,5	m ²	0,088 kg/m ²	Database Al-Lami, ID: 9017	2,67 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9017	0,23496/ m ²

VI.V Prozessdaten Grundmodell & CO₂-Äquivalente Referenzmodell: TP 3 Preparing

Factor	Recorded values	Assumed value	Unit	Mass/ Unit	Source: mass	CO ₂ -Eq. [kg CO ₂ /unit]	Source: CO ₂	kg CO ₂ -Eq.- Factor Umberto
Equipment & Tools (source [Gro]= Großklos 2014)								
Vacuum pump (el. E)	0,45	1	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Resin heater (el. E)	0,06	0,5	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Air exhaust (el. E)	0,36	0,5	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Oven (el. E)	4,06	4	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Supplies (*: no coherent data; **: value from LDS)								
Acetone	0,45	0,5	l	0,785 kg/l	Database Al-Lami, ID: 9001	2,19 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9001	1719,15/ m ³
Adhesive tape, red	1	1	m	0,055 kg/m	Database Al-Lami, ID: 9003	2,70 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9003	0,1485/ m
Breather	0,01	0,1	m ²	0,150 kg/m ²	Database Al-Lami, ID: 9005	4,93 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9005	0,7395/ m ²
Chemlease 255 Release Agent	0,09	0,1	l	0,770 kg/l	Database Al-Lami, ID: 9006	N/A	N/A	N/A
Cleaning Tissue	20	20	sheet	0,005 kg	Database Al-Lami, ID: 9007	2,42 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9007	0,0121/ sheet

Copper Pipe	3,5	4,5**	m	0,2 kg/m	Database Al-Lami, ID: 9008	3,30 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9008	0,66/ m
Gloves	4	4	pair	0,028 kg	Database Al-Lami, ID: 9012	1,63 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9012	0,04564/ pair
Hoseclamp	8	16**	piece	0,002 kg	Database Al-Lami, ID: 9013	1,77 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9013	0,00354/ piece
Peel ply	4,05	4	m ²	0,095 kg/m ²	Database Al-Lami, ID: 9015	7,90 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9015	0,7505/ m ²
Sealant Tape	14,40 15,10	15	m	0,060 kg/m	Database Al-Lami, ID: 9018	7,50 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9018	0,45/ m
T-Connector, brass	1	1	piece	0,030 kg	Database Al-Lami, ID: 9020	3,83 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9020	0,1149/ piece
Tin can (large)	2	2	piece	0,313 kg	Database Al-Lami, ID: 9023	1,77 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9023	0,55401/ piece
Vacuum film	6,82	7	m ²	0,074 kg/m ²	Database Al-Lami, ID: 9026	2,40 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9026	0,1776/ m ²
Water	0,01	0,01	m ³	0,001 kg/m ³	Database Al-Lami, ID: 9027	0,04 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9027	0,00004/ m ³
Hose nipple	- *	2	piece	0,020 kg	Database Al-Lami, ID: 9083	3,83 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9083	0,0766/ piece
Teflon stripe	- *	0,5	m	0,001 kg/m	Database Al-Lami, ID: 9084	7,40 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9084	0,0074/ m

VI.VI Prozessdaten Grundmodell & CO₂-Äquivalente Referenzmodell: TP 4 Infusion

Factor	Recorded values	Assumed value	Unit	Mass/ Unit	Source: mass	CO ₂ -Eq. [kg CO ₂ /unit]	Source: CO ₂	kg CO ₂ -Eq.-Factor Umberto
Equipment & Tools (*: no coherent data; source [Gro]= Großklos 2014)								
Vacuum pump (el. E)	0,7	1	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Air exhaust (el. E)	- *	0,5	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Injection pump + measuring device	- *	1	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Resin								
Epikote System 600	3,91 4,96	4,5	kg	1,000 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 7043	6,68 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 7043	6,68/ kg
Resin Waste								
Epikote System 600	0,92 1,36	1,5	kg	1,000 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 7543	-	-	-
Supplies								
Gloves	2	2	pair	0,028 kg	Database Al-Lami, ID: 9012	1,63 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9012	0,04564/ pair

VI.VII Prozessdaten Grundmodell & CO₂-Äquivalente Referenzmodell: TP 5 Tempering

Factor	Recorded values	Assumed value	Unit	Mass/ Unit	Source: mass	CO ₂ -Eq. [kg CO ₂ /unit]	Source: CO ₂	kg CO ₂ -Eq.-Factor Umberto
Equipment & Tools (source [Gro]= Großklos 2014)								
Vacuum pump (el. E)	2,23	3	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Autoclave, large (el. E)	267 269	270	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ

VI.VIII Prozessdaten Grundmodell & CO₂-Äquivalente Referenzmodell: TP 6 Demolding

Factor	Recorded values	Assumed value	Unit	Mass/ Unit	Source: mass	CO ₂ -Eq. [kg CO ₂ /unit]	Source: CO ₂	kg CO ₂ -Eq.-Factor Umberto
Equipment & Tools (source [Gro]= Großklos 2014)								
Air exhaust (el. E)	0,72	1	kWh	-	-	0,617 kg/kWh	[Gro], p. 3	0,17139/ MJ
Supplies								
Acetone	0,15	0,5	l	0,785 kg/l	Database Al-Lami, ID: 9001	2,19 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9001	1719,15/ m ³
Cleaning Tissue	15 35	30	sheet	0,005 kg	Database Al-Lami, ID: 9007	2,42 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9007	0,0121/ sheet
Cotton swab	2	2	piece	0,001 kg	Database Al-Lami, ID: 9010	2,20 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9010	0,0022/ piece
Gloves	4	4	pair	0,028 kg	Database Al-Lami, ID: 9012	1,63 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9012	0,04564/ pair
Water	0,005	0,005	m ³	0,001 kg/m ³	Database Al-Lami, ID: 9027	0,04 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9027	0,00004/ m ³
Wooden spatula	2	2	piece	0,012 kg	Database Al-Lami, ID: 9028	0,46 kg/kg	Database Al-Lami, ID: 9028	0,00552/ piece

VI.IX Simulation eines Zuschnitts mit Rollenbreite 1270 mm

Quelle: Geometrien der einzelnen Lagen für die Verwendung im Cutter-Programm von M. Buggisch, DLR-FA-FVT

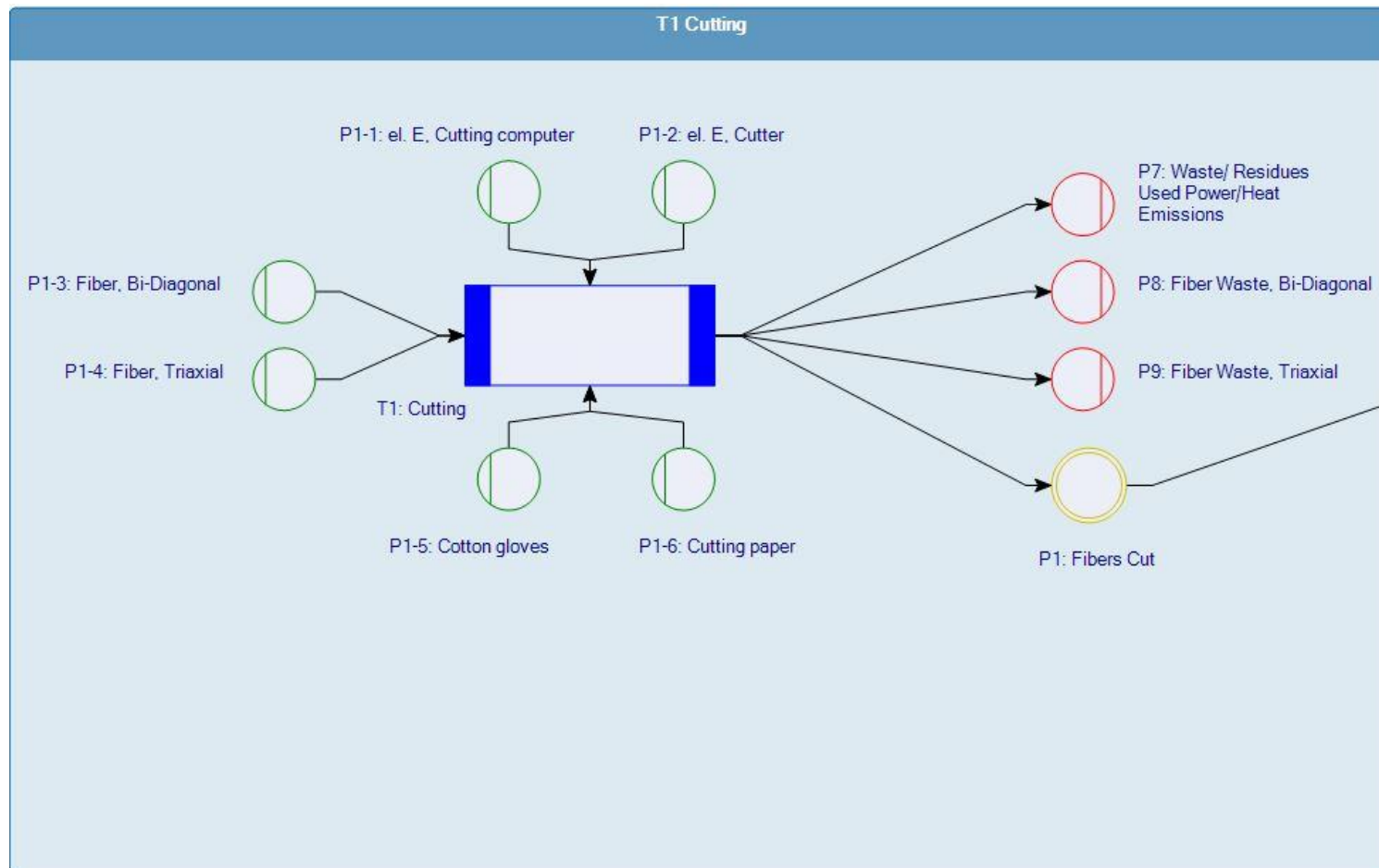
Anmerkungen:

- Simulation eines Materialzuschnitts von 4: Triaxial – Carbon – Gelege [135/90/45]
- Lagen gemäß Lagenaufbau (Anhang VI.II) von Rippe 2 & 3: Nr. 1,5,10,14
- Einstellen der Materialdimensionen (Rollenbreite = 1270 mm, Länge variabel) und berechnen des Zuschnitts mit Cutter-Programm
- Abbildungen sind dem Programm direkt entnommen:

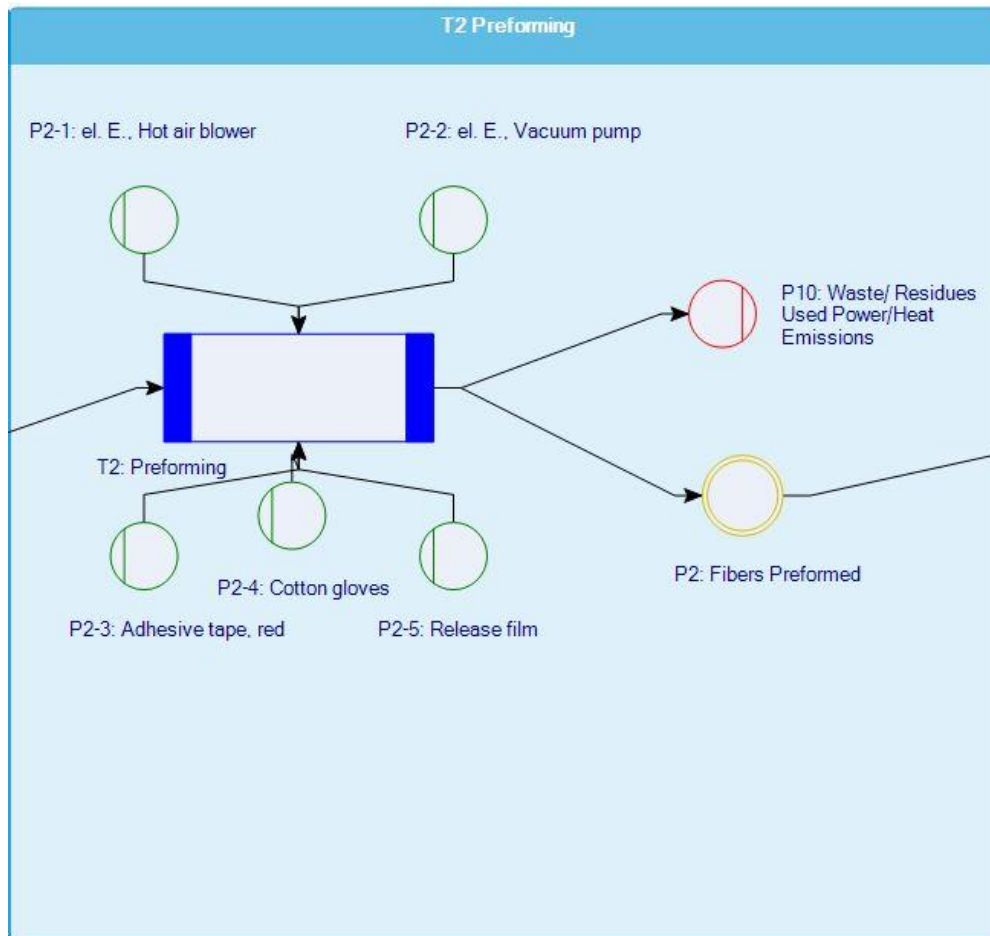
Name	Ansicht	Grösse(X)	Grösse(Y)	Anzahl
2-10		1342,11	354,118	1
2-1		1353,38	354,34	1
2-5		1347,88	352,89	1
2-14		1337,19	353,987	1
3-1		1347,98	337,528	1
3-5		1343,27	336,491	1
3-10		1338,11	336,028	1
3-14		1332,49	336,425	1

Material Dimensionen	Fläche
Materialbreite: 1.270 m	Materialverbrauch: 5.098 m ²
Materiallänge: 4.014 m	Nutzen: 3.503 m ²
	Abfall: 1.595 m ²
	Ausnutzung(%): 68.71 %
	Elements placed: 8
<input type="button" value="Neu Berechnen"/> <input type="button" value="Ok"/>	

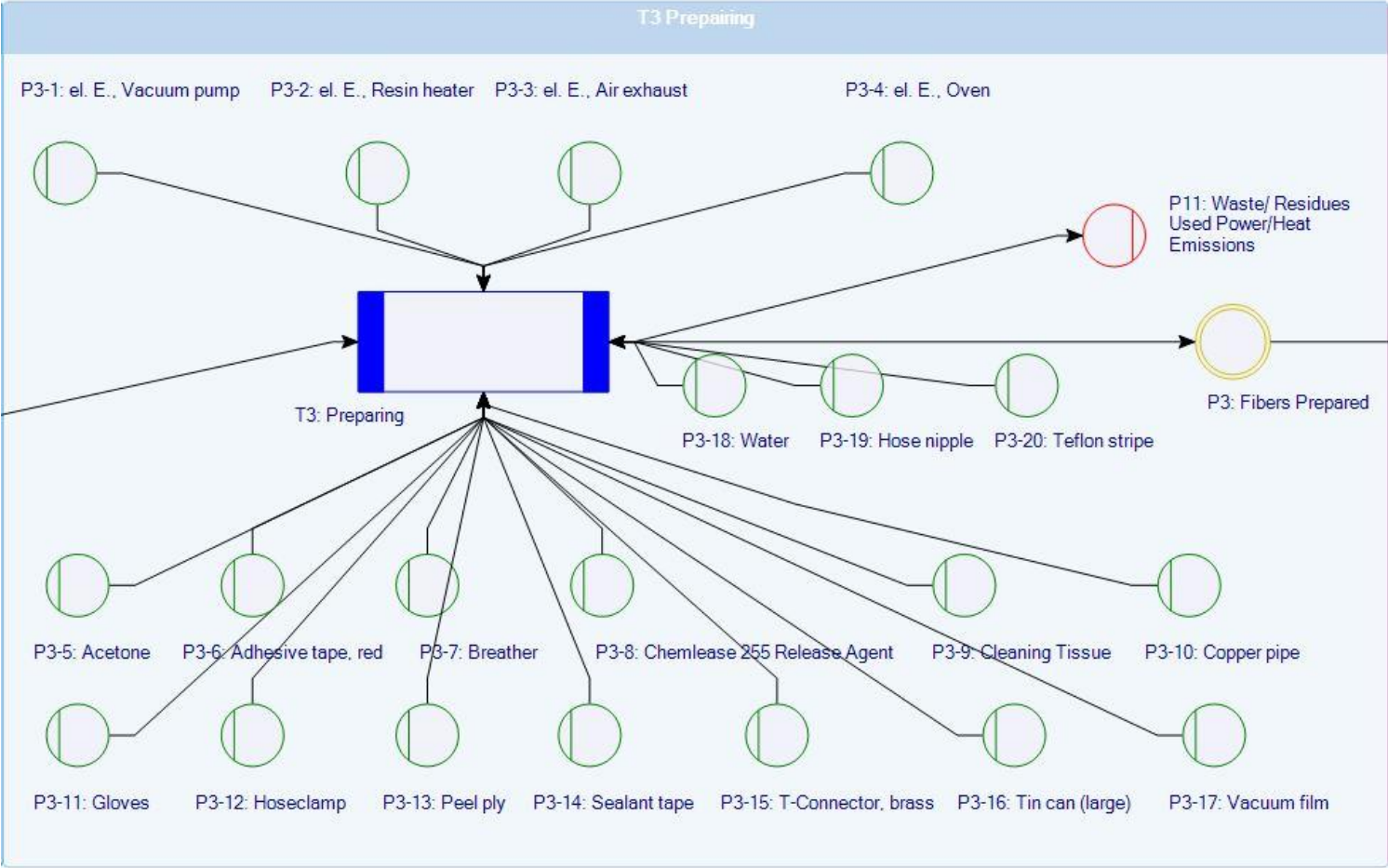
VI.X Darstellung Grund- und Referenzmodell: TP 1 Cutting



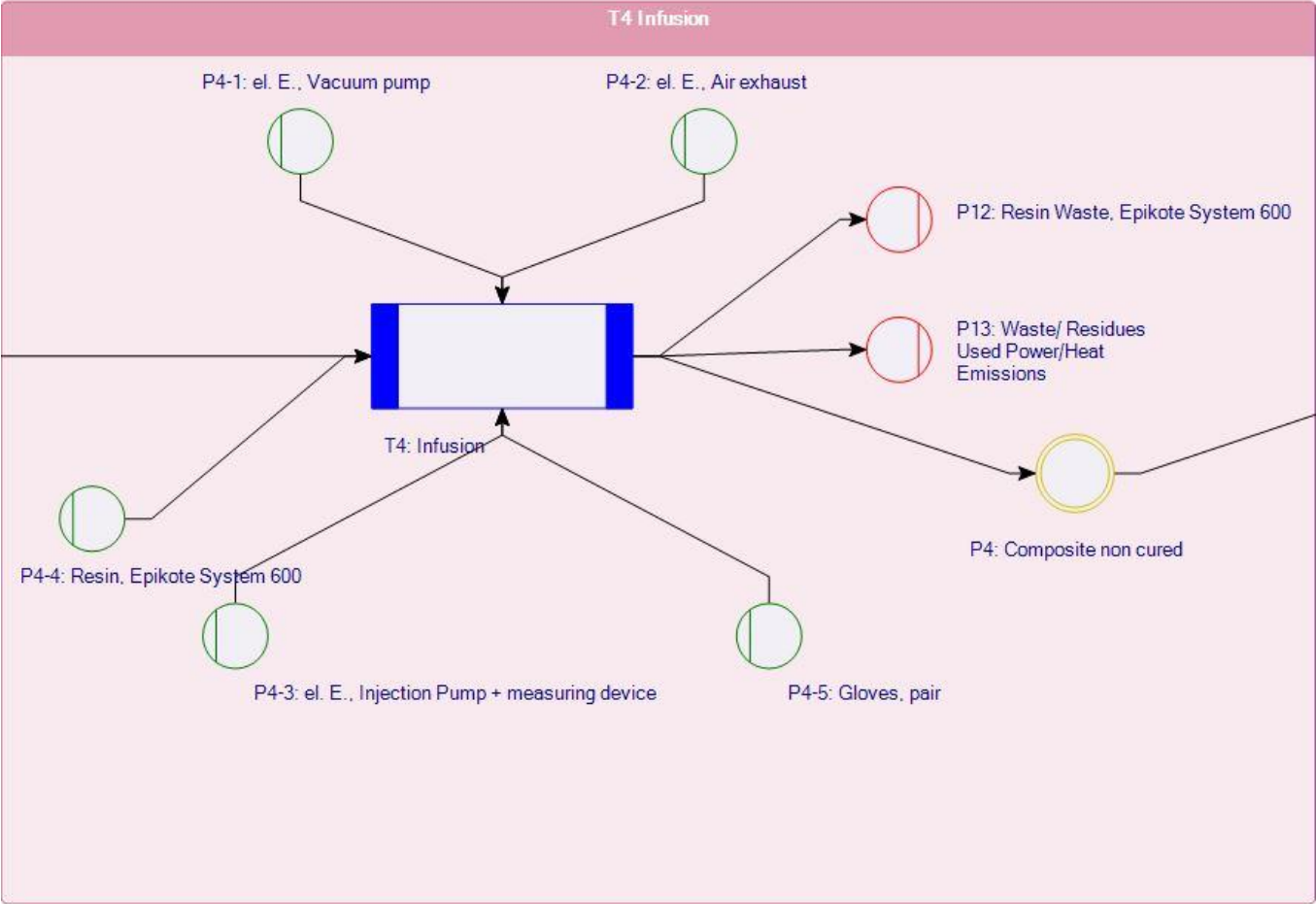
VI.XI Darstellung Grund- und Referenzmodell: TP 2 Preforming



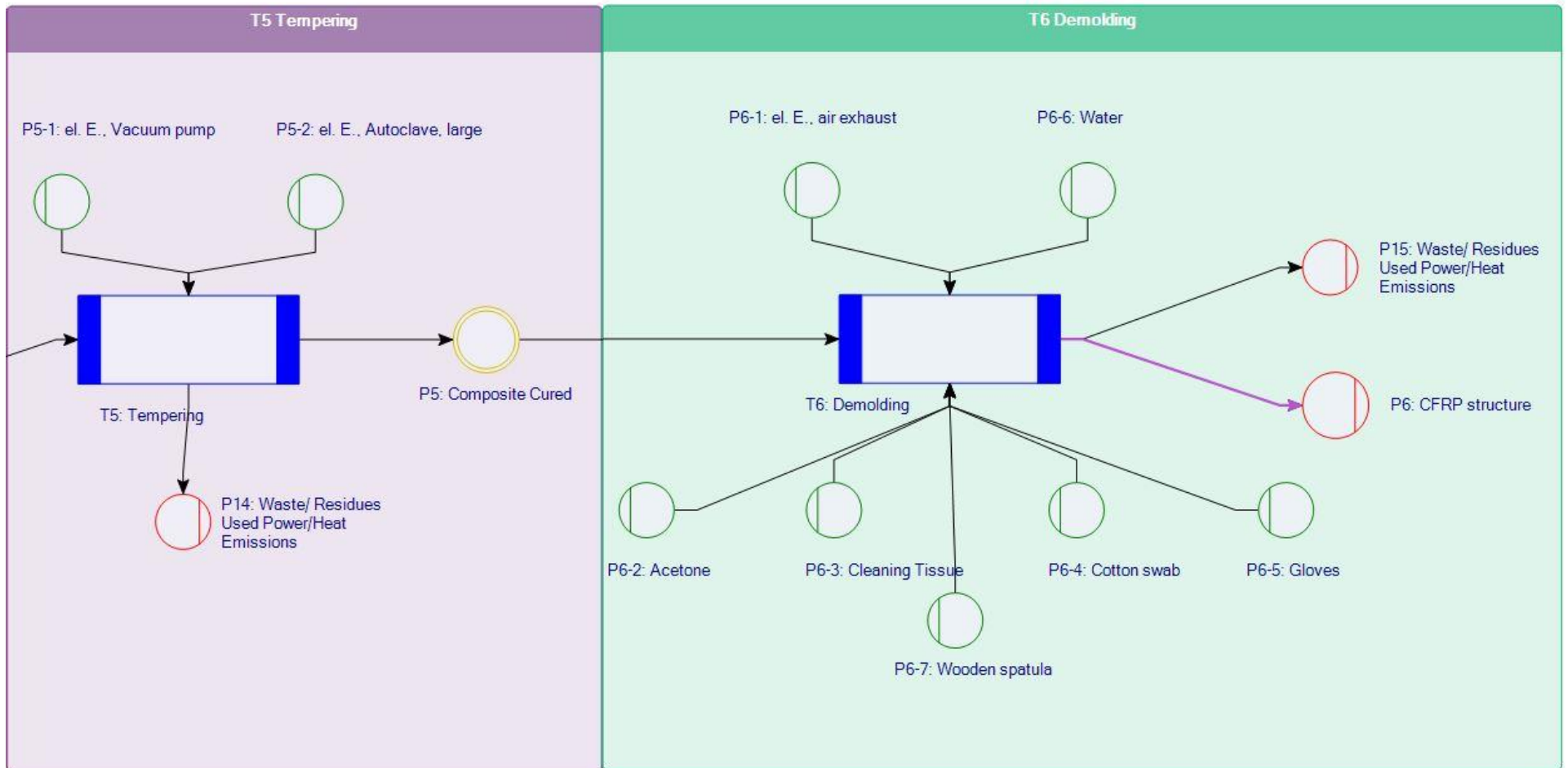
VI.XII Darstellung Grund- und Referenzmodell: TP 3 Preparing



VI.XIII Darstellung Grund- und Referenzmodell: TP 4 Infusion



VI.XIV Darstellung Grund- und Referenzmodell: TP 5 Tempering & TP 6 Demolding



VI.XV UDF des Grund- und Referenzmodells

Nachfolgend alle benutzerdefinierten Funktionen des Grund- & Referenzmodells von TP1-TP6

:: Edit User Defined Functions T1 Cutting Process

; all variables defined manually and set as fix values (constant values) for this process
; referring to source with recorded & assumed values for sli-production of a crfp- wing rib

; Inputs X:

; (whole input) Fiber, Bi-Diagonal X02= 10,5 [m²]

X02=10.5

; (whole input) Fiber, Triaxial X03= 10,5 [m²]

X03=10.5

; el. E., Cutter X00= 0,2 [kWh]

X00=0.2

; el. E., Cutting computer X01= 10 [kWh]

X01=10

; Cotton gloves, pair X04=2 [amount unit]

X04=2

; Cutting paper X05= 27 [m²]

X05=27

; Outputs Y:

; Fiber Waste, Bi-Diagonal Y02= 3,5 [m²]

Y02=3.5

; Fiber Waste, Triaxial X03= 3,5 [m²]

Y03=3.5

; Fiber Cut, Bi-Diagonal Y05= 7 [m²]

Y05=7

; Fiber Cut, Triaxial Y06= 7 [m²]

Y06=7

; W_cotton gloves, pair Y07= Input X04

Y07=X04

; W_Cutting paper Y08= Input X05

Y08=X05

; Used Power/heat Y09= sum of inputs of el. E (X00+X01)

Y09=X00+X01

:: Edit User Defined Functions T2 Preforming Process

; all variables defined manually and set as fix values (constant values) for this process
 ; referring to source with recorded & assumed values for sli-production of a crfp- wing rib

;Inputs X:

; Fiber Cut, Bi-Diagonal X07= 7 [m²]

X07=7

; Fiber Cut, Triaxial X08= 7 [m²]

X08=7

; el. E., Hot air blower X02= 5 [kWh]

X02=5

; el. E., Vacuum pump X03= 3 [kWh]

X03=3

; Adhesive tape,red X04= 8 [m]

X04=8

; Cotton gloves, pair X05= 4 [amount unit]

X05=4

; Release film X06= 1,5 [m²]

X06=1.5

;Outputs Y:

; Fibers Preformed Y00= 7 [kg] // with mass per unit ($7 \text{ m}^2 * 0,4 \text{ kg/m}^2 + 7 \text{ m}^2 * 0,6 \text{ kg/m}^2 = 7 \text{ kg}$)

Y00=7

; Used Power/heat Y01= sum of inputs of el. E (X02+X03)

Y01=X02+X03

; W_cotton gloves, pair Y02= Input X05

Y02=X05

; W_Release film Y03= Input X06

Y03=X06

; W_Adhesive tape, red Y04= Input X04

Y04=X04

:: Edit User Defined Functions T3 Preparing Process

; all variables defined manually and set as fix values (constant values) for this process
 ; referring to source with recorded & assumed values for sli-production of a crfp- wing rib

;Inputs X:

; Fibers Preformed X23= 7 [kg]

X23=7

; el. E., Vacuum pump X02= 1 [kWh]

X02=1

; el. E., Resin heater X03= 0,5 [kWh]

X03=0.5

; el. E., Air exhaust X04= 0,5 [kWh]
X04=0.5
; el. E., Oven X05= 4 [kWh]
X05=4
; Acetone X06= 0,5 [l]
X06=0.5
; Adhesive tape, red X07= 1 [m]
X07=1
; Breather X08= 0,1 [m²]
X08=0.1
; Chemlease 255 Release Agent X09= 0,1 [l]
X09=0.1
; Cleaning Tissue X10= 20 [amount unit]
X10=20
; Copper pipe X11= 4,5 [m]
X11=4.5
; Gloves, pair X12= 4 [amount unit]
X12=4
; Hoseclamp X13= 16 [amount unit]
X13=16
; Peel ply X14= 4 [m²]
X14=4
; Sealant tape X15= 15 [m]
X15=15
; T-Connector, brass X16= 1 [amount unit]
X16=1
; Tin can (large) X17= 2 [amount unit]
X17=2
; Vacuum film X18= 7 [m²]
X18=7
; Hose nipple X19= 2 [amount unit]
X19=2
; Teflon stripe X20= 0,5 [m]
X20=0.5
; Water X22= 0,01 [m³]
X22=0.01

;Outputs Y:

; Fibers Prepared Y00= Input X23
Y00=X23
; Used Power/heat Y01= sum of inputs of el. E (X02+X03+X04+X05)
Y01=X02+X03+X04+X05

```

; W_Acetone Y02= Input X06
Y02=X06
; W_Adhesive tape, red Y03= Input X07
Y03=X07
; W_Breather Y04= Input X08
Y04=X08
; W_Chemlease 255 Release Agent Y05= Input X09
Y05=X09
; W_Cleaning Tissue Y06= Input X10
Y06=X10
; W_Copper Pipe Y07= Input X11
Y07=X11
; W_Gloves, pair Y08= Input X12
Y08=X12
; W_Hoseclamp Y09= Input X13
Y09=X13
; W_Sealant Tape Y10= Input X14
Y10=X15
; W_Peel Ply Y11= Input X14
Y11=X14
; W_T-Connector, brass Y12= Input X16
Y12=X16
; W_Tin can (large) Y13= Input X17
Y13=X17
; W_Vacuum film Y14= Input X18
Y14=X18
; W_Water Y15= Input X22
Y15=X22
; W_Hose nipple Y16= Input X19
Y16=X19
; W_Teflon stripe Y17= Input X20
Y17=X20

```

; Edit User Defined Functions T4 Infusion Process

; all variables defined manually and set as fix values (constant values) for this process
; referring to source with recorded & assumed values for sli-production of a crfp- wing rib

;Inputs X:

```

; Fibers Prepared X09= 7 [kg]
X09=7
; (whole input) Resin, Epikote System 600 X08= 4,5 [kg]
X08=4.5

```

; el. E., Vacuum pump X06= 1 [kWh]
 X06=1
 ; el. E., Air exhaust X02= 0,5 [kWh]
 X02=0.5
 ; el. E., Injection pump + measuring device X07= 1 [kWh]
 X07=1
 ; Gloves, pair X04= 2 [amount unit]
 X04=2

;Outputs Y:

; Resin Waste, Epikote System 600 Y01= 1,5 [kg]
 Y01=1.5
 ; Composite non cured Y00= 10 [kg] (Fibers + Resin – Resin Waste)
 Y00=10
 ; Used Power/heat Y02= sum of inputs of el. E (X02+X06+X07)
 Y02=X02+X06+X07
 ; W_Gloves, pair Y03= Input X04
 Y03=X04

; Edit User Defined Functions T5 Tempering Process

; all variables defined manually and set as fix values (constant values) for this process
 ; referring to source with recorded & assumed values for sli-production of a crfp- wing rib

;Inputs X:

; Composites non cured X00= 10 [kg]
 X00=10
 ; el. E., Vacuum pump X01= 3 [kWh]
 X01=3
 ; el. E., Autoclave, large X02= 270 [kWh]
 X02=270

;Outputs Y:

; Composite cured Y02= Input X00
 Y02=X00
 ; Power/heat Y03= sum of inputs of el. E (X01+X02)
 Y03=X01+X02

; Edit User Defined Functions T6 Demolding Process

; all variables defined manually and set as fix values (constant values) for this process
; referring to source with recorded & assumed values for sli-production of a crfp- wing rib

;Inputs X:

; Composite cured X00= 10 [kg]
X00=10
; el. E., Air exhaust X01= 1 [kWh]
X01=1
; Water X02= 0,005 [m³]
X02=0.005
; Acetone X03= 0,5 [l]
X03=0.5
; Cleaning Tissue X04= 30 [amount unit]
X04=30
; Cotton Swab X05= 2 [amount unit]
X05=2
; Gloves, pair X06= 4 [amount unit]
X06=4
; Wooden spatula X07= 2 [amount unit]
X07=2

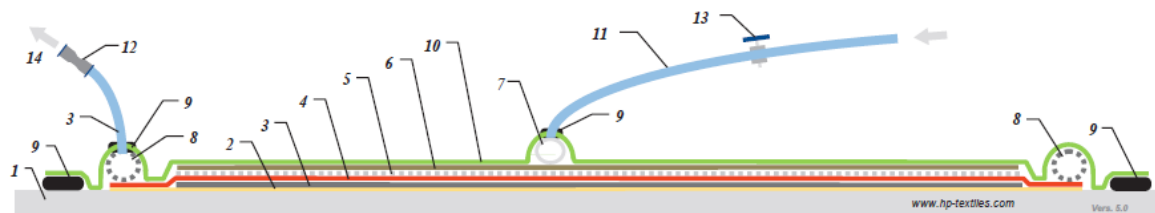
;Outputs Y:

; calculated Output CFRP structure Y00= Input X00
Y00=X00
; calculated Output Used Power/heat Y01= sum of inputs of el. E (X01)
Y01=X01
; W_Acetone Y02= Input X03
Y02=X03
; W_Cleaning Tissue Y03= Input X04
Y03=X04
; W_Gloves, pair Y04= Input X06
Y04=X06
; W_Cotton Swab Y05= Input X05
Y05=X05
; W_Water Y06= Input X02
Y06=X02
; W_Wooden spatula Y07= Input X07
Y07=X07

VI.XVI Übersicht Aufbau und verwendete Materialien bei einer Vakuuminfusion

Quelle: ohne Verfasser; Internetseite der Firma HP-Textiles GmbH; Letzter Zugriff: 20.10.2015

Link: http://www.hp-textiles.com/arbeitsanleitungen/aa_Vakuuminfusion.pdf



Bezeichnung	Material / Bemerkungen	Artikel
1 - Form		
2 - Trennmittel	wässrig, bis 150°C (kurzzeitig bis 200°C) Grundierwachs und PVA, bis 100°C Carnaubawachs, bis 80°C	HP-HGR5 HP-G und HP-PVA HP-CX7
3 - Verstärkungsfasern	diverse Typen	
4 - Abreißgewebe	Polyamid, Köper / Leinwand, div. Breiten	HP-P83P o. HP-T105P
5 - Lochfolie	HDPE, 30g/m ²	HP-RF25/110
6 - Fließhilfe	PE 145g/m ² , Breite 100cm	HP-IM145/100
7 - Fließkanal	PE-Spiralschlauch	HP-ST060, HP-ST080 o. HP-ST100
8 - Vakuumschlauch	MTI [®] -Leitung	HP-MTI-08
9 - Vakuumdichtband	Butylkautschuk, Einsatz bis 80°C	HP-ST12X3/80
10 - Vakuumdichtfolie	PA/PE/PA, Breite 2,60m PA/PE/PA als Schlauch, Breite 1,50m	HP-VF60/260 HP-VFT75/150
11 - Vakuumschläuche	PE (bes. preiswert), 10 bzw. 12mm PUR (bes. flexibel), 10 bzw. 12mm	HP-VZ1010, bzw. HP-VZ1020 HP-VZ1030, bzw. HP-VZ1040
12 - Steckverbinder	diverse Typen, Manometer, Ventile, usw...	
13 - Squeezeer [®] / Squeezer [®]	Schlauchklemmen	HP-VZ1400, bzw. HP-VZ1450
14 - Vakuumpumpe	Drehschieberpumpe, ölgeschmiert, 4m ³ /h (weitere Typen verfügbar)	HP-VZ1200

VI.XVII Verwendete Vorketten & Vergleich der CO₂-Äquivalente: TP 1 Cutting

Factor	Assumed value	Mass/ Unit	CO ₂ -Eq. Referenzmodell [kg CO ₂ /unit]	Umberto-model for substituted factor	Value in Umberto	CO ₂ -Eq. Vorkettenmodell [kg CO ₂ /unit]
Equipment & Tools						
Cutting computer (el. E.)	0,2 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	0,2 kWh	0,66 kg/kWh
Cutter (el. E.)	10 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	10 kWh	0,66 kg/kWh
Fiber (Input = use + waste)						
Bi-Diagonal	10,5 m ² (use 7)	0,400 kg/m ²	50 kg/kg	Carbon fiber (CF; from PAN; [...]), DE, result, GaBi 2014; GaBi external database VII - Plastics	4,2 kg (use 2,8)	20,12 kg/kg
Triaxial	10,5 m ² (use 7)	0,600 kg/m ²	50 kg/kg		6,3 (use 4,2)	20,12 kg/kg
Fiber Waste						
Bi-Diagonal	3,5 m ²	0,400 kg/m ²	50 kg/kg	-	1,4 kg	20,12 kg/kg
Triaxial	3,5 m ²	0,600 kg/m ²	50 kg/kg		2,1 kg	20,12 kg/kg
Supplies						
Cotton gloves	2 pairs	0,403 kg/pair	2,20 kg/kg	textile production, woven cotton [GLO]	0,8 kg	24,82 kg/kg
Cutting paper	27 m ²	0,080 kg/m ²	2,42 kg/kg	kraft paper production, unbleached [RER]	2,16 kg	0,99 kg/kg

VI.XVIII **Verwendete Vorketten & Vergleich der CO₂-Äquivalente: TP 2 Preforming**

Factor	Assumed value	Mass/ Unit	CO ₂ -Eq. Referenzmodell [kg CO ₂ /unit]	Umberto-model for substituted factor	Value in Umberto	CO ₂ -Eq. Vorkettenmodell [kg CO ₂ /unit]
Equipment & Tools						
Hot air blower (el. E.)	5 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	5 kWh	0,66 kg/kWh
Vacuum pump (el. E.)	3 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	3 kWh	0,66 kg/kWh
Supplies						
Adhesive tape, red	8 m	0,055 kg/m	2,70 kg/kg	polyvinylchloride production, bulk polymerization [RER]	0,44 kg	2,07 kg/kg
Cotton gloves	4 pairs	0,403 kg/pair	2,20 kg/kg	textile production, woven cotton [GLO]	1,6 kg	24,82 kg/kg
Release film	1,5 m ²	0,088 kg/m ²	2,67 kg/kg	packaging film production, low density polyethylene [RER]	0,132 kg	2,82 kg/kg

VI.XIX Verwendete Vorketten & Vergleich der CO₂-Äquivalente: TP 3 Preparing

Factor	Assumed value	Mass/ Unit	CO ₂ -Eq. Referenzmodell [kg CO ₂ /unit]	Umberto-model for substituted factor	Value in Umberto	CO ₂ -Eq. Vorkettenmodell [kg CO ₂ /unit]
Equipment & Tools						
Vacuum pump (el. E.)	1 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	1 kWh	0,66 kg/kWh
Resin heater (el. E.)	0,5 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	0,5 kWh	0,66 kg/kWh
Air exhaust (el. E.)	0,5 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	0,5 kWh	0,66 kg/kWh
Oven (el. E.)	4 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	4 kWh	0,66 kg/kWh
Supplies						
Acetone	0,5 l	0,785 kg/l	2,19 kg/kg	acetone production, liquid [RER]	0,3925 kg	2,23 kg/kg
Adhesive tape, red	1 m	0,055 kg/m	2,70 kg/kg	polyvinylchloride production, bulk polymerization [RER]	0,055 kg	2,07 kg/kg
Breather	0,1 m ²	0,150 kg/m ²	4,93 kg/kg	polyester-complexed starch biopolymer production [RER]	0,015 kg	1,87 kg/kg
Chemlease 255 Release Agent	0,1 l	0,770 kg/l	-	methylcyclohexane production [RER]	0,077 kg	4,68 kg/kg
Cleaning Tissue	20 sheets	0,005 kg/sheet	2,42 kg/kg	tissue paper production [RER]	0,1 kg	0,61 kg/kg

Copper Pipe	4,5 m	0,2kg/m	3,30 kg/kg	metal working, average for copper product manufacturing [RER]	0,9 kg	2,84 kg/kg
Gloves	4 pairs	0,028 kg/pair	1,63 kg/kg	nitrile-compound production [RER]	0,112 kg	11,32 kg/kg
Hoseclamp	16 pieces	0,002 kg/piece	1,77 kg/kg	metal working, average for steel product manufacturing [RER]	0,032 kg	2,09 kg/kg
Peel Ply	4 m ²	0,095 kg/m ²	7,90 kg/kg	nylon 6 production [RER]	0,38 kg	9,28 kg/kg
Sealant Tape	15 m	0,060 kg/m	7,50 kg/kg	synthetic rubber production [RER]	0,9 kg	2,82 kg/kg
T-Connector, brass	1 piece	0,030 kg/piece	3,83 kg/kg	metal working, average for copper product manufacturing [RER]	0,03 kg	2,84 kg/kg
Tin can (large)	2 pieces	0,313 kg/piece	1,77 kg/kg	metal working, average for steel product manufacturing [RER]	0,626 kg	2,09 kg/kg
Vacuum film	7 m ²	0,074 kg/m ²	2,40 kg/kg	packaging film production, low density polyethylene [RER]	0,518 kg	2,82 kg/kg
Water	0,01 m ³	0,001 kg/m ³	0,04 kg/kg	market for tap water [Europe without Switzerland]	1E-05 kg	4,06E-04 kg/kg
Hose nipple	2 pieces	0,020 kg/piece	3,83 kg/kg	metal working, average for copper product manufacturing [RER]	0,04 kg	2,84 kg/kg
Teflon stripe	0,5 m	0,001 kg/m	7,40 kg/kg	tetrafluorethylene production [RER]	0,0005 kg	324,50 kg/kg

VI.XX Verwendete Vorketten & Vergleich der CO₂-Äquivalente: TP 4 Infusion

Factor	Assumed value	Mass/ Unit	CO ₂ -Eq. Referenzmodell [kg CO ₂ /unit]	Umberto-model for substituted factor	Value in Umberto	CO ₂ -Eq. Vorkettenmodell [kg CO ₂ /unit]
Equipment & Tools						
Vacuum pump (el. E.)	1 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	1 kWh	0,66 kg/kWh
Air exhaust (el. E.)	0,5 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	0,5 kWh	0,66 kg/kWh
Injection pump + measuring device	1 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	1 kWh	0,66 kg/kWh
Resin (Input = use + waste)						
Epikote System 600	4,5 kg	1,000 kg/kg	6,68 kg/kg	epoxy resin production, liquid [RER]	4,5 kg	6,73 kg/kg
Resin Waste						
Epikote System 600	1,5 kg	1,000 kg/kg	6,68 kg/kg	-	1,5 kg	6,68 kg/kg
Supplies						
Gloves	2 pairs	0,028 kg/pair	1,63 kg/kg	nitrile-compound production [RER]	0,056 kg	11,32 kg/kg

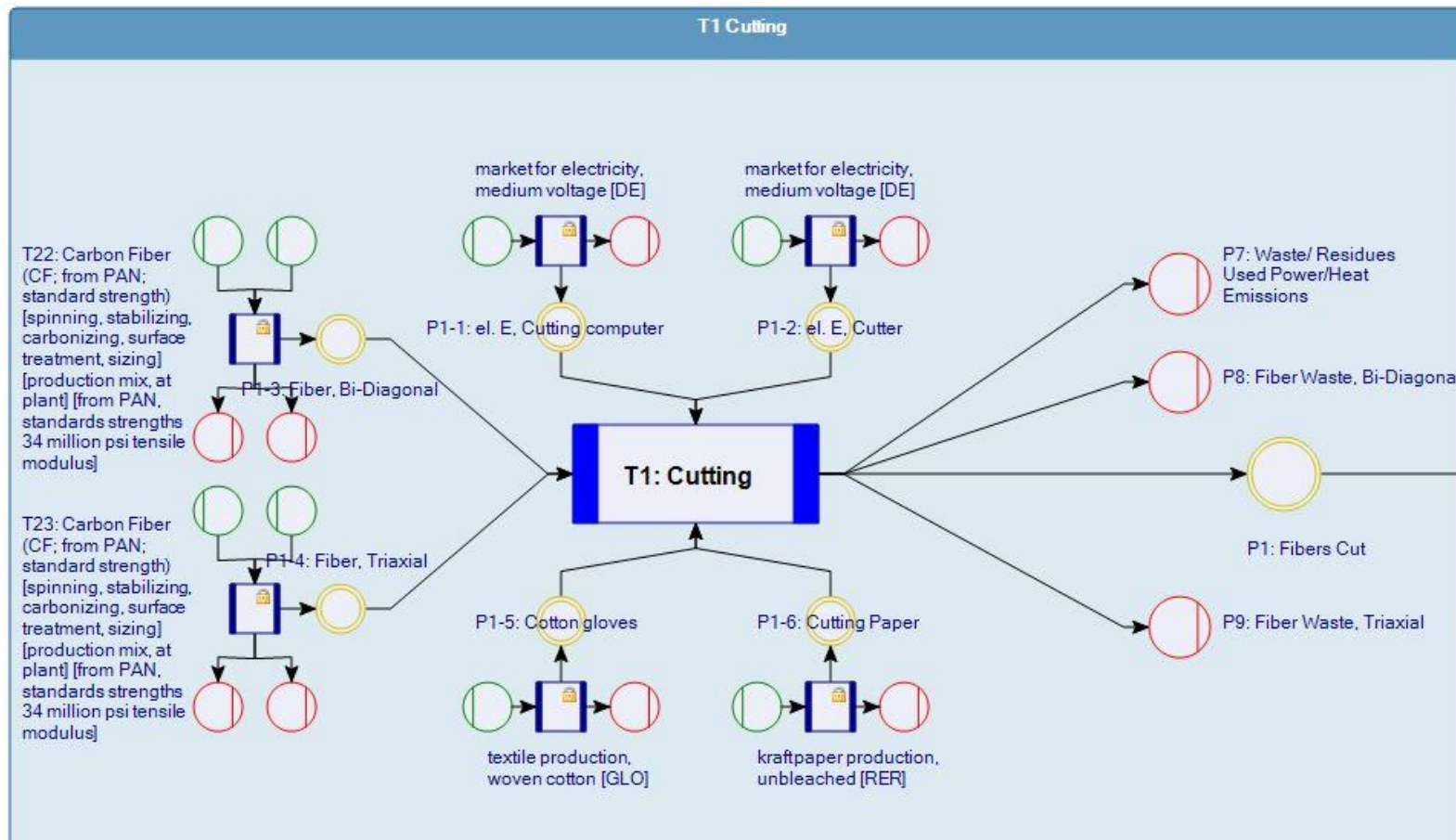
VI.XXI **Verwendete Vorketten & Vergleich der CO₂-Äquivalente: TP 5 Tempering**

Factor	Assumed value	Mass/ Unit	CO ₂ -Eq. Referenzmodell [kg CO ₂ /unit]	Umberto-model for substituted factor	Value in Umberto	CO ₂ -Eq. Vorkettenmodell [kg CO ₂ /unit]
Equipment & Tools						
Vacuum pump (el. E.)	3 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	3 kWh	0,66 kg/kWh
Autoclave, large (el. E.)	270 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	270 kWh	0,66 kg/kWh

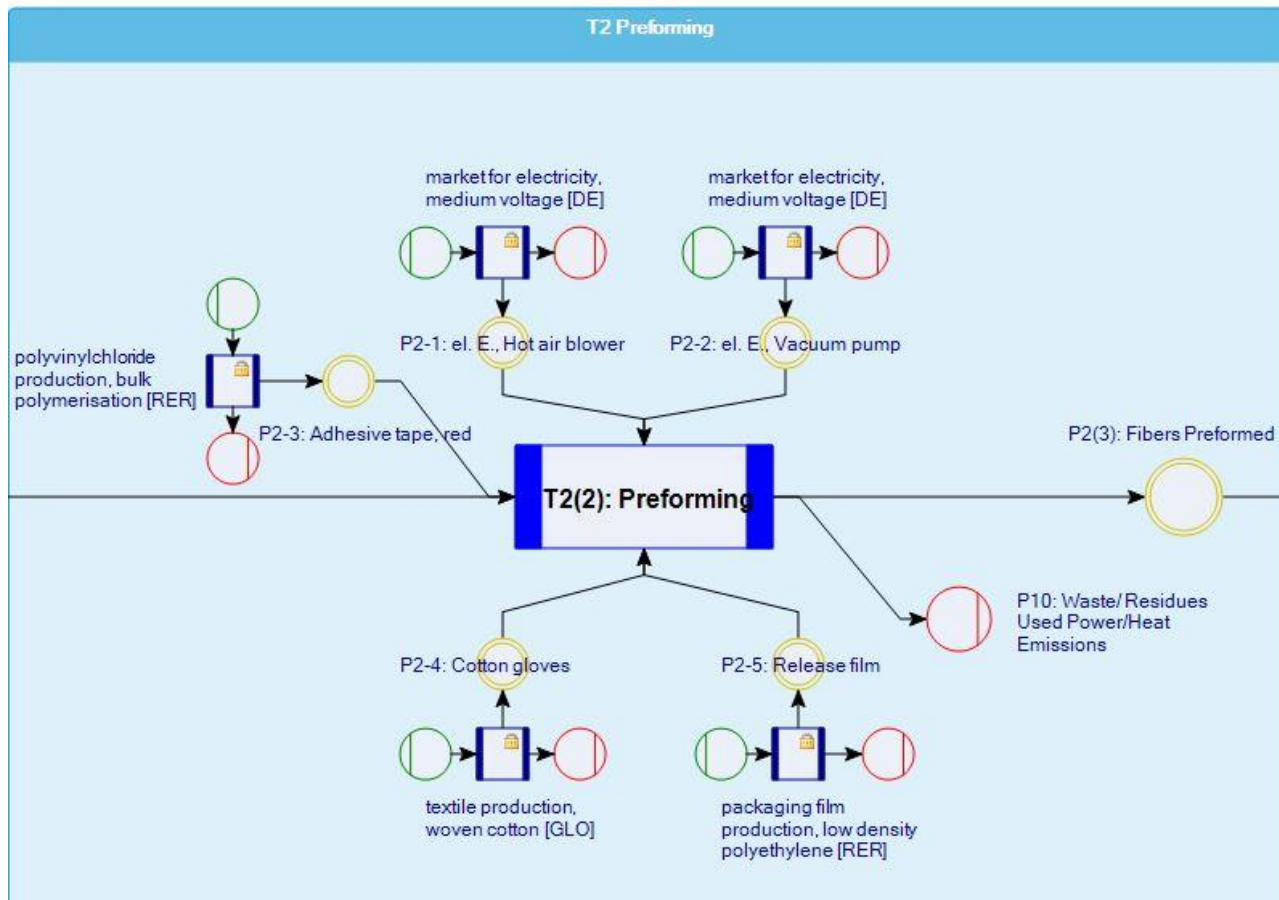
VI.XXII **Verwendete Vorketten & Vergleich der CO₂-Äquivalente: TP 6 Demolding**

Factor	Assumed value	Mass/ Unit	CO ₂ -Eq. Referenzmodell [kg CO ₂ /unit]	Umberto-model for substituted factor	Value in Umberto	CO ₂ -Eq. Vorkettenmodell [kg CO ₂ /unit]
Equipment & Tools						
Air exhaust (el. E.)	1 kWh	-	0,617 kg/kWh	market for electricity, medium voltage [DE]	1 kWh	0,66 kg/kWh
Supplies						
Acetone	0,5 l	0,785 kg/l	2,19 kg/kg	acetone production, liquid [RER]	0,3925 kg	2,23 kg/kg
Cleaning Tissue	30 sheets	0,005 kg/sheet	2,42 kg/kg	tissue paper production [RER]	0,15 kg	0,61 kg/kg
Cotton swab	2 pieces	0,001 kg/piece	2,20 kg/kg	textile production, woven cotton [GLO]	0,002 kg	24,82 kg/kg
Gloves	4 pairs	0,028 kg/pair	1,63 kg/kg	nitrile-compound production [RER]	0,112 kg	11,32 kg/kg
Water	0,005 m ³	0,001 kg/m ³	0,04 kg/kg	market for tap water [Europe without Switzerland]	5E-06 kg	4,06E-04 kg/kg
Wooden spatula	2 pieces	0,012 kg/piece	0,46 kg/kg	solid unbleached board production [RER]	0,024 kg	1,04 kg/kg

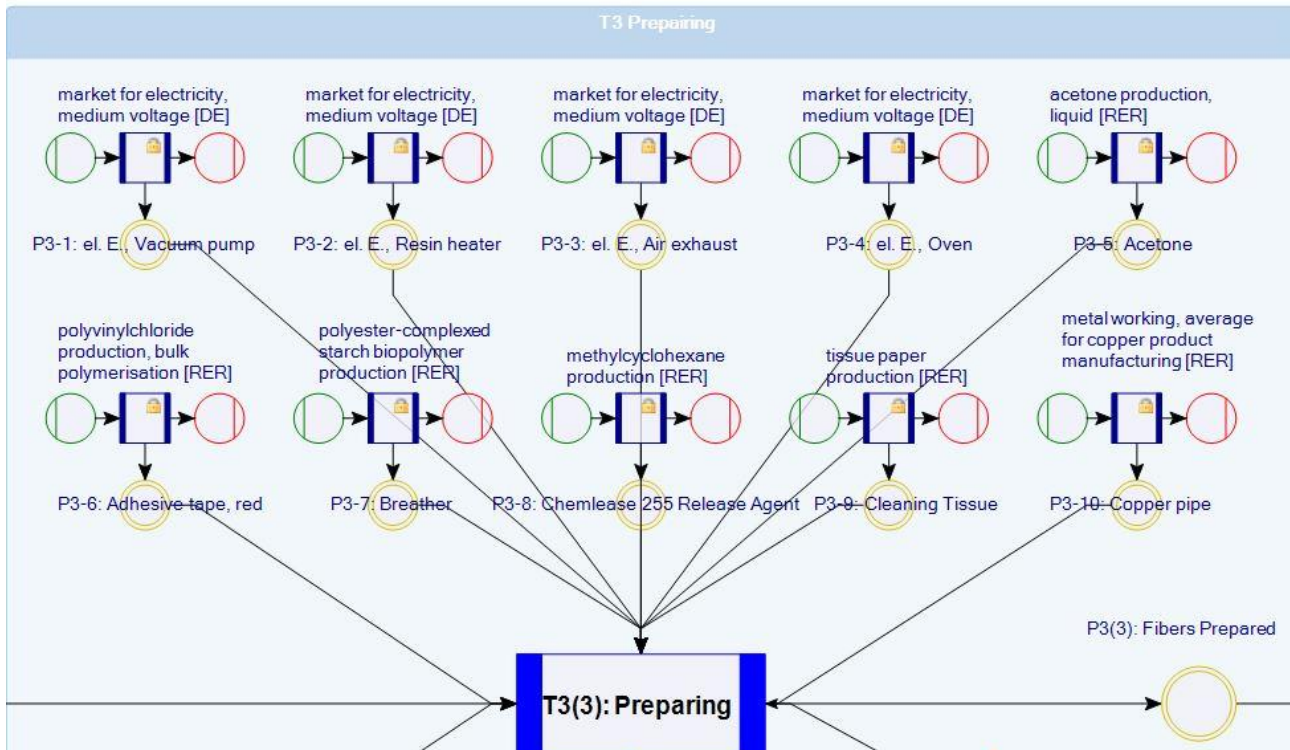
VI.XXIII Darstellung Vorkettenmodell: TP 1 Cutting



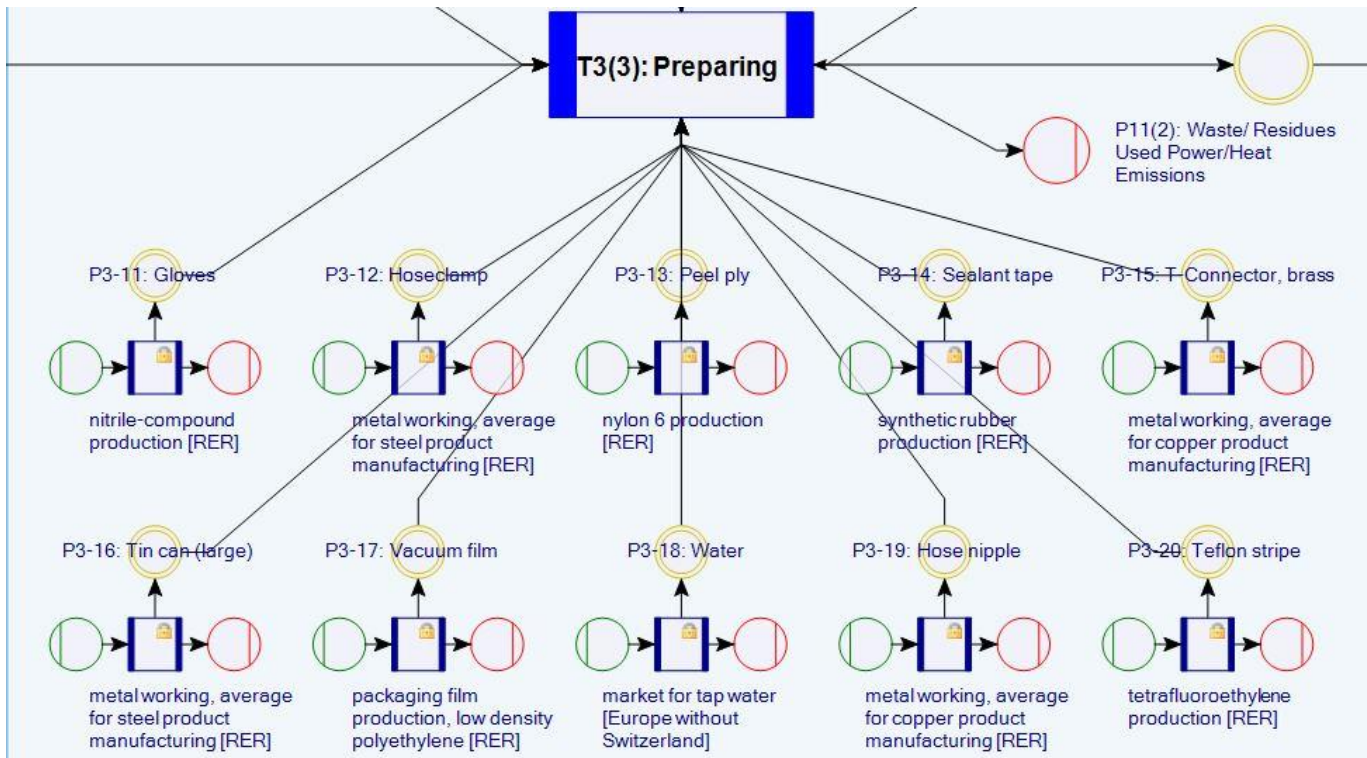
VI.XXIV Darstellung Vorkettenmodell: TP 2 Preforming



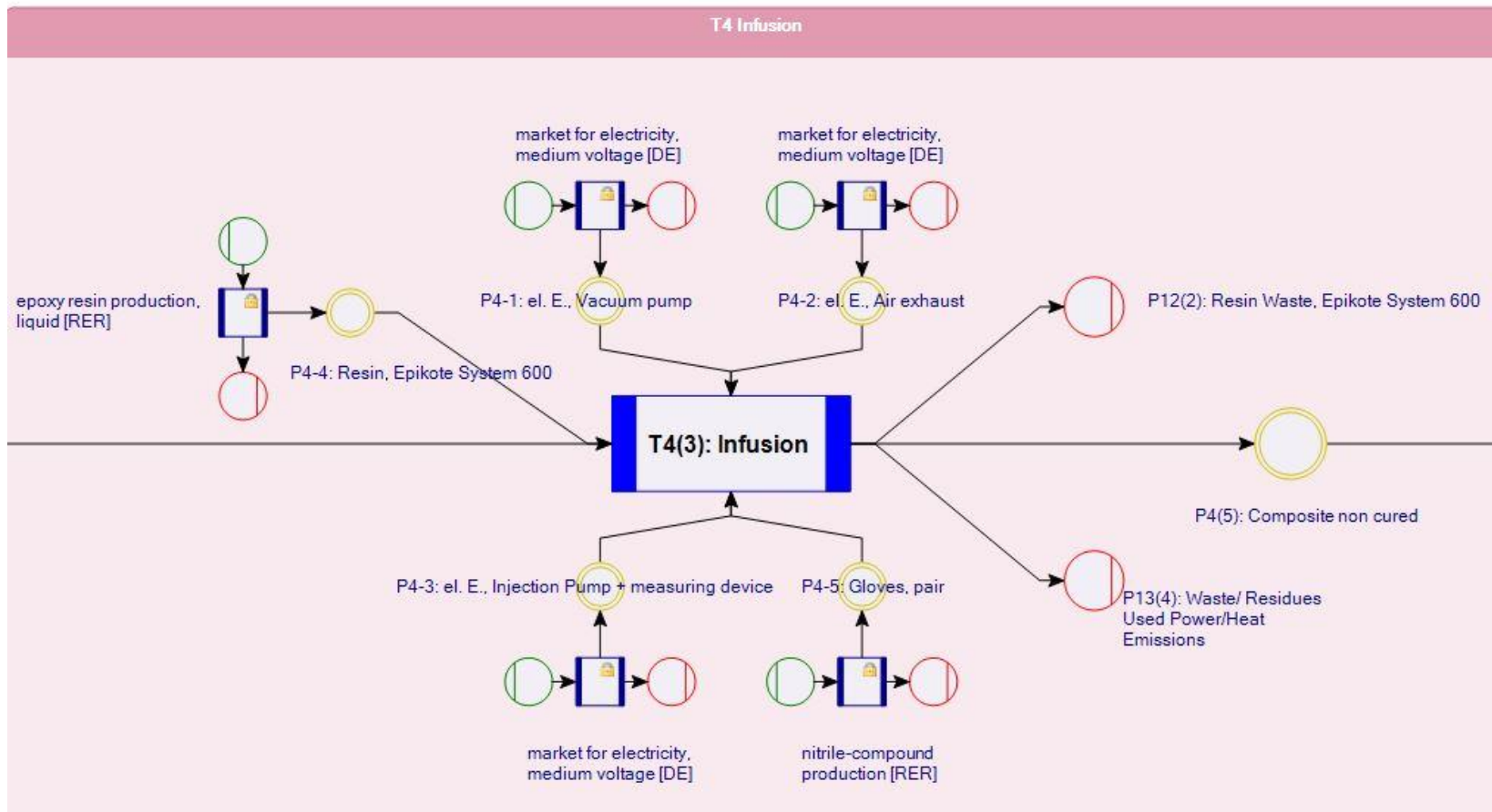
VI.XXV Darstellung Vorkettenmodell: TP 3 Preparing – Oberer Ausschnitt



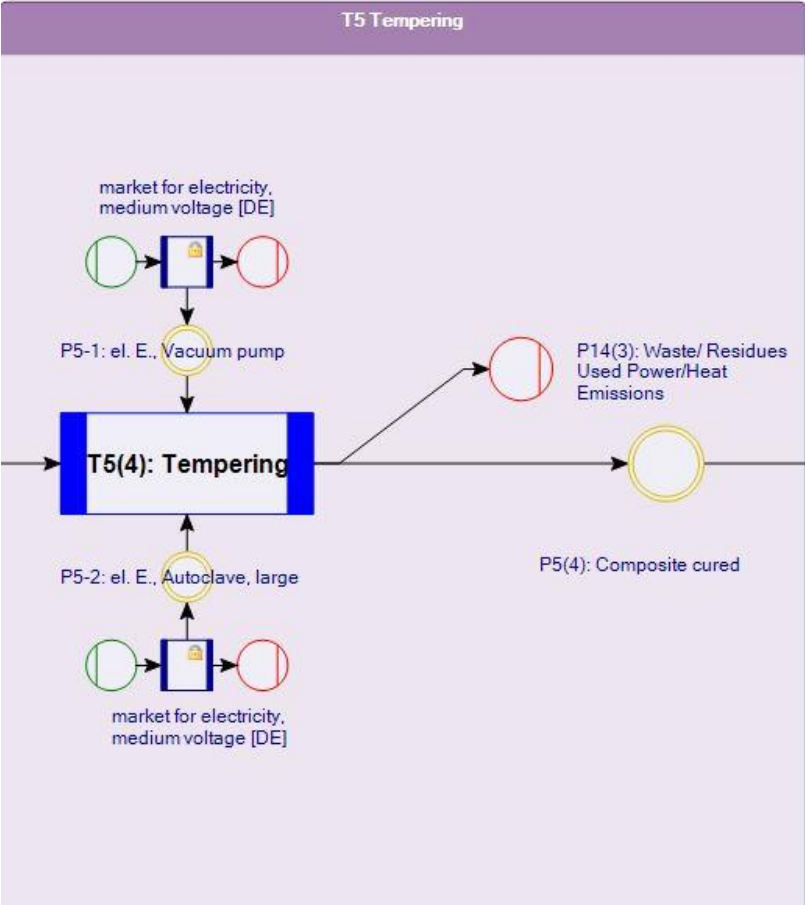
VI.XXVI Darstellung Vorkettenmodell: TP 3 Preparing – Unterer Ausschnitt



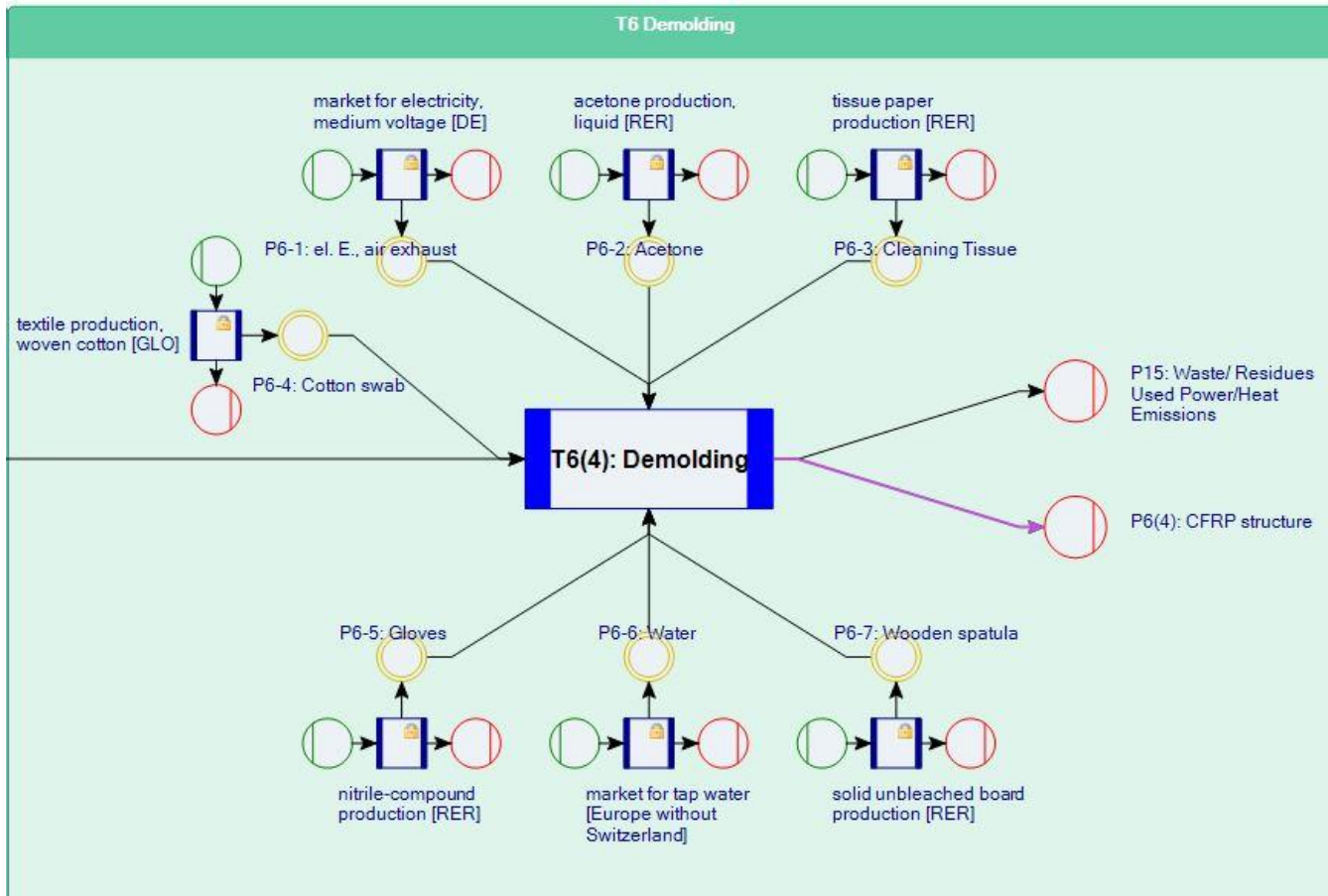
VI.XXVII Darstellung Vorkettenmodell: TP 4 Infusion



VI.XXVIII Darstellung Vorkettenmodell: TP 5 Tempering



VI.XXIX Darstellung Vorkettenmodell: TP 6 Demolding



VI.XXX UDF des Vorkettenmodells

:: Edit User Defined Functions T1 Cutting Process

; Inputs X:

; (whole input) Fiber, Bi-Diagonal X00= 4,2 [kg] (= 10,5 m² of fiber textile with 0,4 kg/m²)
 X00=4.2
 ; (whole input) Fiber, Triaxial X01= 6,3 [kg] (= 10,5 m² of fiber textile with 0,6 kg/m²)
 X01=6.3
 ; el. E., Cutting computer replaced by electricity, medium voltage X02= 0,2 [kWh]
 X02=0.2
 ; el. E., Cutter replaced by electricity, medium voltage X03= 10 [kWh]
 X03=10
 ; Cotton gloves, pair replaced by textile, woven cotton X04= 0,8 [kg]
 X04=0.8
 ; Cutting paper replaced by kraft paper, unbleached X05= 2,16 [kg]
 X05=2.16

; Outputs Y:

; Fiber Cut, Bi-Diagonal Y00= 7 [m²] (whole input 10,5 m²; use 7 m²)
 Y00=7
 ; Fiber Cut, Triaxial Y01= 7 [m²] (whole input 10,5 m²; use 7 m²)
 Y01=7
 ; Fiber Waste, Bi-Diagonal Y02= 3,5 [m²] (whole input 10,5 m²; waste 3,5 m²)
 Y02=3.5
 ; Fiber Waste, Triaxial X03= 3,5 [m²] (whole input 10,5 m²; waste 3,5 m²)
 Y03=3.5
 ; Used Power/heat Y04= sum of inputs of el. E (X02+X03)
 Y04=X02+X03
 ; W_cotton gloves, pair replaced by textile, woven cotton, type bad Y05= X04
 Y05=X04
 ; W_Cutting paper replaced by kraft paper, unbleached, type bad Y06= X05
 Y06=X05

:: Edit User Defined Functions T2 Preforming Process

;Inputs X:

; Fiber Cut, Bi-Diagonal X00= 7 [m²]
 X00=7
 ; Fiber Cut, Triaxial X01= 7 [m²]
 X01=7

; el. E., Hot air blower replaced by electricity, medium voltage X02= 5 [kWh]
X02=5
; el. E., Vacuum pump replaced by electricity, medium voltage X03= 3 [kWh]
X03=3
; Adhesive tape, red replaced by polyvinylchloride, bulk polymerised X04= 0,44 [kg]
X04=0.44
; Cotton gloves, pair replaced by textile, woven cotton X05= 1,6 [kg]
X05=1.6
; Release film replaced by packaging film, low density polyethylene X06= 0,132 [kg]
X06=0.132

;Outputs Y:

; Fibers Preformed Y00= 7 [kg] // with mass per unit ($7 \text{ m}^2 * 0,4 \text{ kg/m}^2 + 7 \text{ m}^2 * 0,6 \text{ kg/m}^2 = 7 \text{ kg}$)
Y00=7
; Used Power/heat Y01= sum of inputs of el. E (X02+X03)
Y01=X02+X03
; W_Adhesive tape, red replaced by polyvinylchloride, bulk polymerised, type bad Y02=X04
Y02=X04
; W_cotton gloves, pair replaced by textile, woven cotton, type bad Y03= X05
Y03=X05
; W_Release film replaced by packaging film, low density polyethylene, type bad Y04=X06
Y04=X06

:: Edit User Defined Functions T3 Preparing Process

;Inputs X:

; Fibers Preformed X00= 7 [kg]
X00=7
; el. E., Vacuum pump replaced by electricity, medium voltage X01= 1 [kWh]
X01=1
; el. E., Resin heater replaced by electricity, medium voltage X02= 0,5 [kWh]
X02=0.5
; el. E., Air exhaust replaced by electricity, medium voltage X03= 0,5 [kWh]
X03=0.5
; el. E., Oven replaced by electricity, medium voltage X04= 4 [kWh]
X04=4
; Acetone replaced by acetone, liquid X05= 0,3925 [kg]
X05=0.3925
; Adhesive tape, red replaced by polyvinylchloride, bulk polymerised X06= 0,055 [kg]
X06=0.055
; Breather replaced by polyester-complexed starch biopolymer X07= 0,015 [kg]
X07=0.015

; Chemlease 255 Release Agent replaced by methylcyclohexane X08= 0,077 [kg]
X08=0.077

; Cleaning Tissue replaced by tissue paper X09= 0,1 [kg]
X09=0.1

; Copper pipe replaced by metal working, average for copper product manufacturing X10= 0,9 [kg]
X10=0.9

; Gloves, pair replaced by nitrile-compound X11= 0,112 [kg]
X11=0.112

; Hoseclamp replaced by metal working, average for steel product manufacturing X12= 0,032 [kg]
X12=0.032

; Peel ply replaced by nylon 6 X13= 0,38 [kg]
X13=0.38

; Sealant tape replaced by synthetic rubber X14= 0,9 [kg]
X14=0.9

; T-Connector, brass replaced by metal working, average for copper product manufacturing X15= 0,03 [kg]
X15=0.03

; Tin can (large) replaced by metal working, average for steel product manufacturing X16= 0,626 [kg]
X16=0.626

; Vacuum film replaced by packaging film, low density polyethylene X17= 0,518 [kg]
X17=0.518

; Water replaced by tap water X18= 0,00001 [kg]
X18=0.00001

; Hose nipple replaced by metal working, average for copper product manufacturing X19= 0,04 [kg]
X19=0.04

; Teflon stripe replaced by tetrafluoroethylene X20= 0,0005 [kg]
X20=0.0005

;Outputs Y:

; Fibers Prepared Y00= X00
Y00=X00

; Used Power/heat Y01= sum of inputs of el. E (X01+X02+X03+X04)
Y01=X01+X02+X03+X04

; W_Acetone replaced by acetone, liquid, type bad Y02= X05
Y02=X05

; W_Adhesive tape, red replaced by polyvinylchloride, bulk polymerised, type bad Y03= X06
Y03=X06

; W_Breather replaced by polyester-complexed starch biopolymer, type bad Y04= X07
Y04=X07

; W_Chemlease 255 Release Agent replaced by methylcyclohexane, type bad Y05= X08
Y05=X08

; W_Cleaning Tissue replaced by tissue paper Y06= X09
Y06=X09

; Y07 metal working, average for copper product manufacturing, type bad represents a sum of copper waste (X10+X15+X19)
Y07=X10+X15+X19

; W_Gloves, pair replaced by nitrile-compound, type bad Y08= X11
Y08=X11

; Y09 metal working, average for steel product manufacturing, type bad represents a sum of steel waste (X12+X16)
Y09=X12+X16

; W_Peel Ply replaced by nylon 6,type bad Y10= X13
Y10=X13

; W_Sealant Tape replaced by synthetic rubber, type bad Y11= X14
Y11=X14

; W_Vacuum film replaced by packaging film, low density polyethylene, type bad Y12= X17
Y12=X17

; W_Water replaced by tap water, type bad Y13= Input X18
Y13=X18

; W_Teflon stripe replaced by tetrafluoroethylene, type bad Y14= Input X20
Y14=X20

: Edit User Defined Functions T4 Infusion Process

;Inputs X:

; Fibers Prepared X00= 7 [kg]
X00=7

; el. E., Vacuum pump replaced by electricity, medium voltage X01= 1 [kWh]
X01=1

; el. E., Air exhaust replaced by electricity, medium voltage X02= 0,5 [kWh]
X02=0.5

; el. E., Injection pump + measuring device replaced by electricity, medium voltage X03= 1 [kWh]
X03=1

; (whole input) Resin, Epikote System 600 replaced by epoxy resin, liquid X04= 4,5 [kg]
X04=4.5

; Gloves, pair replaced by nitrile-compound X05= 0,056 [kg]
X05=0.056

;Outputs Y:

; Composite non cured Y00= 10 [kg] (7 kg fibres + 3 kg resin)
Y00=10

; Resin Waste, Epikote System 600 replaced by epoxy resin, liquid, type bad Y01= 1,5 [kg]
Y01=1.5
; Used Power/heat Y02= sum of inputs of el. E (X01+X02+X03)
Y02=X01+X02+X03
; W_Gloves, pair replaced by nitrile-compound, type bad Y03= X05
Y03=X05

; Edit User Defined Functions T5 Tempering Process

;Inputs X:

; Composites non cured X00= 10 [kg]
X00=10
; el. E., Vacuum pump replaced by electricity, medium voltage X01= 3 [kWh]
X01=3
; el. E., Autoclave, large replaced by electricity, medium voltage X02= 270 [kWh]
X02=270

;Outputs Y:

; Composite cured Y00= Input X00
Y00=X00
; Power/heat Y01= sum of inputs of el. E (X01+X02)
Y01=X01+X02

; Edit User Defined Functions T6 Demolding Process

;Inputs X:

; Composite cured X00= 10 [kg]
X00=10
; el. E., Air exhaust replaced by electricity, medium voltage X01= 1 [kWh]
X01=1
; Acetone replaced by acetone,liquid X02= 0,3925 [kg]
X02=0.3925
; Cleaning Tissue replaced by tissue paper X03= 0,15 [kg]
X03=0.15
; Cotton swab replaced by textile, woven cotton X04= 0,002 [kg]
X04=0.002
; Gloves, pair replaced by nitrile compound X05= 0,112 [kg]
X05=0.112
; Water replaced by tap water X06= 0,000005 [kg]
X06=0.000005
; Wooden spatula replaced by solid unbleached board X07= 0,024 [kg]
X07=0.024

;Outputs Y:

; CFRP structure Y00= X00
Y00=X00

; Used Power/heat Y01= sum of inputs of el. E (X01)
Y01=X01

; W_Acetone replaced by acetone, liquid, type bad Y02= X02
Y02=X02

; W_Cleaning Tissue replaced by tissue paper. type bad Y03= X03
Y03=X03

; W_Cotton Swab replaced by textile, woven cotton, type bad Y04= X04
Y04=X04

; W_Gloves, pair replaced by nitrile-compund, type bad Y05= X05
Y05=X05

; W_Water replaced by tap water, type bad Y06= X06
Y06=X06

; W_Wooden spatula replaced by solid unbleached board, type bad Y07= X07
Y07=X07

VI.XXXI Informationen zum GaBi-Datensatz der Kohlenstofffasern

Quelle: ohne Verfasser; Internetseite der GaBi-Datenbank; Letzter Zugriff: 05.11.2015

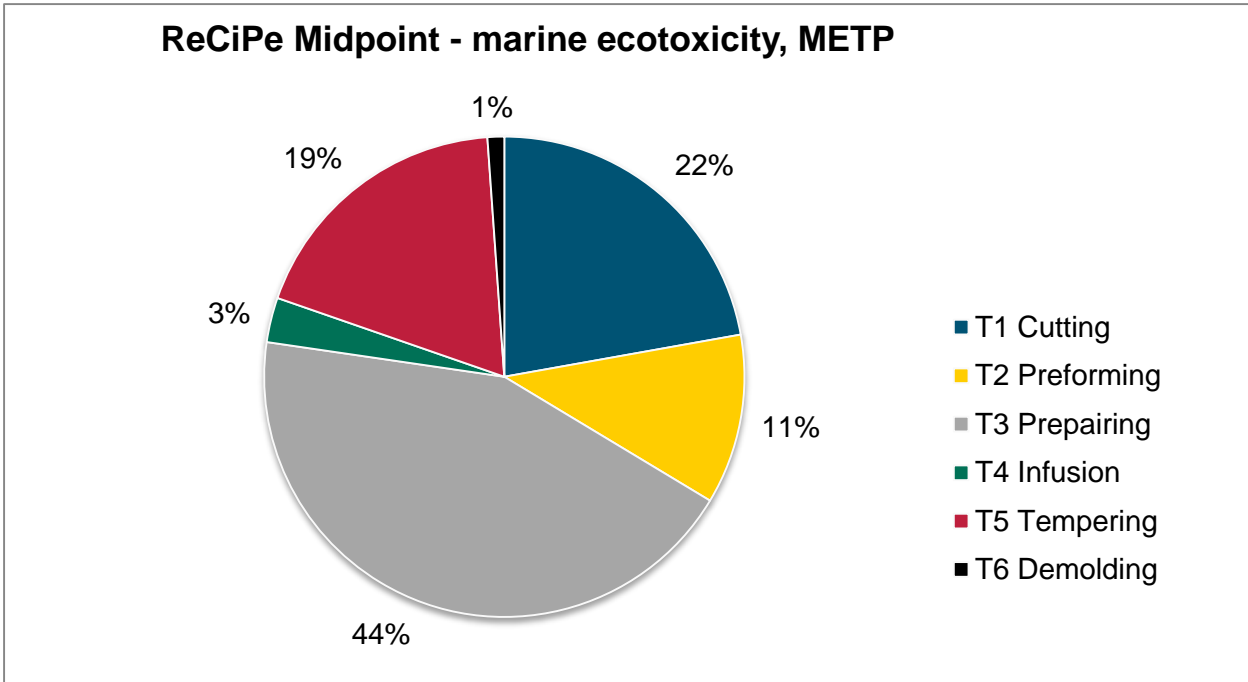
Link: <http://gabi-documentation-2014.gabi-software.com/xml-data/processes/d2e4cb14-c5fa-49a3-b6c2-840a2b860d63.xml>

Process data set: Carbon Fiber (CF; from PAN; standard strength); spinning, stabilizing, carbonizing, surface treatment, sizing; production mix, at plant; from PAN, standards strengths 34 million psi tensile modulus (en)	
Table of Contents: Process information - Modelling and validation - Administrative information - Inputs and Outputs	
Process information	
Key Data Set Information	
Location	DE
Geographical representativeness description	The data set represents the German situation, focusing on the main technologies, the region specific characteristics and / or import statistics.
Reference year	2013
Name	Base name; Treatment, standards, routes; Mix and location types; Quantitative product or process properties Carbon Fiber (CF; from PAN; standard strength); spinning, stabilizing, carbonizing, surface treatment, sizing; production mix, at plant; from PAN, standards strengths 34 million psi tensile modulus
Use advice for data set	The data set represents a cradle to gate inventory for short fibre uses (e.g. as filler). It can be used to characterise the supply chain situation of the respective commodity in a representative manner. Combination with individual unit processes using this commodity enables the generation of user-specific (product) LCAs.
Technical purpose of product or process	Carbon fibers are used to make fiber reinforced materials such as fiber reinforced plastics. Those materials can be used to make parts of airplanes, bikes or sports equipment.
Classification ()	Class name / Hierarchy level / Hierarchy level / Hierarchy level Processes / Production / Material production / Plastic production
General comment on data set	The data set covers all relevant process steps / technologies over the supply chain of the represented cradle to gate inventory with a good overall data quality. The inventory is mainly based on industry data and is completed, where necessary, by secondary data. This dataset is based on primary data from internationally prevalent production processes, connected with regional precursor chains.

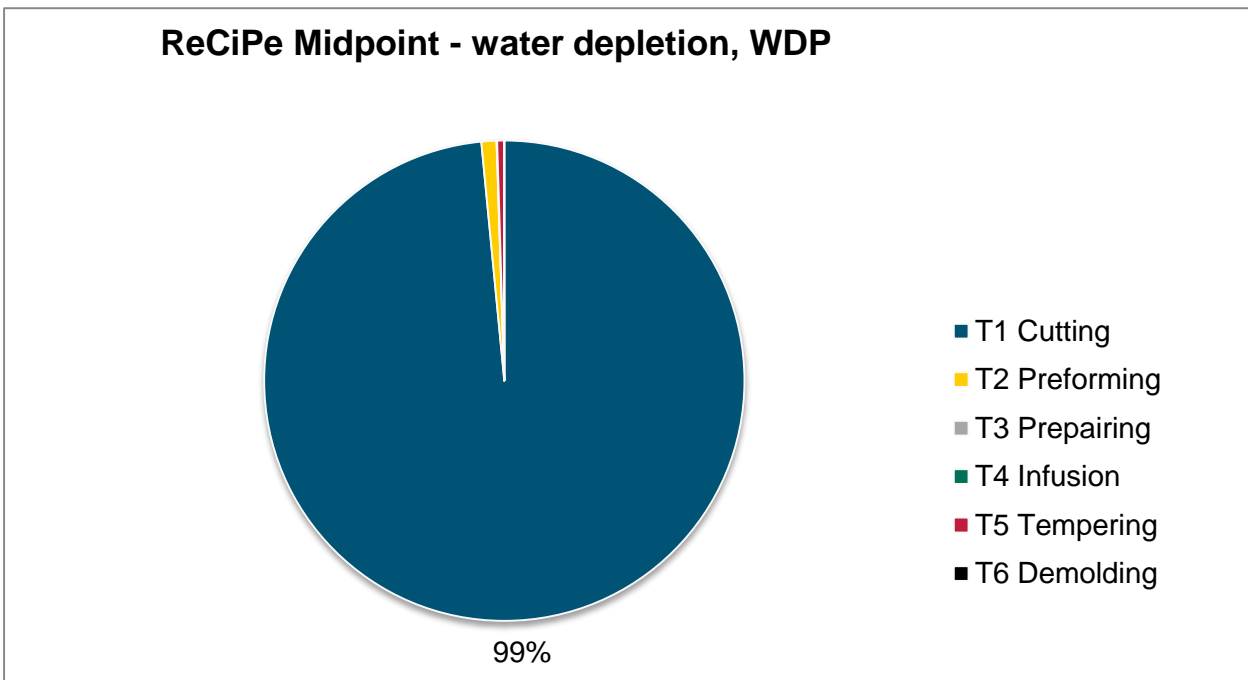
Hinweis auf Kurzfasern

VI.XXXII Prozentuale Verteilung der Umweltindikatoren METP & WDP

Indikator METP= marine ecotoxicity potential; Gesamtergebnis 0,27 kg 1,4-DCB7-Äquivalente

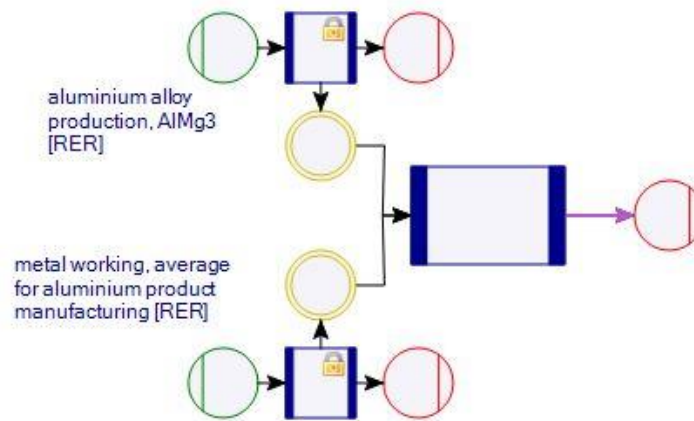


Indikator WDP= water depletion potential; Gesamtergebnis 307 m³ Wasser



VI.XXXIII Modellierung des Referenzbauteils aus Aluminium

Darstellung der Modellierung:



Weitere Informationen:

- Systemmodell „allocation default“
- Typ: „result“-Prozess
- Bezugsregion: RER= Region Europe
- Lineare Spezifikation:
 - Input: 1,5 kg aluminium alloy production, AlMg3
 - Input: 1 kg metal working, average for aluminium product manufacturing
 - Output: 1 kg Al product
- Referenzfluss/ funktionelle Einheit: 13,33 kg Al product

Umberto-model		CO2-Eq. [kg CO ₂ /kg]
1	aluminium alloy production, AlMg3 [RER]	6,48
2	metal working, average for aluminium product manufacturing [RER]	4,31
	sum of both models (ratio 1:1)	10,79
	sum of both models (“input 1”*1,5 + “input 2”*1)	14,03*

*Wert ist an die Literatur von Ehrenberger et al. 2013, S. 733 angelehnt

VI.XXXIV Ergebnisse von AI und CFK aus den Wirkungsindikatoren der Methode „ReCiPe“

Wirkungskategorie Name (engl.)	Abkürzung Indikator	Einheit	AI* 13,33 kg	CFK* 10 kg	AI/ CFK
climate change	GWP	kg (CO2 to air)	187,113	519,745	36,00%
ozone depletion	ODP	kg (CFC-115 to air)	0,000	0,000	12,96%
terrestrial acidification	TAP	kg (SO2 to air)	1,300	1,343	96,79%
freshwater eutrophication	FEP	kg (P to freshwater)	0,015	0,038	39,35%
marine eutrophication	MEP	kg (N to freshwater)	0,037	0,115	32,21%
human toxicity	HTP	kg (14DCB to urban air)	29,128	34,915	83,43%
photochemical oxidant formation	POFP	kg (NMVOC6 to air)	0,911	1,097	83,08%
particulate matter formation	PMFP	kg (PM10 to air)	0,556	0,495	112,20%
terrestrial ecotoxicity	TETP	kg (14DCB to industrial soil)	0,027	0,452	5,99%
freshwater ecotoxicity	FETP	kg (14DCB to freshwater)	0,118	0,284	41,50%
marine ecotoxicity	METP	kg (14-DCB7 to marine water)	0,205	0,271	75,73%
ionising radiation	IRP	kg (U235 to air)	7,556	32,257	23,42%
agricultural land occupation	ALOP	m ² yr (agricultural land)	18,537	53,175	34,86%
urban land occupation	ULOP	m ² yr (urban land)	2,705	1,445	187,16%
natural land transformation	NLTP	m ² yr (natural land)	0,031	0,025	123,62%
water depletion	WDP	m ³ (water)	1,024	307,312	0,33%
mineral resource depletion	MDP	kg (Fe)	42,755	19,740	216,58%
fossil resource depletion	FDP	kg (oil, crude, feedstock, 42MJ per kg, in ground)	56,651	164,343	34,47%

*Alle Werte auf 3 Nachkommastellen gerundet

VI.XXXV Simulation eines Zuschnitts mit Rollenbreite 1500 mm

Quelle: Geometrien der einzelnen Lagen für die Verwendung im Cutter-Programm von M. Buggisch, DLR-FA-FVT

Anmerkungen:

- Simulation eines Materialzuschnitts von 4: Triaxial – Carbon – Gelege [135/90/45]
- Lagen gemäß Lagenaufbau (Anhang VI.II) von Rippe 2 & 3: Nr. 1,5,10,14
- Einstellen der Materialdimensionen (Rollenbreite = 1500 mm, Länge variabel) und berechnen des Zuschnitts mit Cutter-Programm
- Abbildungen sind dem Programm direkt entnommen:

Name	Ansicht	Grösse(X)	Grösse(Y)	Anzahl
2-10		1342,11	354,118	1
2-1		1353,38	354,34	1
2-5		1347,88	352,89	1
2-14		1337,19	353,987	1
3-1		1347,98	337,528	1
3-5		1343,27	336,491	1
3-10		1338,11	336,028	1
3-14		1332,49	336,425	1

Material Dimensionen	Fläche
Materialbreite: 1.500 m	Materialverbrauch: 4.024 m ²
Materiallänge: 2.682 m	Nutzen: 3.495 m ²
	Abfall: 0.528 m ²
	Ausnutzung(%): 86.87 %
	Elements placed: 8