DLR-IB-FA-BS-2022-77

Ökologische und ökonomische Bewertung von Faserverbund-Montageprozessen mit dem Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM)

Diplomarbeit

Lucas Seifert

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

MH-FA-56-FB03_v1.3

Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik

DLR-IB-FA-BS-2022-77

Ökologische und ökonomische Bewertung von Faserverbund-Montageprozessen mit dem Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM)

Zugänglichkeit:

Stufe 1 Allgemein zugänglich: Der Interne Bericht wird elektronisch ohne Einschränkungen in ELIB abgelegt. Falls vorhanden, ist je ein gedrucktes Exemplar an die zuständige Standortbibliothek und an das zentrale Archiv abzugeben.

Braunschweig, *Juni, 2022*

Der Bericht umfasst: 111 Seiten

Abteilungsleiter:
Dr. Markus Kleineberg

Autor:
Lucas Seifert

Autor 2 / Betreuer:
Dr.-Ing. Ali Al-Lami
Dipl.-Ing. Christin Rümmler (TU Dresden)

Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Maschinenwesen Institut für Luftfahrzeugtechnik

Diplomarbeit

zum Thema

Ökologische und ökonomische Bewertung von Faserverbund-Montageprozessen mit dem Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM)

vorgelegt von Lucas Seifert
im Studiengang Maschinenbau, Jg. 2015
geboren am 09.11.1996 in Gera

zur Erlangung des akademischen Grades eines

Diplom-Ingenieurs
(Dipl.-Ing.)

Betreuer: Dipl.-Ing. Ch. Rümmler, TU Dresden, ILR
Dr.-Ing. Ali Al-Lami, DLR Braunschweig
Verantwortlicher Hochschullehrer: Prof. Dr. J. Markmiller, TU Dresden
Tag der Einreichung: 30.06.2022

T E C H N I S C H E U N I V E R S I T Ä T D R E S D E N

Fakultät Maschinenwesen

Aufgabenstellung für die Diplomarbeit

ILR-LFT D 22-05

im Studiengang	**Maschinenbau**
in der Studienrichtung	**Luft- und Raumfahrttechnik**
Name des Diplomanden	**Lucas Seifert**
Matrikelnummer	4501095

Thema: Ökologische und ökonomische Bewertung von Faserverbund-Montageprozessen mit dem Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM)

Subject: Ecological and economic assessment of fiber composite assembly processes with the Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM)

Ein zunehmender Bedarf an Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen erfordert den Einsatz angepasster Produktionsprozesse, die ökologisch und ökonomisch nachhaltig sein müssen. Insbesondere steht dabei die Ökoeffizienz in der Fertigungs- und Montagephase im Vordergrund. Computergestützte Modelle und Bewertungsverfahren ermöglichen es Einspar- und Optimierungspotentiale aufzuzeigen und Produktionsprozesse hinsichtlich ihrer ökologischen und ökonomischen Wirkungen weiterzuentwickeln.
Ziel der Arbeit ist die existierende Bewertungsmethode des Eco-Efficiency-Assessment-Models (EEAM) um die Montage zu erweitern, damit eine Bewertung der Ökoeffizienz von Montagetechnologien durchgeführt werden kann. Auf Basis einer Literaturrecherche zu Montagetechnologien und deren Prozessparametern werden verschiedene Montageprozesse von Faserverbundwerkstoffen definiert und modelliert. Mit Hilfe von ökologischen und ökonomischen Indikatoren soll ein Modell zur Darstellung der Elementarflüsse und der daraus resultierenden Ökoeffizienz erarbeitet werden. Das Modell wird durch die Parametrisierung im EEAM softwaregestützt abgebildet. Im Rahmen der Arbeit wird eine Fallstudie zur Bewertung der Ökoeffizienz der Montage von Faserverbundwerkstoffen durchgeführt, deren Systemgrenze ebenso zu definieren ist. Die dort erfassten Daten sind in das Modell zu überführen. Die Ergebnisse des Modells der Montage sollen validiert, ausgewertet und mit dem Fertigungsprozess in Relation gesetzt werden, um so die Relevanz der Montage, hinsichtlich seiner Ökoeffizienz, bezogen auf den gesamten Produktionsprozess ins Verhältnis zu setzen. Folgende Teilaufgaben sind zu bearbeiten:

- Literaturrecherche zu Montagetechnologien von Faserverbundbauteilen und relevanten ökologischen Indikatoren der Produktion mit Fokus auf die Montage von Faserverbund-werkstoffen
- Definition und Parametrisierung notwendiger Indikatoren / Konzeption und Umsetzung eines Modells zur Elementarflussanalyse in bevorzugter Programmiersprache
- Festlegung der Systemgrenze der Fallstudie / Umsetzung der Datenerfassung bei der Montage / Überführung der Daten in das erstellte Prozessmodell
- Anwendung des EEAM zur Ermittlung der Ökoeffizienz / Validierung der Ergebnisse

Betreuer:	Dipl.-Ing. Ch. Rümmler, TU Dresden, ILR Dr.-Ing. Ali Al-Lami, DLR Braunschweig
1. Gutachter:	Prof. Dr. J. Markmiller, TU Dresden
2. Gutachter:	Dr.-Ing. F. Hähnel, TU Dresden
Ausgehändigt am:	01.02.2022
Einzureichen am:	30.06.2022

Rechtliche Bestimmungen: Der Bearbeiter ist grundsätzlich nicht berechtigt jegliche Arbeits- und Forschungsergebnisse, von denen er bei der Bearbeitung Kenntnis erhält, ohne Genehmigung des Betreuers dritten Personen zugänglich zu machen. Bezüglich erreichter Forschungsleistungen gilt das Gesetz über Urheberrecht und verwendete Schutzrechte (Bundesgesetzblatt I/ S. 1273, UrhG vom 09.09.1965). Der Bearbeiter hat das Recht, seine Erkenntnisse zu veröffentlichen, soweit keine Erkenntnisse und Leistungen der betreuenden Institutionen eingeflossen sind.

Prof. Dr. J. Markmiller Studienrichtungsleiter	Prof. Dr. J. Markmiller Betreuender Hochschullehrer	Unterschrift des Studierenden

Der TUD-Betreuer ist während der Bearbeitung in Form von **mindestens 3 Konsultationen** über den Status der Arbeit zu informieren. Die ***„Richtlinie zur Anfertigung von Studienarbeiten“*** des Lehrstuhls, die ***„Diplomprüfungsordnung“*** der Fakultät sowie die ***„Richtlinien zur Sicherung guter wissenschaftlicher Praxis“*** der TU Dresden sind zu beachten.

Selbstständigkeitserklärung

Hiermit erkläre ich, Lucas Seifert, geboren am 09.11.1996 in Gera, dass ich die von mir am heutigen Tage dem Prüfungsausschuss der Fakultät Maschinenwesen eingereichte Diplomarbeit zum Thema

Ökologische und ökonomische Bewertung von Faserverbund-Montageprozessen mit dem Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM)

vollkommen selbständig verfasst und keine anderen als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt sowie Zitate kenntlich gemacht habe. Bei der Auswahl und Auswertung des Materials sowie bei der Herstellung des Manuskripts habe ich Unterstützungsleistungen von folgenden Personen erhalten:

Dipl.-Ing. Ch. Rümmler, TU Dresden, ILR; Dr.-Ing. Ali Al-Lami, DLR Braunschweig

Dresden, den 30.06.2022 .....

Unterschrift

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Maschinenwesen Institut für Luftfahrzeugtechnik

Ökologische und ökonomische Bewertung von Faserverbund-Montageprozessen mit dem Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM)

Zur Verbesserung der Ökobilanz der Betriebsphase von Flugzeugen geht seit Jahren der Trend dazu über, immer größere Anteile der Strukturmasse aus karbonfaserverstärkten Kunststoffen (CFK) zu fertigen. Dabei stehen dem technischen Nutzen des CFKs relativ hohe Kosten und Umweltauswirkungen insbesondere in der Produktionsphase entgegen. Eine Entwicklung eines kombinierten Bewertungsmodells für ökonomische und ökologische Aspekte der CFK-Herstellung ist deswegen notwendig, um Entscheidungsträger:innen mit Informationen zu versorgen, die bei der Realisierung nachhaltiger Entwicklungsprozesse die Entscheidungen unterstützen.
Das Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM) stellt ein solches Modell für den Fertigungsprozess von Faserverbundbauteilen dar. Darauf aufbauend wird in dieser Arbeit der Montageprozess betrachtet. Es wird ein generisches Modell zur Bewertung der Ökoeffizienz verschiedener Montagetechnologien erstellt. Die Bewertung wird mithilfe der Cradle-To-Gate Ökobilanzierung durchgeführt und beinhaltet den ökonomischen Indikator der Direktkosten (DC) und die ökologischen Indikatoren des Kumulierten Energiebedarfs (CED) sowie 18 Midpoint-Indikatoren der ReCiPe-Methode. Angewandt wurde dieses Modell in einer Fallstudie zur Bewertung der Fertigung und Montage von Probekörpern eines Holmsegments für einen Flügel eines unbemannten Ultraleicht-Stratosphärenflugzeugs. Die Fertigung erfolgte über das Wickeln von Prepreg-Material und anschließendem Aushärten in einem Autoklav. Die Montage wurde mittels Klebung realisiert. Die Prozesse fanden unter Laborbedingung mit niedrigem Produktionsvolumen statt.
Als Ergebnis der Bewertung wurden die Kategorien Arbeitskraft und Bauteilmaterial als größte Kostenpunkte identifiziert. Die größten Umwelteinwirkungen gehen durch Energieverbrauch und Prepreg-Material in die Bilanz ein. Neben der Bewertung wurde eine Validierung des erstellen Modells durchgeführt. Bezogen auf das Bauteilgewicht ergeben sich cradle-to-gate für die gesamten Produktion DC von 3343 €/kg und ein Kohlenstoff-Fußabdruck von 259.8 kgCO_2-Eq/kg. Größtes Einsparpotential bietet die Verminderung von Bauteilabfällen im Montageprozess durch industrialisierte Prozesse.

Betreuer:	Dipl.-Ing. Ch. Rümmler, TU Dresden, ILR
	Dr.-Ing. Ali Al-Lami, DLR Braunschweig
Hochschullehrer:	Prof. Dr. J. Markmiller, TU Dresden
Tag der Einreichung:	30.06.2022

DIPLOMARBEIT

Bearbeiter: Lucas Seifert

TECHNISCHE UNIVERSITÄT DRESDEN

Fakultät Maschinenwesen Institut für Luftfahrzeugtechnik

Ecological and economic assessment of fiber composite assembly processes with the Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM)

To improve the aircraft life-cycle eco-efficiency impacts during operational phase, the trend for years has been to manufacture ever greater proportions of the structural mass from carbon fiber reinforced polymers (CFRP). However, the technical benefits of CFRP are offset by relatively high costs and environmental impacts especially in production phase. The development of a combined assessment model for economic and ecological aspects of CFRP production is therefore necessary in order to provide decision-makers with information to enhance the sustainable development processes.

Based on the Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM), which represents such a decision-support-system for assessing the manufacturing process of fiber composite components, the assembly process is considered in the work. Therefore, a generic model is created to enable the assessment of the eco-efficiency of various assembly methods. The assessment is carried out with the help of a cradle-to-gate life cycle assessment and includes the economic indicator of direct costs and the ecological indicators of cumulative energy demand (CED) as well as 18 midpoint indicators of the ReCiPe method. This model was applied in a case study to evaluate the manufacturing and assembly of a spar test-segment for an unmanned ultralight stratospheric aircraft wing. Manufacturing is accomplished by filament winding of prepreg material and curing in an autoclave. The assembly is realized by means of adhesive bonding. The processes took place under laboratory conditions with low production volume.

As a result of the evaluation, major costs were located in labor and component material. The largest environmental impacts are due to energy consumption and prepreg material. In addition to the evaluation, a validation of the created model was performed. Based on the component weight, the total production cradle-to-gate cost is 3343 €/kg and carbon footprint is 259.8 kgCO_2-Eq/kg. The greatest savings potential in terms of cost and carbon footprint is offered by the reduction of component waste in industriulized assembly.

Tutor:	Dipl.-Ing. Ch. Rümmler, TU Dresden, ILR
	Dr.-Ing. Ali Al-Lami, DLR Braunschweig
Supervisor:	Prof. Dr. J. Markmiller, TU Dresden
Day of Submission:	30.06.2022

DIPLOMA THESIS Author: Lucas Seifert

Inhaltsverzeichnis

1 Einleitung **5**

2 Stand der Technik **7**
2.1 Ökoeffizenz . . . 7
2.1.1 Ökobilanz . . . 8
2.1.2 Lebenszykluskostenrechnung . . . 11
2.2 Indikatoren der Ökoeffizienz in der Montage von Faserverbundwerkstoffen 13
2.2.1 Ökologische Indikatoren . . . 13
2.2.2 Ökonomische Indikatoren . . . 18
2.3 Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM) . . . 19
2.4 Montage der Faserverbundwerkstoffe . . . 21
2.4.1 Montagetechnologien . . . 22
2.4.2 Mechanische Montageverfahren . . . 23
2.4.3 Schweißen . . . 25
2.4.4 Kleben . . . 26

3 Erstellung eines Modells zur Elementarflussanalyse **32**
3.1 Modellierung der Montagetechnologien im EEAM . . . 32
3.2 Parametrisierung der Montagetechnologien im EEAM . . . 35
3.3 Umsetzung der Elementarflussanalyse im EEAM . . . 39

4 Fallstudie **42**
4.1 Untersuchungsgegenstand . . . 42
4.1.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens . . . 42
4.1.2 Sachbilanz . . . 48
4.2 Modellierung und Parametrisierung der Fallstudie im EEAM . . . 53

5 Bewertung der Fallstudie **58**
5.1 Ergebnisse der Bewertung der Ökoeffizienz . . . 58
5.1.1 Bewertung der Fertigung . . . 58
5.1.2 Bewertung der Montage . . . 61
5.2 Validierung . . . 73
5.3 Diskussion . . . 78

6 Zusammenfassung und Ausblick **83**

Literaturverzeichnis **85**

Abbildungsverzeichnis **95**

Tabellenverzeichnis **97**

Anhang A Screenshots der EEAM-Anwendung **I**

Anhang B Datenblätter der Prozessmessungen **IV**

Abkürzungsverzeichnis

Zeichen	Bennenung	Einheit
ABC	Prozesskostenrechnung	-
ALCA	Attributionelle Ökobilanz	-
ALO	Landwirtschaftliche Landnutzung	-
ALOP	Okkupationspotential landwitschaftlich nutzbarer Flächen	$m^2 \cdot a$
CC	Klimawandel	-
CED	Kumulierter Energiebedarf	MJ oil-Eq
CF	Charakterisierungsfaktor	-
CFK	Karbonfaserverstärkter Kunststoff	-
CLCA	Folgerichtige Ökobilanz	-
CSV	Comma Seperated Value (Format)	-
DC	Direktkosten	€
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt	-
EEAM	Eco-Efficiency-Assessment-Model	-
FD	Schwund fossiler Rohstoffe	-
FDP	Fossiles Brennstoffpotential	kg oil-Eq
FE	Süßwasser Eutrophierung	-
FEP	Süßwasser Eutrophierungspotential	kg P-Eq
FET	Süßwasser Ökotoxizität	-
FETP	Süßwasser Ökotoxizität-Potential	kg 1,4-DC.
FVK	Faserverbundkunststoff	-
GWP	Klimaerwärmungspotential	kg CO_2-Eq
HAP	Hochfliegende unbemannte Plattform	-
HT	Humantoxizität	-
HTP	Humantoxizitätspotential	kg 1,4-DC.
IPCC	International Panel on Climate Change	-
IR	Ionisierende Strahlung	-
IRP	Potential für ionisierende Strahlung	kg U235-Eq
KKR	Konventionelle Kostenrechnung	-
KPE	Kosten pro Einheit	€/Einheit
LCA	Ökobilanz	-
LCCA	Lebenszykluskostenrechnung	-
LCI	Sachbilanz	-

Fortsetzung auf nächster Seite

Zeichen	Bennenung	Einheit
LCIA	Wirkungsabschätzung	-
ME	Meereseutrophierung	-
MEP	Meereseutrophierungspotential	kg N-Eq
MET	Meeresökotoxizität	-
METP	Meeresökotoxizitätpotential	kg 1,4-DB.
MFKR	Materialflusskostenrechnung	-
MPE	Masse pro Einheit	kg/Einheit
MRD	Schwund mineralischer Rohstoffe	-
MRDP	Mineralverarmungspotential	kg Fe-Eq
NDT	Zerstörungsfreie Prüfung	-
NLT	Umwandlung natürlicher Flächen	-
NLTP	Tranformationspotential natürlicher Flächen	m^2
NRC	Nicht-wiederkehrende Kosten	-
OD	Ozonabbau	-
ODP	Ozonabbaupotential	kg CFC-11
PAN	Polyacrylnitril	-
PMF	Bildung von Feinstaub	-
PMFP	Feinstaubbildungspotential	kg PM10-Eq
POF	Bildung photochemischer Oxidantien	-
POFP	Bildungspotential photochemischer Oxidantien	kg NMVOC
TA	Terrestrische Versauerung	-
TAP	Terrestrisches Versauerungspotential	kg SO_2-Eq
TET	Terrestrische Ökotoxizität	-
TETP	Terrestrisches Ökotoxizitätspotential	kg 1,4-DC.
UBA	Umweltbundesamt	-
ULO	Urbane Landnutzung	-
ULOP	Okkupationspotential urbaner Flächen	$m^2 \cdot$ a
UP	Prozessmodul	-
UV	Ultraviolett	-
WD	Wasserverarmung	-
WDP	Wasserverarmungspotential	m^3

1 Einleitung

Faserverbundwerkstoffe finden heutzutage in sämtlichen Bereichen der Industrie Anwendung. Die größten Anteile von Faserverbundstrukturen werden in Luftfahrt- und Automobilindustrie, aber auch für Windkraftanlagen und im Bauwesen eingesetzt [85]. Die Leichtbaueigenschaften des Faserverbundmaterials, vor allem von faserverstärktem Kunststoff (FVK), ermöglichen in Luftfahrtstrukturen deutliche Gewichtsreduzierung, was in der Verringerung des Treibstoffverbrauchs und einer effizienterer Arbeitsweise resultiert [55, 74]. Auf Grund des Potentials zur Verbesserung der Ökoeffizienz, werden in der Luftfahrt immer größere Anteile der Strukturmasse aus FVK gefertigt, was zu einem großen Wachstum der Faserverbund-Industrie führt [5, 22, 55]. Trotz Verbesserung der Ökoeffizienz im Rahmen des Betriebs von Flugzeugen, ist die Produktion von FRP im Vergleich zu anderen Leichtbaumaterialien wie Aluminium kostenintensiver und umweltschädlicher [10, 24, 84]. Dies führt dazu, dass sich durch die Verwendung von Faserverbundwerkstoffen in kleineren Strukturen, wie z.B. Autos, die für den gesamten Lebenszyklus aufgestellte Ökobilanz verschlechtert [89]. Mit dem Bericht des International Panel on Climate Change (IPCC) zum Klimawandel, der den Einfluss des Menschen auf die globale Klimakrise nachweist und unterstreicht, dass die Erderwärmung schneller voranschreitet, als vermutet, resultieren auch Bewegungen in der Politik der Bundesrepublik Deutschland. So wurde mit dem Klimaschutzprogramm 2030 eine landesweite Einsparung von 65% der CO_2-Emissionen bis zum Jahr 2030 und eine Klimaneutralität bis 2045 festgelegt [43]. Die genannten Sachverhalte und Trends unterstützen die Notwendigkeit der Etablierung effizienterer, nachhaltiger Lebenszyklen von FVK und somit auch der Verbesserung der Ökoeffizienz deren Produktion, aus welcher große ökologische und ökonomische Auswirkungen resultieren. Dabei ist es das Ziel, den Prozess und dessen Elementarflüsse im Detail zu analysieren, zu bewerten und anhand der gewonnen Erkenntnisse das Verfahren im Sinne der Ökoeffizenz zu verbessern. In diesem Zusammenhang wurden bereits mehrere Untersuchungen der Ökoeffizenz der Produktion von FVK-Bauteilen angefertigt und die größten Einträge von CO_2 und Kosten identifiziert [10, 54, 61, 84]. Ein wichtiger Teil der Produktion neben der Fertigung ist jedoch auch die Montage der hergestellten Bauteile [53]. Auf Grund der mangelnden Datenlage zu diesem expliziten Abschnitt des Lebenszyklus, sollen in dieser Arbeit benannte Lücken geschlossen und dahingehend ein Beitrag zur ökologischen und ökonomischen Bewertung von Faserverbund-Montageprozessen geleistet werden.

Im zweiten Kapitel der Arbeit wird zunächst der Begriff der Ökoeffizenz, der Methoden zur ökologischen und ökonomischen Bewertung sowie korrespondierende Indikatoren erklärt, woraufhin der Montageprozess von Faserverbundwerkstoffen näher erläutert wird.

Gemeinsam mit der Vorstellung des Eco-Efficiency-Assessment-Models (EEAM) erklärt das Kapitel die Grundlagen der Arbeit. Auf dieser Basis wird der Montageprozess mit Hilfe einer Elementarflussanalyse für die Bewertung der Ökoeffizienz angewandt. Nach der Modellierung der Montagetechnologien und der Beschreibung deren Parametrisierung in Kapitel 3 Erstellung eines Modells zur Elementarflussanalyse, wird dieses im EEAM integriert und mathematisch beschrieben. In Kapitel 4 wird die Fallstudie vorgestellt. Darin wird zunächst der Untersuchungsgegenstand der Studie definiert und dieser anschließend auf Basis des Modells aus Kapitel 3 im EEAM integriert und parametrisiert. Als Resultat werden die Messungen der Fallstudie mit dem EEAM ausgewertet und in Kapitel 5 dargestellt. Neben der Auswertung befindet sich in Kapitel 5 die Bewertung der Prozesse, die Validierung der Ergebnisse, sowie deren Diskussion. Die Arbeit schließt in Kapitel 6 mit einer Zusammenfassung der Methoden und Ergebnisse und dem Ausblick auf mögliche weiterführende Untersuchung ab.

2 Stand der Technik

Zur Bewertung der Ökoeffizienz von Produktionsprozessen müssen zunächst grundlegende Begriffe und Methoden erklärt und definiert werden. In dem folgenden Kapitel sollen die Ökoeffizenz und die damit einhergehende Methoden und relevanten Indikatoren eingeführt werden. Auf Basis der vorgestellten Instrumente wird das EEAM eingeführt. Nach der Beschreibung von Aufbau und Funktionsweise des Modells, werden die technischen Aspekte der Montageprozesse von Faserverbundmaterialien erläutert und Möglichkeiten dieser angeführt.

2.1 Ökoeffizenz

Nach der ISO 14050 Norm beschreibt der Begriff der Ökoeffizienz einen „Aspekt der Nachhaltigkeit, wobei die Umweltleistung eines Produktsystems mit dem zugehörigen Produktsystemnutzen in Beziehung gesetzt wird“ [16]. Der Produktsystemnutzen wird dabei als „Wert oder erwünschter Wert, der einem Produktsystem zugeschrieben wird“ betitelt. Anders gesagt, bezeichnet die Ökoeffizienz im Allgemeinen eine Effizienz im wirtschaftlichen und ökologischen Sinne [66]. In der Arbeit von Al-Lami [53] wurden die verschiedenen Definitionen der Ökoeffizienz bereits aufgeführt.
Der Begriff Ökoeffizienz bedeutet die Vorteile aus den Bereichen der Ökologie und Ökonomie zu nutzen und ungewollte Effekte beider zu unterdrücken [57, 65]. Des Weiteren wird in Schaltegger und Sturm [68] sowie in DeSimone und Popoff [11] beschrieben, dass die Ökoeffizienz eines Produktsystems erreicht wird, wenn es bei kostentechnischer Kompetetivität einen geringen Einfluss auf die Umwelt generiert. Nach Ehrenfeld [21] und Saling et al. [65] gilt die Ökoeffizienz als Indikator für das Verhältnis von nutzbaren Output zu nutzbarem Input. Die verschiedenen Beschreibungen des Begriffs zeigen deutlich, dass die Ökoeffizienz einen wichtigen Entscheidungsaspekt in Produkt und Prozessentwicklung darstellt. Dies betont wiederum die Notwendigkeit diesen Aspekt der Produktion zu untersuchen [59].

Dabei ist es wichtig zwischen Effizienz und Ökoeffizienz zu unterscheiden. Während die Effizienz den Zusammenhang zwischen homogenen Outputs und Inputs einer bestimmten Einheit bezeichnet, beschreibt die Ökoeffizienz eher das Verhältnis aus ökologischem Eingriff zu ökonomischen Vorteil. Sie ist abhängig von der Effizienz des betreffenden Produktsystems und wird in heterogenen monetären und physikalischen Einheiten beschrieben [53].

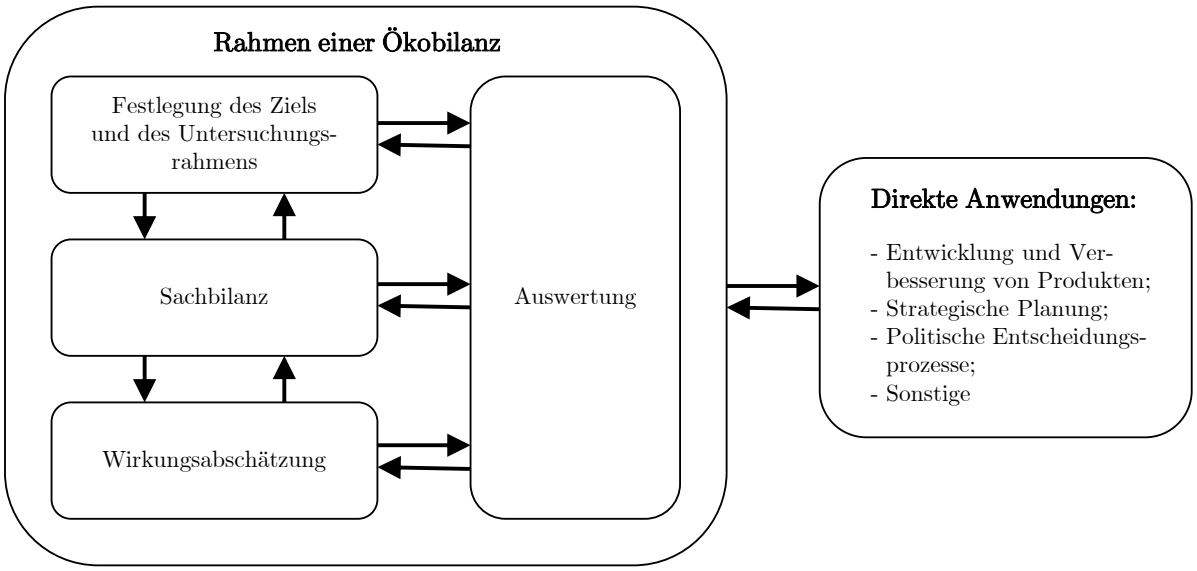


Abbildung 2.1: Phasen einer Ökobilanz nach ISO 14040 [14]

2.1.1 Ökobilanz

Um eine Aussage über die Ökoeffizienz eines Produktsystems treffen zu können, werden die Kenntnisse über deren wirtschaftlichen Nutzen und erzeugten Umweltauswirkungen benötigt. Die benötigte Information zu ökologischen Auswirkungen kann über die Ökobilanz ermittelt werden. Die Ökobilanz, auch als Life Cycle Assessment (LCA) bezeichnet, ist eine Methode um alle möglichen Umwelteinwirkungen aller Lebenszyklusphasen eines Produkts, die Produktion und Anwendung von Produkten eingeschlossen, zu quantifizieren und zu bewerten. Der Anspruch dabei ist, die Umweltaspekte und -wirkungen der Produkte von der Rohstoffgewinnung bis zur finalen Beseitigung zu schätzen. Die Ökobilanz dient dazu, Möglichkeiten zur Verbesserung von Umwelteigenschaften der Produkte zu veranschaulichen. Vor allem ist es ein wichtiges Werkzeug für Entscheidungsträger, um Beschlüsse neben monetären Einflüssen auch im umwelttechnisch nachhaltigen Sinne zu fällen. Die Methode des LCAs ist in der DIN EN ISO 14044 definiert [15]. Sie ist gemäß Abb. 2.1 in vier Bereiche geteilt: die Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens, die Sachbilanz, die Wirkungsabschätzung und Auswertung. [14]

Im ersten Schritt der Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens wird das zu untersuchende Produktsystem klar definiert. Neben der Erklärung zur beabsichtigten Anwendung und Gründen für die Durchführung der Studie, werden die funktionelle Einheit, das Produktsystem, Allokationsverfahren, Annahmen, Einschränkungen und die Systemgrenzen beschrieben. Es dient der eindeutigen Definition der angewandten Methodik und des Untersuchungsrahmens. So werden auch zu Beginn Anforderungen an Datenqualität festgelegt.

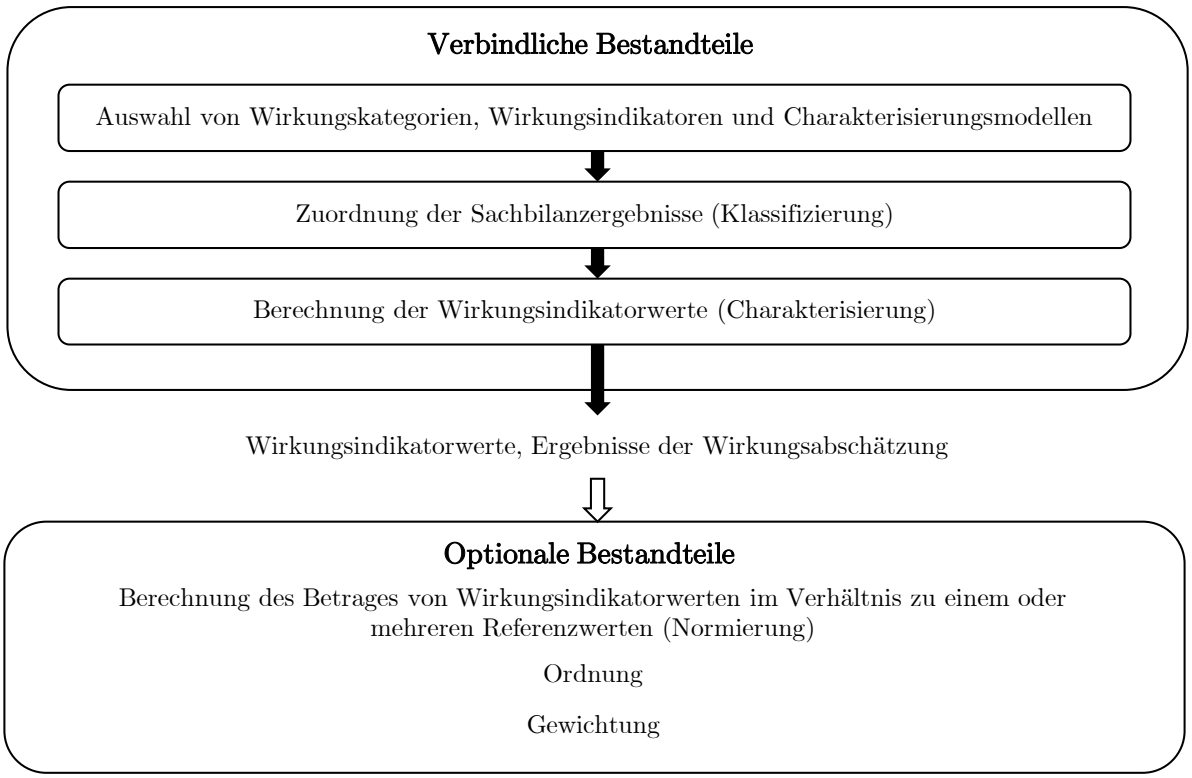


Abbildung 2.2: Vorgehen der Wirkabschätzung nach ISO 14040 [14]

Im zweiten Schritt wird die Sachbilanz (Life Cycle Inventory, LCI) erstellt. Sie umfasst die Datenerhebung und Berechnungsverfahren der Input- und Outputflüsse des Produktsystems. Bei der Datenerhebung werden die Daten jedes Prozessmoduls innerhalb der Systemgrenze in Kategorien gegliedert erfasst. Die Datenberechnung beinhaltet neben der Um- bzw. Berechnung der notwendigen Daten die Validierung und Allokation der Daten auf Prozessmodule und Referenzflüsse.

Der dritte Schritt beinhaltet die Wirkungsabschätzung (Life Cycle Impact Assessment, LCIA). Nach der im ersten Schritt definierten Methode und den ausgewählten Wirkungskategorien werden nun die Wirkungsindikatoren berechnet. Das Verfahren wird gemäß Abb. 2.2 durchgeführt. Nach Auswahl der Wirkungskategorien, -indikatoren und Charakterisierungsmodelle werden die Ergebnisse der Sachbilanz den Kategorien zugeordnet und darauf die Wirkungsindikatorwerte bestimmt. Mithilfe dieser Ergebnisse können verschiedenste Produktsysteme anhand der einheitlich definierten Indikatorwerte hinsichtlich ihrer Umweltwirkung ausgewertet und verglichen werden. Grundsätzlich kann, wie Abb. 2.1 zu entnehmen, jeder der Prozessmodule des LCAs bei der Interpretation beitragen. In der anfänglichen Definition ist das Abstecken der Systemgrenze maßgebend für

die Bewertung. Weiterführend dient die Sachbilanz als sehr transparenter Einblick in die Elementarflüsse des Produktsystems, welche mittels der Wirkungsabschätzung einzeln in das Verhältnis der ökologischen Auswirkung des gesamten Systems gesetzt werden kann. So können gezielt gehaltvolle Faktoren während der Produktion und Nutzung des Produktsystems identifiziert und gegebenfalls angepasst werden. [15]

In der Methode des LCAs gibt es verschiedene Modellierungsansätze. Es wird unter den Systemgrenzen des Lebenszyklus unterschieden. Es gibt so genannte Cradle-To-Grave, Cradle-To-Gate, Gate-To-Gate und Cradle-To-Cradle Analysen. Cradle-To-Grave, dt. von der Wiege bis zum Grab, beschreibt einen allgemeinen Lebenszyklus eines Produktsystems von Rohstoffgewinnung, über Herstellung, Transport, Nutzung bis hin zur Entsorgung. Cradle-To-Gate, bezeichnet eine einfache Betrachtung von der Rohstoffgewinnung bis zu einer ausgwählten Lebenszyklusphase wie der Produktion. Dabei ist der Beginn als Cradle festgeschrieben, jedoch das Gate flexibel auf verschiedene Abschnitte des Lebenszyklus anwendbar. Gate-To-Gate Analysen beschreiben nur einzelne Teilschritte des Lebenszyklus wie z.B. den Prozess der Montage. Eine Cradle-To-Cradle Analyse bezieht sich auf den Ansatz der Kreislaufwirtschaft. Dabei beinhaltet diese Betrachtungsweise dieselben Prozesse wie der Cradle-To-Grave Ansatz. Es wird davon ausgegangen, dass bei dem Entsorgungprozess die Werkstoffe wiederverwendbar gemacht und wieder im Prozess der Rohstoffgewinnung genutzt werden können. [2]

Neben den genannten Modellierungsansätze gilt es zwischen dem attributionellen (attributional LCA, ALCA) und dem folgerichtigen LCA (consequential LCA, CLCA) zu unterscheiden. Der attributionelle Ansatz ist ein Modellierungsansatz, bei dem Inputs und Outputs der Prozessmodule nach normativen Allokationsregeln der funktionalen Einheit eines Produktsystems zugeordnet werden. Der folgerichtige Ansatz ist ein Modellierungsansatz, bei dem die Aktivitäten innerhalb eines Produktsystem so miteinander verknüpft werden, dass sie in dem Maße in das System einbezogen werden, wie sie sich voraussichtlich ändern werden. Das ALCA zielt auf die Beschreibung der umweltrelevanten physikalischen Ströme in und aus dem Lebenszyklus und dessen Subsysteme des Produktsystems ab. Das CLCA hingegen hat das Ziel, zu beschreiben, wie sich umweltrelevante Flüsse als Reaktion auf mögliche Entscheidungen verändern werden. [23]

Eine Validierung der durchgeführten Bewertung ist für eine wissenschaftliche Untersuchung unanbdingbar. Auch in ISO 14044 wird eine Datenvalidierung im Rahmen des LCA festgeschrieben. Dabei kann die Validierung z.B. „die Erstellung von Massenbilanzen, Energiebilanzen und/oder vergleichende Untersuchungen von Emissionsfaktoren umfassen“ [15]. In Oberkampf et al. [62] wird basierend auf der Arbeit von Schlesinger et al. [69] der in Abb. 2.3 dargestellte Validierungsrahmen vorgestellt. Das Validierungskonzept besteht aus drei Teilen: der Qualifizierung, der Verifizierung und der Validierung dea Modells [62]. Bei einer Modellierung wird durch die Analyse der Realität ein konzeptionelles Modell erstellt, was wiederum durch Programmierung und mathematische

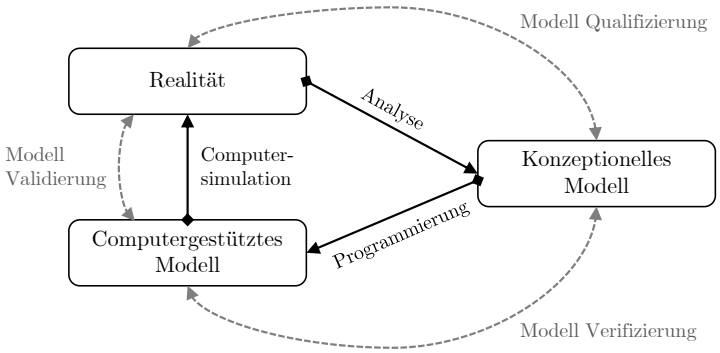


Abbildung 2.3: Validierungsrahmen nach Oberkampf et al. [62] und Schlesinger et al. [69]

Beschreibungen in ein computergestützes Modell überführt wird. Das computergesützte Modell simuliert die Realität und soll dabei ein möglichst genaues Abbild dieser schaffen. Der Validierungsrahmen dient dazu zwischen den drei Bereichen der Realität, dem konzeptionellen- und dem computergesützten Modell jeweils ein möglichst genaue und konsistente Umsetzung zu gewährleisten. [62, 69]

2.1.2 Lebenszykluskostenrechnung

Die beschriebenen Aspekte des LCAs beinhalten nur die ökologische Bewertung des Produktsystems. Zur Bestimmung der Ökoeffizienz fehlt weiterhin der ökonomische Einfluss. Dieser kann ebenso mithilfe der für die Sachbilanz des LCAs erhobenen Daten bestimmt werden. Eine potentiell anwendbare Methode kann dafür die Lebenzykluskostenrechnung, auch Life Cycle Costing Analysis (LCCA) genannt, sein. Die LCCA ist ähnlich dem LCA ein wichtiges Instrument für Entscheidungsträger:innen, um die Ökoeffizienz eines Produktsystem zu ermitteln [60]. Trotz das sich beide Methoden ähneln und das LCCA auf dem LCA basiert, sind beide aufgrund ihrer verschiedenen Zielsetzungen, als unterschiedliche Methoden der Entscheidungshilfe anzusehen [54]. Im Folgenden werden zwei Methoden vorgestellt, mit denen eine LCCA durchgeführt werden kann. Beide Methoden haben einen gleichen „bottom up“ Ansatz. Bottom Up bezeichnet dabei von der untersten Ebene eines Systems bzw. von den kleinsten Details aus, das System zu betrachten.

Materialflusskostenrechnung

Eine für die LCCA nutzbare Methode ist die Materialflusskostenrechnung (MFKR) [70]. Sie ist in der DIN EN ISO 14051 definiert. Ähnlich dem LCA ist die MFKR ein Managementinstrument, welches Entscheidungsträger unterstützen kann, ökologische und ökonomische Aspekte der Produktion oder Verwendung von Produkten besser zu verstehen, um mögliche Verbesserungspotenziale ausfindig zu machen. Dabei liegt die Kernkompetenz dieser Methode eher darauf die ökonomischen Aspekte zu bewerten. Jegliche Kosten

die durch Material- oder Energieflüsse entstehen oder damit einhergehen, werden in der MFKR quantifiziert und den jeweiligen Kategorien bzw. Prozessen zugeordnet. Dabei konzentriert sich die Methode auf den Vergleich von Kosten, die den Produktionsprozessen des Produkts zurückzuführen sind und Kosten, die mit Materialverlusten sowie sonstigen Verlusten einhergehen. Ähnlich dem LCA werden Material- und Energieflüsse (Elementarflüsse) innerhalb eines Produktsystems und dessen Systemgrenze erfasst, in physikalischen Einheiten quantifiziert und deren jeweilige Kosten ermittelt. Diese Kosten werden per Allokation dem jeweiligen Produkt oder Prozessmodul zugeordnet. Das Ergebnis der Kostenrechnung ist ein ganzheitliches, transparentes kostentechnisches Bild über Material und Energieverbräuche des zu untersuchenden Produktsystems. Als bottom-up Methode können die einzelnen Inputs den Prozessen und schließlich dem finalen Produkt zugeordnet werden. [17]

Das im LCA erstellte Modell kann samt seiner Systemgrenze für die MFKR verwendet werden. Die zu untersuchenden Material- und Energieflüsse sind bereits in der Sachbilanz erhoben. Die Daten der Sachbilanz müssen aus ihren physikalischen Werten in monetäre Einheiten übersetzt werden. Nach der Allokation erhält man das gewünschte Ergebnis. Zuletzt soll der Unterschied zwischen MFKR und konventioneller Kostenrechnung (KKR) erklärt werden. Dieser liegt wesentlich in der Betrachtung der Kosten für Materialverluste und Ineffizienzen. Die KKR ordnet alle Material- und Prozesskosten dem Produkt zu. Die Materialverlustkosten stecken somit in den Materialkosten, werden jedoch nicht eigenständig gelistet. Kosten für Materialverlust und Abfallmanagement werden so entweder in Produkt- oder übergeordneten Kosten integriert. Die MFKR zeigt hingegen sämtliche Kosten als einzeln deklarierte Kostenpunkte auf und schafft so mehr Transparenz und Bewusstsein für Prozesseffizienzen. [17]

Prozesskostenrechnung

Neben der MFKR gibt es ein weiteres Modellierungsverfahren der Kostenrechnung. Das Verfahren wird als Prozesskostenrechnung bezeichnet und basiert auf der Methode des Activity Based Costing (ABC). In der ABC-Methode werden alle Aktivitäten innerhalb der Organisation zur Herstellung eines Produkts identifiziert und die Kosten jeder Aktivität den jeweiligen Produkten entsprechend ihres Verbrauchs zugeordnet [7]. Dabei werden nach diesem Modell im Gegensatz zur konventionellen Kostenrechnung vermehrt indirekte Kosten (Gemeinkosten) in direkte Kosten der Produktsysteme verrechnet. Ähnlich der MFKR ist sie eine bottom-up Methode. Die ABC wird als ein Ansatz zur Berechnung und Überwachung von Aktivitäten eines Produktsystems gesehen, welcher zusätzlich den gesamten Ressourcenverbrauch und die Endkosten mit einbezieht [35]. Nach vermehrter Kritik und Schwierigkeiten der Implementierung der Methodik, wurde die ABC von Kaplan et al. [49] durch die Time-Driven Activity-Based Costing aktualisiert. Dabei werden nur die zwei Hauptaspekte, die Stückkosten und die benötigte Zeit für eine Aktivität, betrachtet. Dies soll zu einer schnelleren, vereinfachteren Anwendung

und Flexibilität der Methode beitragen [49]. Dennoch gibt es weiterhin Unklarheiten über eine klare Definition des ABC und dessen Anwendung. Studien zeigen, dass die ABC trotz der Tatsache, dass sie von konzeptionellen Gesichtspunkten eine attraktive Methode darstellt und in vielen Lehrbücher Einzug erhielt, in der Praxis aufgrund der bestehenden Schwierigkeiten und Konfusion wenig Anwendung findet [35]. Dennoch bietet sie für Fallstudien und vereinzelte Analysen einen sehr guten Ansatz, die Kosten eines Prozesses zu modellieren, wodurch die ABC immer noch verwendet wird [6, 39, 54, 84].

Die Prozesskostenrechnung entspricht der ABC, nur werden die einzelnen Aktivitäten zu Prozessen zusammengefasst. Zur Anwendung des Modells wird ein Produktionsprozess definiert, welcher alle relevanten Werkzeuge, Maschinen, Arbeitskräfte, Materialien, etc. beinhaltet. Dieser Prozess wird dann in einzelne, quantifizierbare Aktivitäten aufgeteilt und wiederum deren Inputs ermittelt. Mithilfe der Inputparameter, welche Arbeitskräfte, Materialkosten, Gerätekosten, Energieverbrauch, aber auch Taktzeiten, Produktionsvolumen, Ausfallrate und Gemeinkosten beinhalten, wird die Kostenschätzung bzw. -rechnung durchgeführt. Die Inputs können zusätzlich die Maschineninstallation, Wartung und sonstige Kosten einbeziehen. Aus den gesammelten Kosten der einzelnen Aktivitäten werden die Gesamtkosten des Produktionsprozesses berechnet. Die finalen Stückkosten können dann als Funktion des Produktionsvolumens, mit einer Aufteilung der Gesamtkosten auf den relativen Beitrag der jeweiligen Inputs, dargestellt werden. [81, 84]

2.2 Indikatoren der Ökoeffizienz in der Montage von Faserverbundwerkstoffen

Indikatoren sind Kennzahlen, quantifizierbare Messgrößen, die Aussage über die Entwicklung oder über Zustände von Untersuchungsgegenständen erlauben. Indikatoren gelten als Wegweiser für Entscheidungsträger, da sie Sachverhalte komplexer Systeme in einschlägigen Kennwerten festschreiben und so vereinfachte Abbilder der Wirklichkeit darstellen. Es gibt dementsprechend für alle Bereiche der Industrie Indikatoren für verschiedenste Themen. Der folgende Abschnitt beschäftigt sich mit der ökologischen und ökonomischen Bewertung von Produktionsprozessen, was ein Teilgebiet der Nachhaltigkeitsentwicklung darstellt.

2.2.1 Ökologische Indikatoren

Bereits seit Beginn der 1990er Jahre gab es erste Bemühungen der United Nations Commission for Sustainable Standards und United Nations Commission for Sustainable Development ein einheitliches und ganzheitliches System zur Prüfung von Prozessen auf deren Nachhaltigkeit zu erstellen [78]. Seitdem gab es viele Ansätze und Arbeiten zur Definierung der Indikatoren, wodurch sich ein internationaler Konsens gebildet hat,

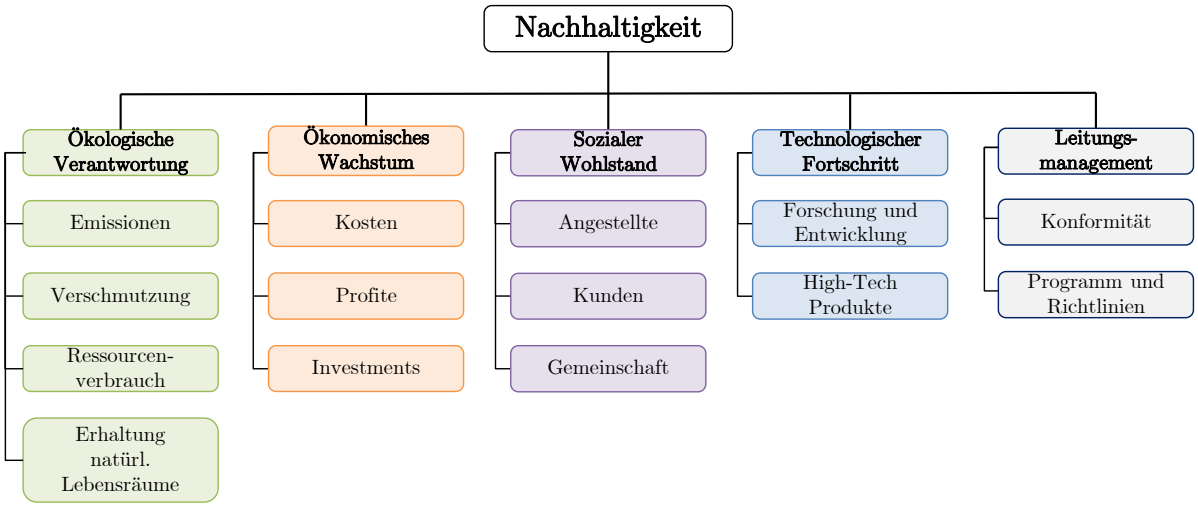


Abbildung 2.4: Klassifizierung der Nachhaltigkeitsindikatoren nach Joung et al. [46]

der sich in den verbreiteten Methoden der LCIA widerspiegelt [32, 36, 41, 44]. Auch auf nationaler Ebene wurde durch das Bundesamt für Mensch und Umwelt (UBA) ein Umwelt-Kernindikatorsystem zur Bilanzierung von Nachhaltigkeitsstrategien entwickelt, worin die wichtigsten Indikatoren für Umweltthemen und für wirtschaftliche Akteure festgelegt sind [71]. In den Umweltthemen sind darin mit den Kategorien Klimaveränderung, Luftverunreinigung, Flächeninanspruchnahme, Bodendegradation, Beeinträchtigung des Grundwassers, Beeinträchtigung von Binnen- und Küstengewässern, Verlust Biologischer Vielfalt und Beeinträchtigung der menschlichen Gesundheit insgesamt 49 Indikatoren aufgelistet. Für die wirtschaftlichen Akteure folgen 42 weitere.

In Joung et al. wurde eine ausführliche Literaturrecherche zu den Nachhaltigkeitsindikatoren in Produktionsprozessen erstellt [46]. Darin wird eine Kategorisierungsstruktur für Indikatoren (siehe Abb. 2.4) vorgeschlagen, welche sich in Umweltschutz, Wirtschafswachstum, sozialer Wohlstand, technischer Fortschritt und Leistungsmanagement gliedert. Da die Datenerhebung zur Ermittlung einzelner Indikatoren mit teils großem Aufwand verbunden ist, wird sich diese Arbeit nur mit einer ausgewählten Anzahl von Indikatoren beschäftigen.

Die Auswahl der ökologischen Indikatoren hängt auch maßgeblich von der Anwendbarkeit innerhalb des LCAs ab. Wie zuvor beschrieben, werden im LCIA die Elementarflüsse in Wirkungsindikatorwerte umgerechnet. Dementsprechend müssen die Indikatorwerte in der jeweils angewandten Wirkungsabschätzungmethode definiert sein. Die verschiedenen LCIA-Methoden sind im Handbuch des internationalen Referenzlebenszyklusdatensystems der European Platform on Life Cycle Assessment [25] aufgeführt. Zu den verbreitetsten Methoden zählen Eco-Indicator 99 von Goedkoop et al. [33], CML

Abbildung 2.5: Übersicht der Wirkungsindikator Kategorien der ReCiPe2008 Methode [41]

2002 von Guinée et al. [36], Impact 2002+ von Jolliet et al. [44] und ReCiPe entwickelt von Goedkoop et al. [32, 41]. Die Methoden ähneln sich in vielen Aspekten und basieren teilweise aufeinander. Während alle fast einheitliche Indikatoren auf Midpoint-Level haben, gibt es grundlegende Unterschiede in den Endpoint Faktoren bzw. deren Berechnung [26]. Midpoint-Indikatoren bezeichnen durch Charakterisierungsfaktoren (CF) zusammengefasste Stoffflüsse. Diese sind nicht Resultat schädlicher Umweltwirkungen, sondern können jene auslösen. So ist zum Beispiel die Emmission von Treibhausgas wie CO_2 nicht direkt schädlich, sondern die Treibhauswirkung die damit einhergeht. Endpoint-Indikatoren wiederum bezeichnen potenziell schädliche Wirkungen als Ergebnisindikatoren wie z.B. die menschliche Gesundheit oder die Gesundheit des Ökosystems.

Im Folgenden soll nur auf einzelne Midpoint-Wirkungsindikatoren der ReCiPe2008 Methode eingegangen werden. Die Indikatoren sind in Abb. 2.5 dargestellt. In der Methode sind achtzehn Midpoint- und drei Endpoint-Kategorien definiert. Viele der dort aufgeführten Indikatoren der Midpoint-Kategorien sind auch in den Nachhaltigkeitsindikatoren des UBAs wiederzufinden. Sie sind in Tab. 2.1. Zu den Endpoint-Wirkungsindkatoren

zählen Schaden an menschlicher Gesundheit, Schaden an Ökosystemen und Schaden an Ressourcenverfügbarkeit. Die oben genannten Midpoint-Kategorien sind samt ihrer CF und Einheiten Tab. 2.2 zu entnehmen. Bei den dargestellten Einheiten kann es leicht zu Verwirrung kommen, da es so scheint, als seien sie doppelt deklariert. Die in Tab. 2.1 dargestellten Maßeinheiten für die Indikatoren der Wirkungskategorien sind die Einheiten des durch die Indikatoren modellierten physikalischen oder chemischen Phänomens. Dahingegen sind die Einheiten der Wirkungskategorien in Tab. 2.2 die Maßeinheiten der Indikatorergebnisse. Für die jeweiligen Kategorien wurde zur einfacheren Zuordnung Referenzsubstanzen eingeführt, sodass die CF dimensionlose Einheiten darstellen. So ist z.B. das GWP in CO_2 angegeben, was die Stärke eines Kilogramm eines Treibhausgases im Verhältnis zu einem Kilogramm CO_2 in der Luft ausdrückt. Obwohl es sich bei dem Indikator um den Infrarot(IR)-Strahlungsantrieb handelt, wird bei der Midpoint-Berechnung nicht die zugehörigen W·a/m^2, sondern kgCO_2-Eq berechnet. Dieses Vorgehen ist wichtig für die spätere Verknüpfung von Midpoint- zu Endpoint-Kategorien.

In dieser Arbeit werden statt der Indikatoren, wie z.B. „Okkupation“, die Wirkungskategorien der Indikatoren „ALO“ oder deren CF „ALOP“ benannt. Dadurch sind die Wirkungsindikatoren ihren jeweiligen Kategorien eindeutig zuzuordnen. Neben der beschriebenen Mid- und Endpoint-Indikatoren gibt es drei weitere Kategorien, in die die Indikatoren aufgegliedert werden. Diese Kategorien beschreiben die Perpektive mit der die Umweltmechanismen ablaufen. Dazu gehören die individualistische, die hierarchische und die egalistärische Perspektive. Sie bestimmen primär die Berechnung der Endpoint-Indikatoren aus den Midpoint-CF, bringen jedoch auch geringe Änderungen in den Midpoint-CF mit sich.

Tabelle 2.1: Übersicht der Midpoint-Kategorien und ökologischen Wirkungsindikatoren nach ReCiPe2008(v1.13) [32]

Wirkungskategorie		**Indikator**	
Name	**Abk.**	**Name**	**Einheit***
Landwirtschaftl. Landnutzung	ALO	Okkupation	m^2·a
Klimawandel	CC	Infrarot-Strahlungsantrieb	W· a/m^2
Schwund fossiler Rohstoffe	FD	unterer Heizwert	MJ
Süßwasser Ökotoxizität	FET	gefahrgeneigte Konzentration	m^2·a
Süßwasser Eutrophierung	FE	Phosphor-Konzentration	a·kg/m^3
Humantoxizität	HT	gefahrgeneigte Dosis	-
Ionisierende Strahlung	IR	absorbierte Dosis	man·Sv
Meeresökotoxizität	MET	gefahrgeneigte Konzentration	m^2· a
Meereseutrophierung	ME	Stickstoff-Konzentration	a·kg/m^3
Schwund mineral. Rohstoffe	MRD	Gehaltsabnhame	kg^{-1}
Umwandlung natürl. Flächen	NLT	Transformation	m^2
Ozonabbau	OD	stratosphär. Ozon-Konzentration	ppt†· a

Fortsetzung auf nächster Seite

Tabelle 2.1 – Fortsetzung von vorheriger Seite

Wirkungskategorie Name	Abk.	Indikator Name	Einheit*
Bildung von Feinstaub	PMF	PM10 Aufnahme	kg
Bildung photochem. Oxidantien	POF	photochem. Ozon-Konzentration	kg
Terrestrische Versauerung	TA	Basensättigung	a·m^2
Terrestrische Ökotoxizität	TET	gefahrgeneigte Konzentration	m^2· a
urbane Landnutzung	ULO	Okkupation	m^2· a
Wasserverarmung	WD	Wassermenge	m^3

* Die Einheit des Indikators ist hier die Einheit des modellierten physikal./chem. Phenomens.
† Die Einheit ppt bezieht sich auf Einheiten äquivalenten Chlors.

Climate Change

Der Klimawandel stellt eine der größten Herausforderungen für den Menschen im 21. Jahrhundert dar. Laut dem International Panel on Climate Change (IPCC) stellt der menschengemachte Anstieg der Treibhausgaskonzentration die stärkste Ursache der beobachteten Erwärmung seit Mitte des 20. Jahrhunderts dar [75]. Unter den Treibhausgasen ist CO_2 das wohl Bekannteste und wird in Politik und Wirtschaft gern und häufig als Schlagwort und Politikum verwendet. In der Kategorie climate change ist der korrespondierende Indikator das Global Warming Potential (GWP) mit einer Einheit von Kilogramm CO_2 Äquivalenten (kgCO_2-Eq). Der Wirkmechanismus des Klimawandels ist der Strahlungstrieb (radiative forcing), welche die Emission von Treibhausgasen in der Atmosphäre erhöhen. In dieser Kategorie werden die jeweiligen GWP der emittierten Treibhausgase berechnet und zu einem gemeinsamen Wert aufsummiert. Basis für die Berechnung des GWPs ist der IPCC 2001 Report 3. [32, 41]

Tabelle 2.2: Übersicht der Midpoint-Kategorien und CF nach ReCiPe2008(v1.13) [32]

Wirkungskategorie Abk.	Einheit*	CF Name	Abk.
ALO	m^2· a	Okkupationspotential landwirtschaftl. Flächen	ALOP
CC	kg CO_2-Eq	Klimaerwärmungspotential	GWP
FD	kg oil-Eq	fossiles Brennstoffpotential	FDP
FET	kg 1,4-DC.	Süßwasser Ökotoxizität-Potential	FETP
FEP	kg P-Eq	Süßwasser Eutrophierungspotential	FEP
HT	kg 1,4-DC.	Humantoxizitätspotential	HTP
IR	kg U235-Eq	Potential für ionisierende Strahlung	IRP
MET	kg 1,4-DB.	Meeresökotoxizitätpotential	METP
ME	kg N-Eq	Meereseutrophierungspotential	MEP
MRD	kg Fe-Eq.	Minealverarmungspotential	MDP
NLT	m^2	Transformationspotential natürl. Flächen	NLTP

Fortsetzung auf nächster Seite

Tabelle 2.2 – Fortsetzung von vorheriger Seite

Wirkungskategorie		CF	
Abk.	**Einheit***	**Name**	**Abk.**
OD	kg CFC-11	Ozonabbaupotential	ODP
PMF	kg PM10-Eq	Feinstaubbildungspotential	PMFP
POF	kg NMVOC	Bildungspotential von photochem. Oxidantien	POFP
TA	kg SO_2-Eq	terrestrisches Versauerungspotential	TAP
TET	kg 1,4-DC.	terrestrisches Ökotoxizitätspotential	TETP
UL	$m^2 \cdot$ a	Okkupationspotential urbaner Flächen	ULOP
WD	m^3	Wasserverknappungspotential	WDP

* Die Einheit der Wirkungskategorie ist hier die Einheit des Indikatorergebnisses.

Kumulierter Energiebedarf

Als weiteren Indikator, unabhängig von den ReCiPe-Wirkungindikatoren, ist der kumulierte Energiebedarf oder auch Cumulative Energy Demand (CED) für die Bewertung ausgewählt worden. Während die Indikatoren der ReCiPe Methode induzierte physikalische und chemische Wirkmechanismen des Ökosystems beschreiben, ist der CED eine Vergleichgröße bzw. eine Kennzahl für den Energiebedarf eines Produktsystems, kumuliert über dessen gesamten Lebenszyklus. Der CED wird in Megajoule Öl-Equivalent (MJ-Eq.) angegeben und beinhaltet alle direkten und indirekten Energieressourcen, die von den im System enthaltenen Elementarflüssen und Prozessen verwendet worden sind [4, 30]. Da die Produktion von Faserverbundwerkstoffen mit hohem Energieverbrauch verbunden ist, fand der Indikator bereits in verschiedenen LCA-Studien Verwendung [4, 9, 18]. Der CED kann als allgemein gültiges Maß für den Energiebedarf eines Produkts bzw. Produktsystems angesehen werden. Aufgrund der Tatsache, dass der Energieverbrauch unabhängig von genutzten Materialien und Prozessarten in nahezu jeder Produktion unabdingbar ist, ist der CED ein universal einsetzbarer Wert um Prozesse verschiedenster Art ökologisch zu vergleichen. Innerhalb des CEDs wird zwischen den unterschiedliche Energiequellen unterschieden. Dazu zählen fossile-, geothermische-, nukleare-, Solar-, Wasser- und Wind-Energie sowie Energie aus Biomasse und Primärwaldbiomasse. Je nach Strom- bzw. Wärmemix des produzierenden Betriebs setzen sich die Anteile verschieden zusammen. Alle Energiearten haben jedoch dieselbe Einheit MJ-Eq. und lassen sich zu einem einzigen Faktor addieren.

2.2.2 Ökonomische Indikatoren

Der ökonomische Sinn eines Produkts liegt in der monetären Wertschöpfung. Güter werden produziert, um sie gegen Währung einzutauschen. Der Abb. 2.4 ist zu entnehmen, dass sich ökonomisches Wachstum nach Joung et al. aus den Kategorien Kosten, Profit und Investitionen zusammensetzt [46]. Der Profit, der mit einem Produkt erwirtschaftet wird, ist abhängig vom Markt, der Abnahme des Produkts und vielen weiteren Fak-

toren. Es ist schwierig den Profit aus einer Untersuchung an einem Forschungsinstitut zu quantifizieren, wenn dieses aus Großteilen von öffentlichen Fördermitteln finanziert und nicht am freien Markt gehandelt wird. Kosten betreffen alle getätigten Ausgaben für Elementarflüsse des Produktsystems. Die MFKR und ABC sind mögliche Methoden alle Kosten des Systems zu bestimmen und den Flüssen zuzuordnen. So fallen neben reinen Material- und Energiekosten weitere Kosten wie die für Arbeitskraft, Raummiete bzw. Anteile der Gebäudebaukosten oder des Gebäudekaufs, Abfallmanagement, etc. an. Unter Investments werden im Rahmen der Produktionsprozesse von Faserverbundbauteilen, Investitionen in Werkzeuge und Technologie verstanden. Diese Investitionen können ähnlich den Materialien in Kosten übersetzt werden. Lediglich deren Allokation ist komplexer und aufgrund der Verwendung in mehreren Prozessen und auch Produktsystemen, ist deren Zuordnung nicht immer eindeutig.

2.3 Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM)

Das Eco-Efficiency-Assessment-Model (EEAM) ist ein Entscheidungsunterstützungstool, das als aktivitätenbasiertes bottom-up Bewertungsmodell zur Beurteilung des CO_2-Fußabdrucks und der Direktkosten (DC) eines untersuchten Produktsystems Anwendung findet. Es wurde am Deutschen Zentrum für Luft und Raumfahrt (DLR) e.V. aus dem Bedarf an einem integrierten System, welches LCA, Geschäftsprozessneugestaltung und Entscheidungshilfe für Fertigungsprozesse beinhaltet, entwickelt. Ziel der Anwendung ist es, alle drei genannten Aspekte zu vereinen und den Umgang mit jenen Themen für Entscheidungsträger:innen zu vereinfachen. Das abstrakte Modell auf dem das EEAM basiert, besteht aus der definierten Grundstruktur des LCAs (siehe Abb. 2.1). Der detaillierte konzeptionelle Ansatz ist der Arbeit von Al-Lami et al. [54] zu entnehmen. In der Praxis wurde das Konzept mithilfe eines computergestützten Modells realisiert. Es beinhaltet repräsentative mathematische Algorithmen, die Sachbilanz und Wirkungsabschätzung verbinden. Vereinfacht wird jeder Elementarfluss mit der Formel 2.1 berechnet [54].

$$Prozessparameter(x) \cdot CF(x) = Auswirkung(x) \tag{2.1}$$

Drei der etabliertesten LCA-Softwares sind GaBi, Umberto und SimaPro. Alle drei sind Entscheidungshilfe-Tools, mit welchen das LCA des gesamten Lebenszyklus eines Produkts erstellt werden kann. Dazu werden die Prozesse innerhalb der Software modelliert, Elementarflüsse den Prozessen zugeordnet und eine ökologische Bewertung erstellt. Innerhalb der Umberto-Software können zusätzlich ökonomische Bewertungen generiert werden. Alle drei Programme benutzen für die Bewertung eigene Datenbanken, darunter die GaBi-Datenbank und EcoInvent-Datenbank [1]. Beide beinhalten Einträge zu Elementarflüssen und Produktsystemen mit ihren jeweiligen Umwelt-CF für verschiedene LCIA-Modelle.

Es gibt wesentliche Unterschiede in der Erstellung von LCAs und LCCAs unter Nutzung des EEAMs, auch wenn die Aufgabe des EEAMs ähnlich der anderen entscheidungsunterstützenden Tools ist. Aufgrund der recht jungen Entwicklungsstufe des Modells sind bisher nur vereinfachte Cradle-To-Gate Bewertungen möglich. Zusätzlich bewertet das EEAM nur die Indikatoren GWP nach Impact2002+ [44] und DC, wohingegen in anderen Softwares ein breiteres Spektrum an ökologischen Indikatoren möglich ist. Während die drei genannten Tools zu Erstellung von LCAs in verschiedensten Industrie- und Produktsparten genutzt werden, ist das EEAM speziell für den Einsatz bei der Fertigung von Faserverbundplastik erstellt worden. Es bietet den Vorteil detaillierter Bewertung und Anpassbarkeit der Prozesse und Fertigungstechniken. Ebenso besitzt das EEAM eine eigene Datenbank, in welcher inzwischen über 840 verschiedene anwendungspezifische Elementarflüsse definiert sind.

Funktionsweise

Die Funktionsweise des EEAMs ist Abb. 2.6 zu entnehmen. Das EEAM bildet die Schnittstelle verschiedener Datenquellen zur Erstellung des LCAs. Zu Beginn der Anwendung steht eine Exceltabelle mit generischer Stuktur. In EEAM sollen mithilfe von Exceltabellen die zu bewertenden Prozesse dokumentiert werden. Diese einzelne Tabelle wird von der EEAM-Software generiert und beinhaltet alle in der Datenbank gelisteten Elementarflüsse. Neben den Kategorien, IDs und Namen der Elementarflüsse, welche automatisiert in die Zellen geschrieben werden, existieren drei weitere leere Spalten für Zeit-, Mengen- und Energieeinträge. Diese sollen später mit gemessenen Prozessparametern gefüllt werden. Es werden Exceltabellen als Schnittstelle zwischen Inputparametern und Programm verwendet, da diese als benutzerfreundliches und weitverbreitetes Format gelten, welches auch Arbeiskräfte ohne Programmiererfahrung handhaben können. Vor der Anwendung EEAMs wurden die zu bewertenden Prozesse modelliert und gemäß der Modellierung in verschiedene Prozessmodule (Unit Process, UP) eingeteilt. Je definiertem UP gibt es, im Sinne der Übersichtlichkeit, eine Exceltabelle. Sie beinhaltet die Parameter für die Sachbilanz des einzelnen Fertigungsschritts. Der/Die Benutzer:in misst während des Prozesses die Parameter und dokumentiert diese in den Tabellen. Nach Ausfüllen der Tabellen müssen diese nur noch in den Programmordner geladen und die Software gestartet werden.

Die ökologischen und ökonomischen CF der Elementarflüsse werden vorher anhand von Angaben aus Literaturquellen, Zulieferern und internen Untersuchungen ermittelt und in die Datenbank eingepflegt. Die Erstellung der Exceltabellen, das Datenmanagement und die Bewertung des Prozesses werden durch die Python-basierte Software realisiert. Bei Ausführung des Programms werden die Eingabedaten ausgelesen und nach den Kategorien Materialien, Arbeitskraft, Einrichtung, Gerätschaft und Nebenprodukte sortiert. Die ausgelesenen Prozessparameter der Elementarflüsse werden ihren Datenbankeinträ-

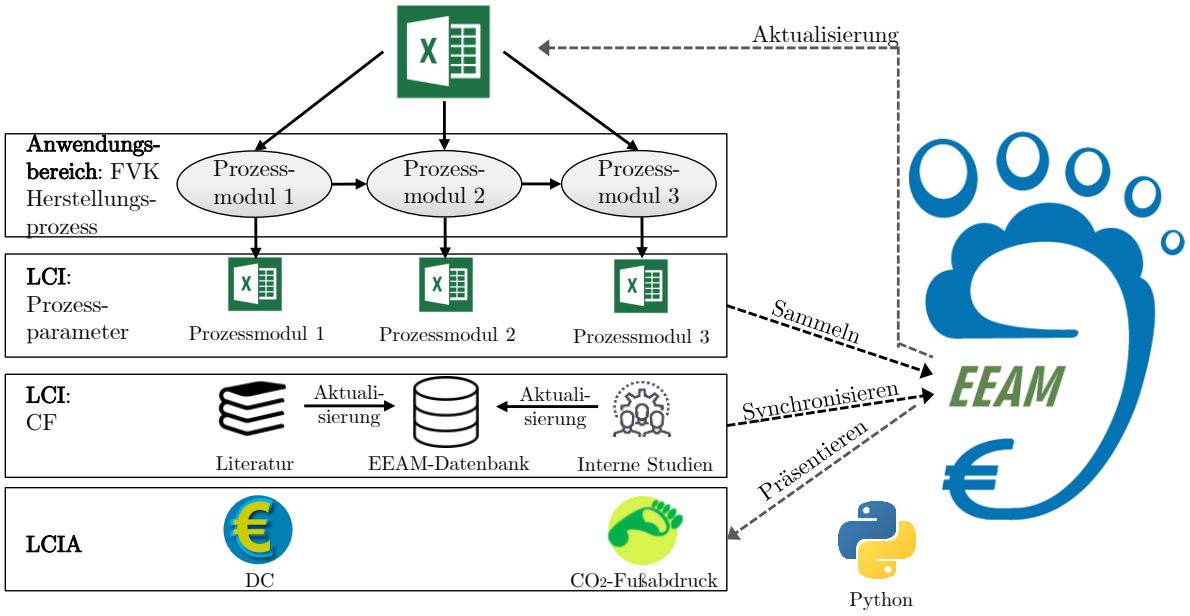


Abbildung 2.6: Funktionsweise des EEAMs nach Al-Lami et al. [54]

gen zugeordnet und mit jeweiligen CF verrechnet, was dem LCIA entspricht. Als Output resultieren der Kohlenstofffußabdruck als Wirkungsindikator des CCs und die DC. Die Resultate der Bewertung werden wieder als Exceltabelle exportiert sowie in Form von Diagrammen geordnet und nach UP und Elementarfluss-Kategorie visualisiert.

2.4 Montage der Faserverbundwerkstoffe

Die wichtigsten Faktoren bei der Konzeption von Leichtbau-Komponenten sind der Kraftflussverlauf, die Eigenschaften der Werkstoffe, Umgebungsbedingungen, Sicherheitsanforderung, Zuverlässigkeit der Fügungen und die Möglichkeit der Fertigung. Bei der Realisierung der Bauteile wird dabei in der Produktion zwischen Integral- und Differentialbauweise unterschieden. Bei der Differentialbauweise werden Baugruppen in mehreren, einfach gestalteten Einzelteilen gefertigt und additiv durch Fügetechnologie zusammengeführt, während bei der Integralbauweise eine Minimierung von Einzelteilen angestrebt wird. Dies wird durch das Konzept der Einstückigkeit realisiert. [51]

Die wesentlichen Vorteile der Differentialbauweise liegen in der Kombinationsmöglichkeit verschiedener Werkstoffe, vereinfachtem späteren Recycling, guter Fail-Safe-Qualitäten und partieller Reperaturmöglichkeit. Der größte Nachteil liegt in möglichen Kerbwirkungen in den Verbindungsstellen, sowie in dem zusätzlichen Verbindungsgewicht. Bei der Integralbauweise hingegen können Minimalgewichte erreicht werden. Wesentliche Nachteile sind jedoch die Begrenzung des Materialeinsatzes, die höheren Werkstoff- und Werk-

zeugkosten, schlechtes Schädigungsverhalten und die erschwerte Wartung. Der Trend hin zum Ultraleichtbau sowie zur stetigen Prozessoptimierung, fordert zunehmend höhere Integrationgrade der Bauteile. Dennoch kann am Beispiel der Luftfahrtindustrie kein gesamtes Flugzeug aus einem Teil gefertigt werden. Das Zusammenführen einzelner Bauteile und Baugruppen ist deswegen unabdingbar. [51]

Diese Arbeit befasst sich mit der Montage von Faserverbundwerkstoffen. Dabei werden vorwiegend FVK betrachtet. FVK bezeichnen eine moderne Werkstoff-Klasse, die sich aus einer Kombination aus Faser- und Matrix-Material zusammensetzt. Das Zusammenspiel aus der Fasermatrix mit hoher Festig- und Steifigkeit und der umfassenden, weniger spröden Kunststoffmatrix ermöglicht einen innovativen Leichtbauwerkstoff, der aufgrund seiner niedrigen Dichte und guten mechanischen Eigenschaften in hoch belastbaren Bauteilen für Weltraum-, Flug-, und Automobilindustrie vorwiegend Anwendung findet. Innerhalb der FVK gibt es eine gewisse Bandbreite an Variationsmöglichkeiten des Faser- sowie Matrixmaterials, der Schichtzahl und Faserorientierung, um maßgeblich die mechanischen Eigenschaften des Bauteils zu beeinflussen und je nach Anwendungsfall anzupassen. Eine der bekanntesten Verbundstoffe ist kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff (CFK). [19]

Der Begriff der Montage beinhaltet nach VDI 2860 die Gesamtheit aller Vorgänge für den Zusammenbau von Körpern mit geometrisch bestimmter Form [56]. Dabei setzt sich die Montage aus den Teilprozessen des Fügens, der Handhabung, des Prüfens, des Justieren und zusätzlicher Hilfsoperationen zusammen. Der Schwerpunkt der Arbeit soll dabei auf dem Teilprozess des Fügens liegen, da dieser neben dem Prüfen den zeitintensivsten und arbeitsaufwändigsten Montageprozess darstellt.

2.4.1 Montagetechnologien

Nach DIN 8589 findet sich die Montage mit dem „Fügen“ in der vierten Hauptgruppe. Das Fügen selbst wird wiederum in weitere neun Untergruppen aufgeteilt. In Abb. 2.7 werden die für die für FVK möglichen und für Montage relevanten Fügeverfahren nach DIN 8539-0 dargestellt [12]. Um die mechanischen Eigenschaften der FVK optimal nutzen zu können, müssen die charakteristischen Eigenschaften und der Aufbau des Werkstoffs bei der Auswahl des Fügeverfahrens berücksichtigt werden. Oft kommt im Leistungsprofil der Auswahl der Fügetechnik die gleiche Bedeutung, wie der Leistungsfähigkeit des Werkstoffs selbst zu [19]. Das Verfahren kann grundsätzlich aufgrund der Art des Matrix-Materials gewählt werden. So können Bauteile mit thermoplastischer Matrix mechanisch gefügt, geschweißt und geklebt werden, während sich duroplastische FVK nur auf mechanisches Fügen und auf Kleben beschränken [19]. Zusätzlich muss unterschieden werden, ob es sich beim Fügen zweier Bauteile um eine Verbindung zweier FVK oder ob es sich um eine Hybridverbindung aus FVK und einem anderen Werkstoff wie

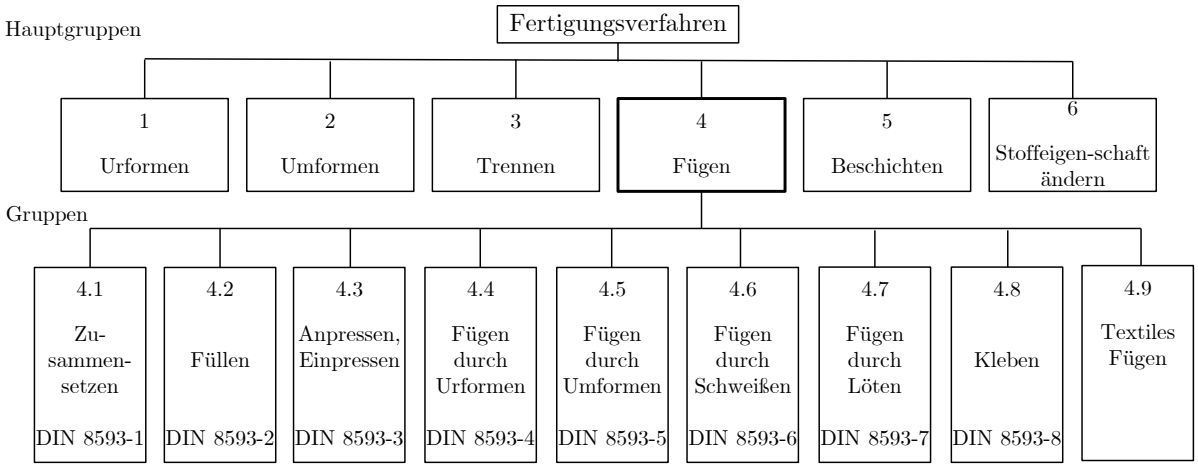


Abbildung 2.7: DIN 9539-0: Übersicht über die Fertigungsverfahren

z.B. Metall handelt. Im Folgenden soll auf die einzelnen Montagetechnologien eingegangen werden.

Grundsätzlich können alle Fügearten in irgendeiner Form angewandt werden, im Folgenden sollen jedoch nur jene, die tatsächlich Anwendung finden detailliert beschrieben werden. Dazu gehören das Fügen durch An- und Einpressen, Umformen, Schweißen und Kleben. Das Löten wird vereinzelt mit metallummantelten FVP angewandt [37], es konnten jedoch nicht vergleichsweise hohe Festigkeiten wie mit anderen Fügearten erreicht werden. Das Zusammensetzen wird je nach Bauteil angewandt und ist redundant. Grundsätzlich ist an dieser Stelle noch zu erwähnen, dass in Luft- und Raumfahrt die Auswahl der Bauweise, der Montagetechnologie und des angewandten Verfahrens maßgeblich von der Zertifizierung des Bauteils abhängen [13].

2.4.2 Mechanische Montageverfahren

Mechanische Montagevefahren verbinden die Fügeteile kraft- und formschlüssig. Zu ihnen gehört nach DIN8539 das An- und Einpressen sowie das Umformen. Ein Nachteil dieser Technik ist das Einbringen zusätzlichen Gewichts durch Verbindungselemente wie Schrauben, Bolzen, Nieten, etc., was vor allem im Ultraleichtbau eine kritische Charakteristik darstellt. Desweiteren geht diese Art von Bauteilverbindung in der Regel mit einer Festigkeitsminderung einher, da zum Fügen der Faserverlauf des Verbunds durch Einbringen von Verbindungselementen, Bohrungen etc. unterbrochen wird. Es kommt zu Kerbwirkungen und Kriecheffekten an der Fügestelle. Es folgen lokal konzentrierte Spannungsspitzen [19]. Resultat ist eine Abnahme der Bauteilfestigkeit im Endzustand oder eine Vergrößerung der Fügefläche zur Kompensation vorangegangener Festigkeitsminderung, was wiederum zu größerem Aufwand und Gewicht führt. Gleichzeitig bietet

diese Art von Verbindung die Möglichkeit der Demontage, was im Sinne der Wartung und der Entsorgung von Vorteil ist.

An- und Einpressen: Hierzu zählt das Schrauben, Nageln und Verspannen. Im Schrauben finden Fließlochschrauben und klassische Bolzenverbindungen Anwendung, im Nageln wird das Bolzensetzen angewandt. Das Fließlochschrauben und Bolzensetzen sind dabei nur in FVK-Metall-Verbindungen geeignet, während sich das Fließlochschrauben zusätzlich auf Duroplast-FVK beschränkt. Der Vorteil beider Verfahren liegt im hohen Automatisierungsgrad und im geringen Aufwand der Bauteilvorbereitung [29]. Der Hauptvorteil des An- und Einpressens liegt in der Wirtschaftlichkeit des Prozesses und mit Ausnahme des Nagelns, in der Lösbarkeit der mechanischen Verbindung und so der flexiblen und funktionalen Anwendung, Wartung und Entsorgung [19, 52].
Typische Geometrien für Bolzenverbindungen sind einfach oder doppelt überlappte Verbindungen. Diese werden mittels Bohrungen vorbereitet und über Verpressung des Verbindungselements gefügt. Neben den Bolzenverbindungen gibt es die Möglichkeit der Durchverschraubung, welche jedoch eine erhöhte Wanddicke voraussetzt und bei dünnen Bauteilen nicht verwendet werden kann. Zusätzlich werden gewindeformende Schrauben angewandt. Dazu ist notwendig im Designprozess Sacklöcher im Bauteil zur Verbindungelementaufnahme zu konzipieren. Diese Anwendung bietet Designfreiheit, leichte Montage und stellt ein kostengünstiges Verfahren dar. Als letzten Punkt soll hier das Verspannen angeführt werden. Dies kann durch Einpressbuchsen realisiert werden. Die Buchsen werden verdrehsicher und ausreißfest im Laminat verankert und werden bei Zusammensetzung nur noch in einander gesteckt. Einpressbuchsen bieten eine in Scherrichtung sichere Verankerung, sind beliebig oft lösbar, jedoch auch sehr aufwendig, teuer und zeigen im Fertigungsprozess eine niedrige Fehlertoleranz [19].

Umformen: In der Untergruppe des Umformens finden das Nieten, Bördeln, Klipsen und Clinchen Anwendung, wobei die letzteren drei ausschließlich in Metall-FVK Verbindungen genutzt werden können. Nieten ist eine in der Luftfahrt seit vielen Jahren benutzte Fügemethode. Xing et al. [87] konnten erfolgreich CFK Fügeteile mit Blindnieten verbinden. Alleiniges Nieten von FVK wird in der Industrie jedoch kaum angewandt [19]. Viel mehr wird es in Kombination mit Kleben zur Fixierung verwendet. Auch Metall-FVK Hybridverbindungen können per Holzstanznieten hergestellt werden [63]. Das Clinchen, oder auch Durchsetzfügen genannt, ist ein Fügeverfahren ohne Einsatz weiteren Materials. Für das Fügen mit FVK eignet es sich nur bei Metall-FVK Verbindungen, da es die duktilen Eigenschaften des Metalls benötigt. Die zu verbindenen Bauteile werden zwischen den zwei Formwerkzeugen, Stempel und Matrize, verspannt und anschließend per Stempelhub in die Matrize gedrückt. Das obere duktilere Material (in diesem Fall das Metall) fließt nach und wird kaltverformt, während das untere Material in die Matrize gedrückt und vom Bauteil getrennt wird. Das Ganze stellt ebenso eine kostengünstige und einfache Methode dar und wird zunehmend in Kombination mit Klebstoff angewandt [29].

2.4.3 Schweißen

Das Schweißen von FVK wird derzeit nur bei thermoplastischen Material mit einem Faservolumengehalt unter 30% angewandt [19]. Thermoplastische FVK bieten dabei verschiedene Vorteile. Sie benötigen keine chemisch-komplexen Verfahren, keine zeitaufwändigen Härteprozesse, einfache Entsorgung, keine notwendige Kühlung und somit eine fast unbegrenzte Haltbarkeit [8].
Die Schweißbarkeit FVK basiert auf der bei Wärmeeintrag reversiblen Verformbarkeit thermoplastischer Matrizen. Dabei wird das Matrixmaterial beider Fügeteile aufgeschmolzen und mit Fügedruck verbunden. Im Endzustand wird angestrebt, das die Scherfestigkeit in der Schweißnaht der des Grundmaterials entsprechen soll [19]. Die für FVK relevanten Schweißarten sind das Heizelement-, Widerstand-, Infrarot-, Induktions-, Hochfrequenz-, Reib-, Ultraschall- und Laserschweißen.

Ultraschallschweißen: Das Ultraschallschweißen basiert auf hochfrequenzinduzierte Molekularbewegung, wessen erzeugte Reibung in thermische Energie umgewandelt wird. Es wird bereits in verschiedensten Industriesparten angewandt [8]. Gefügte Überlappverbindungen aus FVK konnten dabei Scherfestigkeiten von bis zu 30 MPa erreichen. Auch Hybridverbindungen aus Aluminiumlegierungen und CFK konnten erfolgreich hergestellt werden, dessen Scherfestigkeit Werte von bis zu 58 MPa erreichten [80].

Reibschweißen: Das Reibschweißen ist ähnlich dem Prinzip des Ultraschallschweißens, nur wird die Wärme durch mechanische Reibung induziert. Das Verfahren ist in der FVK-Fügetechnik ebenfalls etabliert. Die mechanischen Eigenschaften gefügter Bauteile sind mit den Ergebnissen des Ultraschallschweißens vergleichbar. Es konnten Scherfestigkeiten von ca. 27 MPa erreicht werden [34].

Induktionsschweißen: Bei dem Induktionsschweißen wird das Prinzip der Wirbelströme genutzt, welche in geschlossenen elektrisch leitenden Materialien induziert werden können. Bei CFK sind die Kohlenstofffasern das leitende Material. Bei Verbundstoffen, welche keine leitende Werkstoffe beinhalten wie bei GFK, können elektrische Aufnehmer in das Material eingearbeitet werden. Auch hier konnten Scherfestigkeiten von 30 Mpa erreicht werden [47].

Widerstandsschweißen: Das Widerstandsschweißen zeichnet sich als schneller, simpler Prozess mit einer Dauer von einer bis vier Minuten aus. Zur Anwendung ist der elektrische Kontakt entscheidend. Es gibt dabei verschiedene Methoden um Spannung an das Heizelement anzulegen. Dies kann durch direktes Anlegen an das Prepreg oder die blanke Faser passieren. Eine weitere Möglichkeit besteht darin, die Fasern in ein Flüssigmetallbad zu tauchen oder die Fasern mit silbergefüllter Epoxidmischung zu bestreichen [8].

Letztere erfordern neben spezieller Gerätschaft erhöhten Aufwand in der Vorbereitungsphase. Bei Untersuchungen widerstandsgeschweißter Bauteile konnten Scherfestigkeiten von über 33 MPa nachgewiesen werden [82]. Das Verfahren befindet sich noch auf einem niedrigen industriellen Entwicklungsstand [88].

Heizelementschweißen: Das Heizelementschweißen basiert auf dem Erhitzen der Matrixoberfläche beider Verbindungsstücke durch kontaktierte Heizelemente. Es ist ein simples, kostengünstiges Verfahren, welches jedoch ein erhöhtes Risiko durch Oberflächenkontaminierung aufweist [8].

Infrarotschweißen: Das Infrarot-Schweißen ist ein relativ junges kontaktloses Verfahren. Vorteile dieses Verfahrens liegen in der Schnelligkeit des Wärmeeintrags (ca. fünf Sekunden), der geringen Kontaminationsrate und hohen Reproduktionsrate. Durch die hohe Konsistenz des Verfahrens und der kleinen Streuung mechanischer Eigenschaften gefügter Bauteile, bietet die Technik großes Potential für high-demand Bauteile der Luft- und Raumfahrtindustrie. Das Verfahren befindet sich auf einem niedrigen Entwicklungsstand und man findet wenige Untersuchung dazu [8].

Laserschweißen: Das Laserschweißen gilt als geeignetes Verfahren für das Verbinden thermoplastischer Werkstoffe. Zur Anwendung dieses Verfahrens ist ein absorbierender und ein „transparenter“ Fügepartner nötig. Dabei stellen beim Fügen von FVK die Fasern den absorbierenden Teil dar, deren Beschaffenheit und Orientierung maßgebenden Einfluss auf die Prozessqualität haben [86]. Der Laser durchdringt im optimalen Fall das transparente Material, wodurch die Energie der Strahlung in dem darunter liegenden absorbierenden Material aufgenommen wird, wodurch es sich erhitzt. Die umliegende Matrix schmilzt und verbindet sich miteinander [19]. Es handelt sich hierbei ebenso um ein relativ junges Verfahren, dessen Anwendung mit FVK weiterhin untersucht wird, um Prozessparameter zu optimieren [86].

2.4.4 Kleben

Während bei mechanischen Verfahren die Struktur durch Bohrungen oder Unterbrechen des Faserverlaufs geschwächt wird und nur punktförmige Kraftübertragungen vorherrschen oder beim Schweißen das Gefüge der Verbindungsteile in der Wärmeeinflusszone beeinflusst wird, bietet das Kleben eine materialveränderungsfreie Alternative. „So werden in Zukunft vermehrt die etablierten konventionellen Verbindungsmethoden, wie z. B. das Schweißen, Schrauben oder Nieten, die durch die steigenden Anforderungen und neuen Materialkonzepte an ihre Grenzen stoßen, in Kombination mit der Klebtechnik eingesetzt oder gar durch diese abgelöst“ [29]. Die Vor- und Nachteile des Klebens sind Tab. 2.3 zu entnehmen.

Tabelle 2.3: Vor- und Nachteile des Klebens

Vorteile nach [19, 29, 38]:	Nachteile nach [19, 29]:
• ermöglicht bei fachgerechtem Einsatz langzeitbeständige Verbindungen verschiedener Werkstoffe mit FVK	• lange Einflusszeit auf den gesamten Prozess (Vorbereitung + Aushärten)
• die Werkstoffeigenschaften der Fügeteile werden nicht unzulässig verändert	• teilweise ist eine sehr aufwändige Oberflächenbehandlung notwendig
• überlegene Dauerschwingfestigkeit gegenüber mechanischen Fügerverfahren	• begrenzte thermische Formbeständigkeit im Gegensatz zu mechanischen Fügetechniken
• Gewichtsersparnis (im Vergleich zu mechanischen Fügeverfahren mit derselben Füge-Leistung)	• sorgfältige Prozesskontrolle und aufwendige Kontrollverfahren
• Möglichkeit neuer Leichtbauweisen und Eigenschaften die sich in das Bauteil integrieren lassen	• begrenzte Reparaturmöglichkeit durch Prozesskontrolle
• homogene flächige Krafteinleitung, gleichmäßige Spannungsverteilung	• keine gängigen zerstörungsfreien Prüfverfahren zum Testen der Klebverbindung
• dichte Verbindungen und Korrosionsschutz bei Hybridverbindungen	

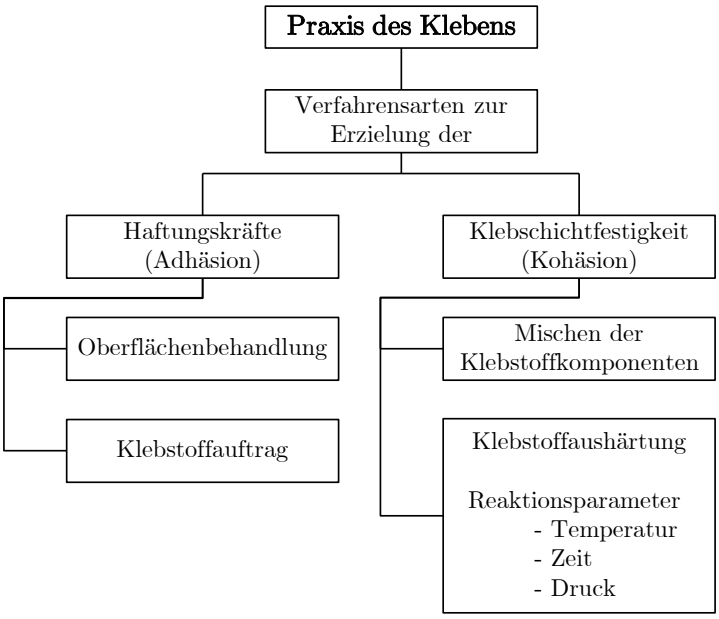


Abbildung 2.8: Verfahrensarten zur Herstellung von Klebungen nach Habenicht [38]

Grundlagen. Das Kleben beruht auf der Wirkung von Haftungskräften zwischen Klebstoff und Fügeteiloberfläche (Adhäsion) und der Klebschichtfestigkeit (Kohäsion). Beide Kräfte sind maßgebend für das Belastungsverhalten des Stoffschlusses. Klebstoffe werden nach DIN 8593-8 in physikalisch abbindenden und chemisch abbindenden Klebstoffe unterschieden. Physikalisch abbindende Klebstoffe sind bereits zu Beginn des Klebens eine Polymerverbindung. Sie benötigen Wärmeeinwirkung oder Lösungsmittelsysteme, um in einen benetzungfähigen Zustand überführt und angewandt werden zu können. Bei chemisch abbindenden Klebstoffen beruht die Bildung der benötigten polymeren Klebschicht auf der chemischen Reaktion zweier Reaktionspartner. Zusätzlich gibt es noch reaktive Schmelzklebstoffe, welche eine Kombination beider darstellt, und photoinitiiert härtende Acrylate, welche durch spezifische Lichtstrahlung Polymere bildet. Die Aufschlüsselung der Verfahrensarten in der Praxis des Klebens sind Abb. 2.8 zu entnehmen [38].

Bei dem Kleben von FVK werden Lösungsmittel- und Reaktionsklebstoffe verwendet. Lösungsmittelklebstoffe beinhalten Lösungsmittel, deren Entfernung nach applizieren der Klebschicht Zeit- und Temperaturabhängigkeit aufweisen. Das Entfernen der Lösungsmittel kann je nach Dimension und Art der Klebefuge von Stunden bis Wochen dauern. Dabei gibt es auch Klebstoffe mit niedrigsiedenden Lösungsmitteln, welche schnell verdunsten, aber die Gefahr des Einbringens von Eigenspannungen und Mikrorissen erhöhen. Bei der Anwendung von Lösungsmittelklebstoffen zur Klebung von thermoplastischem FVK kommt es zusätzlich neben der Adhäsion zu Diffusionsklebungen, bei der in der Grenzschicht durch Diffusionsprozesse höhere Hauptvalenzkräfte zwischen

den Fügeteilen und so erhöhte Festigkeiten der Fügestelle erreicht werden können.
Bei Reaktionsklebstoffen kommt es zu keiner Veränderung der Fügeteile, bei welchen durch zwischenmolekularer Wechselwirkung Adhäsion resultiert. Diese Klebstoffe sind in der Regel auf Basis von Epoxidharzen, Polyurethanen, Methylmethacrylaten und ungesättigten Polyestern. [38]

Oberflächenbehandlung. Um Bauteile hoher Festigkeitsanforderung zu fügen und optimales Belastungsverhalten der Klebeverbindung zu erreichen, müssen Adhäsions- und Kohäsionkräfte der Fügestelle optimiert werden. Die Kohäsion ist abhängig vom chemischen Aufbau des Klebstoffs und seiner Reinheit, im Sinne des Ausbleibens ungewollter Verunreinigungen. Der Klebstoff wird im Designschritt nach Bauteil- und Fügegeometrie ausgewählt. Um bestmögliche Adhäsion zu gewährleisten, werden Oberflächenbehandlungen der Fügepartner angewandt. Sie dienen dazu die Reaktionsfähigkeit, auch Aktivität genannt, der Klebeflächen zu erhöhen. Dies kann durch Säuberung und Vergrößerung der Oberfläche, Einbringen von Gitterstörung oder einer Änderung des chemischen Aufbaus erfolgen. Die Oberflächenbehandlung beinhaltet das Vorbereiten, Vorbehandeln und Nachbehandeln, um so das gefordertes Benetzungs- und Absorptionsverhalten des Klebstoffs zu gewährleisten [38].

In der Vorbereitung wird die Oberfläche gesäubert und entfettet. So werden Kontaminationen wie Trennmittel, Gleitmittel, Fette, Staub etc. entfernt. Den wichtigsten Schritt der Vorbereitung stellt das Entfetten dar. Es kann durch Abwischen mit lösungsmittelgetränkten Tüchern, Tauchen oder Dampfentfettung mit alkalischen oder organischen Lösungsmitteln durchgeführt werden.

Durch Oberflächenvorbehandlung wird die Oberfläche der Fügeteile zusätzlich aktiviert. Dies kann mechanisch durch Oberflächenaufrauung oder physikalisch und chemisch durch Aufbringen einer mit charakteristischen Haftungsmerkmalen versehenen neuen Oberfläche durchgeführt werden. Mechanische Verfahren sind die Bearbeitung mit Büsten, durch Schleifen und Strahlen mit druckluftbetriebene Strahlanlagen und Schleuderadstrahlanlagen. Sie gelten als die einfachste und am meisten angewandte Klasse der Vorbehandlung. Der Nachteil dieser mechanischen Verfahren liegt in der manuellen Ausführung und somit in dem inhomogenen und industriell nicht skalierbaren Vorgang [77]. Physikalische Verfahren beinhalten Plasma-, Corona-Entladungs- und Laserbehandlung mit Ultraviolett(UV)- und Infrarot-Strahlung [72].

In Abb. 2.9 sind die Ergebnisse der Untersuchung von Schweizer et al. [72] dargestellt. In dem Experiment wurden verschiedene Oberflächenbehandlungsverfahren angewandt. Die Referenzprobe ist unbehandelt, die M-Probe wurde mechanisch durch Schleifen bearbeitet. UV1 und UV2 sind mit UV-Laser behandelte Proben, die man bei der UV1-Probe mit einer höheren Leistung als bei der UV2-Probe behandelte. Die IR-Proben wurden mit Infrarot-Laser behandelt. IR1, IR2 und IR3 unterscheiden sich dabei in den

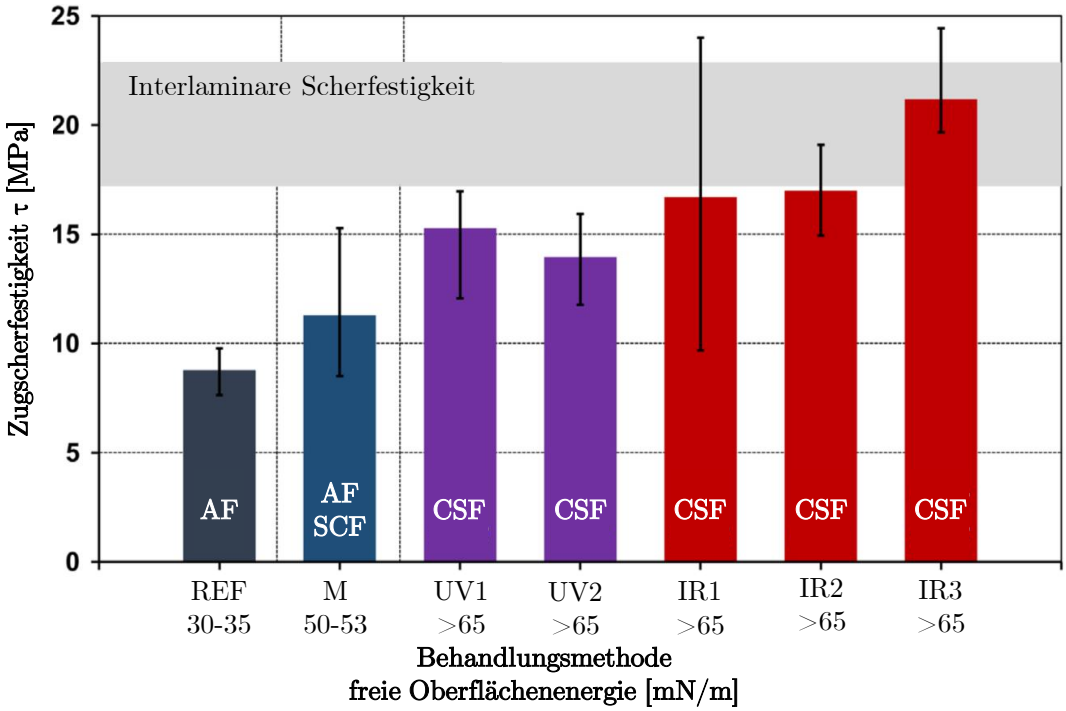


Abbildung 2.9: Scherfestigkeiten von Einzelüberlappungsfügestellen von unbehandelter(REF), laserbehandelter(UV, IR) und geschliffener(M) Proben. Zusätzlich werden Versagensmoden dargestellt: AF.. Adhesives Versagen, SCF.. Substrat nahes kohäsives Versagen, CSF.. kohäsives Versagen [72]

Laserparameter. Während bei IR1 mit größerer Leistung, größerer Pulsdauer, aber geringerer Scangeschwindigkeit gearbeitet wurde, ist die Bearbeitung bei IR2 mit einer kleineren Leistung und kleinerer Pulsdauer, aber deutlich größerer Scangeschwindigkeit geschehen. Bei der Probe IR3 wurde einmal das Verfahren von IR1 und drei mal das Verfahren von IR2 angewandt. In den Ergebnissen ist zu sehen, dass die mechanische Bearbeitung relativ kleine Auswirkung auf die Festigkeit hat, während die Behandlung mit Lasern deutliche Verbesserungen zeigt. Die Infrarot-Behandlung stellt dabei die Beste der untersuchten Behandlungsmethoden dar. Chemische Behandlungen beinhalten für Kunststoffoberflächen vorwiegend Beizen, Gasphasenfluorierung, Sulfonierung und Ozonisierung.

Aufgrund von Wechselwirkung mit der vorherrschenden Atmosphäre und den damit einher gehenden chemischen Reaktionen und thermodynamischen Ausgleichsprozessen wird der aktivierte Grenzschichtbereich der Moleküle der Fügeteile wieder in niedrigere Energieniveaus zurückgeführt. Das führt zu Verminderung der durch Oberflächenbehandlung erreichten Reaktionsfähigkeit [38]. Aus diesem Grund wird dazu geraten, die Verklebung sofort nach der Oberflächenvorbehandlung durchzuführen. Sollte dies nicht

möglich sein, wird zu einer Nachbehandlung geraten. Diese kann durch Klimatisierung der Klebfläche und Konservierung durch Auftrag von Haftvermittlern oder auch Primern genannt erfolgen.

In einer Untersuchung von Jölly et al. [45] wurden Proben zuerst mit atmosphärischem Plasma und dann mit jeweils mit Organosilan und Thiol behandelt. Anschließend wurden die Proben analysiert und mit Ergebnissen geschliffener Proben verglichen. Es stellte sich heraus, dass Plasma- und Chemikalienbehandlung zu einer deutlichen Verbesserung der Benetzungsfähigkeit führt. Mit reiner Plasmabehandlung wurden ähnliche Ergebnisse erzeugt, diese waren jedoch nur für kurze Zeit stabil. Mit zusätzlicher chemischer Behandlung konnte der Zustand über vier Wochen stabil gehalten werden. Es konnte insgesamt eine Verbesserung der Festigkeit erreicht werden. Während die geschliffenen Proben mit einem adhäsiven Bruch zum Versagen kamen, zeigten die chemisch-behandelten Proben Kohäsivbrüche, was für die hohen Adhäsivkräfte an der Fügestelle spricht. Dieses Beispiel soll zeigen, dass Kombinationen verschiedener Verfahren möglich sind. Je nach Anforderung kann die Oberflächenbehandlung beliebig komplex gestaltet werden.

Des Weiteren ist an dieser Stelle das Abreißgewebe, oder auch Peel-Ply zu nennen. Es wird bei der Fertigung von Faserbundbauteilen eingesetzt, um den Prozess der Oberflächenbehandlung zu unterstützen. Sie dienen dazu, die Oberfläche zu schützen und die Kontatkierung mit Formtennmitteln zu unterbinden. Das Peel-Ply wird direkt vor dem Kleben vom Bauteil entfernt. Die beim Fügen erreichten Festigkeiten von Bauteilen, bei denen Peel-Ply genutzt wurde, fallen im Vergleich zu den anderen Oberflächenbehandlungsarten nicht größer aus [48]. In der Untersuchung von Holtmannspötter et al. [40] konnte keine deutliche Verbesserung der Oberflächenaktivität erreicht werden. Die Oberfläche des FVK entspricht der Peel-Ply Oberfläche, was zu ähnlichen chemischen und topologischen Eigenschaften führt. So kommt es zu einer Kontamination der FVK-Oberfläche durch die im Abreißgewebe vorhandenen Lösungsmittel. So konnten nur in einem der untersuchten Gewebe gute Klebfestigkeiten erreicht werden, welche zu kohäsivem Versagen führten. Ähnliche Ergebnisse resultierten in der Arbeit von Gartner et al. [31]. Die dabei erreichten Scherfestigkeiten ähneln die der mechanischen Behandlung.

3 Erstellung eines Modells zur Elementarflussanalyse

Mit den Kenntnissen über die Methodik des LCAs, des LCCAs und des EEAMs, der Einführung der ökologischen und ökonomischen Indikatoren und der systematischen Darstellung der möglichen Montageprozesse für FVK in Kap. 2, soll im folgenden Kapitel die Erstellung eines Prozessmodells zur Elementarflussanalyse erfolgen. Dafür wird zunächst das Konzept der Modellierung und dessen Fundament erklärt und anschließend nach erarbeitetem Schema in Form mathematischer Beschreibung im EEAM parametrisiert.

3.1 Modellierung der Montagetechnologien im EEAM

Bei der Literraturrecherche zur Ökobilanzierung von Montageprozessen wurden keine vergleichbaren Studien gefunden, welche ökologische Indikatoren bewerten. Zusätzlich konnten keine Untersuchungen der Kostenbewertung von Montageprozessen ausfindig gemacht werden, die einen einheitlichen Modellierungsansatz verfolgen. Somit gibt es für die Erstellung des Modells keine normierten Richtlinien für Struktur oder Detailgrad der Ausführung. Der Anspruch an das Modell besteht darin ein in sich schlüssiges, konsistentes Abbild der realen Elementarflüsse der Prozesse zu erstellen, wobei gleichzeitig eine Allgemeingültigkeit für sämtliche in Kapitel 2.4 aufgeführten Fügearten gewährleistet wird. Das Ziel ist es ein für Montageprozesse übergreifend definiertes Modell zu generieren, welches als Basis für weitere Bewertungen genutzt, weiterentwickelt und etabliert werden kann. Durch die Etablierung eines generalisierten Modells kann eine Quantifizierbarkeit und Vergleichbarkeit weiterführender Arbeiten, Projekte, Verfahren sowie Produkte erreicht werden.

Als Vorlage wird das in der Dissertation Al-Lamis [53] beschriebene, unter Absprache mit Industriepartnern wie Airbus erstellte und etablierte Modell für Faserverbund-Fertigungsprozesse genutzt. So orientiert sich die Erstellung des Modells der Montagetechnologien auch indirekt an dem Schema des EEAMs und den darin definierten Methoden. Die ökonomische Bewertung wird im EEAM nach ABC und MFKR durchgeführt. Die in Kapitel 2.4 beschriebenen Prozessmodule (auch Unit-Processes, UP) werden nach den eben genannten Bewertungsmethoden aufgeteilt und wiederum in Kategorien, welche die Art des Elementarflusses bestimmen, separiert. Als Veranschaulichung soll die Abb. 3.1 aus [53] dienen. Zu sehen ist das Schema der angewandten Diskretisierungsreihenfolge. In diesem Fall steht auf der Prozessebene die Montage. Als UP sind Teilprozesse wie z.B. die Oberflächenvorbereitung definiert. Als Aktivitäten wären dann bei dem Beispiel der Oberflächenvorbereitung das Reinigen, Schleifen und Aktivieren zu nennen.

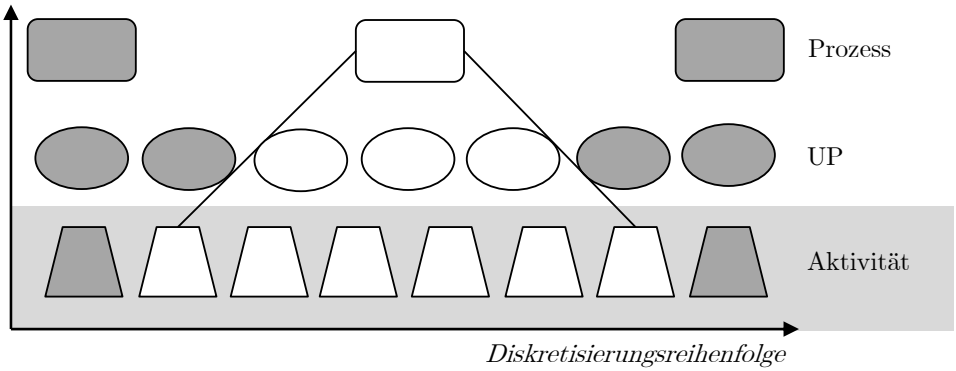


Abbildung 3.1: Diskretisierungsmodell nach Al-Lami [53]

Zu den Kategorien zählen die durch Al-Lami in Anlehnung an Witik et al. [84] definierten Gruppen: Arbeitskraft, Einrichtung, Energieaufwand, Ausstattung, Formwerkzeug, Faser-, Harz-, Prepreg- und Kern-Material, deren Abfälle und zusätzliche Verbrauchsgüter. Dabei werden unter Ausstattung indirekte Gemeinkosten betrachtet, welche im EEAM in der Bewertung als „Nicht wiederkehrende Kosten“ (non recurrent cost, NRC) aufgeführt und in DC umgerechnet werden [53]. In Katsiropoulus et al. [50] wurde eine Kostenbewertung eines Montageprozesses durch Kleben erstellt, in welchen ein Vorschlag für eine Einteilung der Prozesse gegeben wird. Dabei teilt sich der Prozess in die anhängende Fertigung, Positionierung, Spaltanalyse, Oberflächenvorbehandlung, Oberflächenqualitätscheck, Kleben, Zusammenfügen, Aushärten und Testen ein. Da das Kleben nur ein Bereich der Fügeprozesse ausmacht, wird die Struktur nur teilweise übernommen und für eine ganzheitlichere Anwendung adaptiert. Für diese Untersuchung wurde entschieden, die UPs zusätzlich nach DIN und den dort technisch definierten Prozessen zu gliedern.

Das für die Montage erstellte Modell ist in Abb. 3.2 ersichtlich. Das Modell ist für die Anwendung des ALCAs konzipiert. Zu Beginn des Modells stehen die zu fügenden Einzelkomponenten. Diese werden i.d.R. nach der Fertigung zwischengelagert. Der Prozess der Lagerung ist der Erste in der Prozesskette. Aus dem Lager werden die Bauteile zum Standort der Weiterbearbeitung transportiert, definiert als Transport. Weiterführend können die Bauteile mechanisch bearbeitet werden, definiert als mechanische Vorarbeit. Die Aktivitäten der mechanischen Vorarbeit beinhalten sämtliche mechanischen Abtrage- und Trennverfahren wie z.B. Ablängen, Schneiden, Fräsen, Bohren. Neben der mechanischen Vorarbeit können nicht direkt zuordnungsbare Vorbereitungen anstehen, wie z.B. der Umbau einer Werkstattanordnung für den Fügeprozess. Dieser Schritt ist in dem UP Vorbereitung aufgeführt. Vor dem Fügen werden die Bauteile bzw. die zu fügenden Flächen bearbeitet und entsprechend ihrer Fügeanordnung positioniert. Diese Schritte sind in Oberflächenbehandlung und Positionierung definiert. Zu der Oberflächenbehandlung

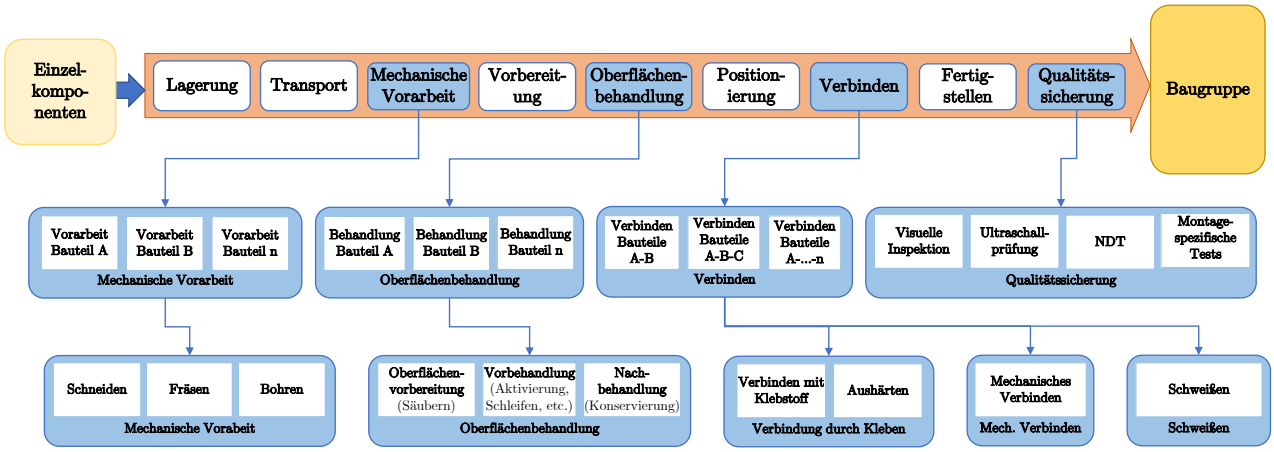


Abbildung 3.2: Modellierung der Montageprozesse

gehören die Aktivitäten der Oberfächenvorbereitung, -behandlung und -nachbehandlung. Das Fügen selbst findet sich in dem UP Verbinden wieder. Darin werden die Aktivitäten des Klebens und Aushärtens, des mechanischen kraft- bzw. formschlüssigen Fügens und des Schweißens unterschieden. Nach dem Verbinden der Bauteile folgt der Prozess der Fertigstellung, dabei können Aktiviäten wie z.B. das Entgraten oder die Nachbehandlung der Fügestelle zählen. An letzter Stelle vor der fertigen Baugruppe steht das Testen. Je nach Fügeart können verschiedene Tests zur Qualtitätsprüfung durchgeführt werden. Als Aktivitäten werden hier optische Untersuchung, Ultraschalltestverfahren, andere zerstörungsfreie Prüfungen (non destructive testing, NDT) und Montage-spezifische Tests angeführt.

Das Modell ist, trotz der Tatsache, dass es einen chronologischen Verlauf darstellt, nicht als solches zu lesen. Für die Einhaltung der Allgemeingültigkeit abstrahiert das Modell die Prozesse zu zeitlich unabhängiger Reihenfolge. So kann es sein, dass ein Bauteil zuerst gefräst, gefügt, die gefügte Baugruppe nochmal gefräst, geschliffen und verklebt wird. Diese Prozessanordnung würde nach chronologischer Reihenfolge nicht in die UP Anordnung passen. Stattdessen werden die Aktivitäten den übergeordneten Prozessen zugeordnet. Ein weiteres Beispiel ist der UP Transport. Es kann sein, dass die Bauteile zwischen jedem UP weite Strecken zurücklegen müssten. Wäre das Modell chronologisch, dann wäre zwischen jedem UP der UP Transport. Das in dieser Arbeit erstellte Modell sieht jedoch vor, dass alle Transportprozesse in diesem einen UP zusam-

mengefasst werden. Detaillierte bottom-up Methoden sind dennoch möglich und liegen in der Verantwortung der Bewerter:innen. Eine beispielhafte, detaillierte Ausführung ist der Fallstudie in Kapitel 4 zu entnehmen. Zusätzlich müssen nicht alle Schritte für ein Szenario gewählt werden. Zum Beispiel ist der Punkt Positionierung ein Wichtiger in der industriellen Anwendung, wenn große Bauteile von Industrierobotern in die richtige Position gebracht werden. Bei kleineren, wenig komplexen Bauteilen in Handarbeit ist dieser Punkt wiederum mit viel weniger Aufwand und Ressource verbunden, sodass die Einflüsse der Aktivitäten in dem gewählten Szenario vernachlässigbar klein sind und eventuell direkt dem UP Verbinden zugeordnet werden.

Die definierten Teilschritte werden gemäß dem Modell im EEAM als UPs behandelt. Um die Bewertung durchzuführen, werden mithilfe der in der Datenbank vorhandenen Items Datenblätter der einzelnen UPs erstellt. Jedes Datenblatt beinhaltet die vorher je UP definierten Elementarflüsse mit je drei Spalten: Zeit, Menge und Energie. Wenn der Prozess gemessen wird, werden die Parameter der vorliegenden Elementarflüsse in Form der Datenblätter als Sachbilanz (LCI) dokumentiert und anschließend mit in der EEAM-Software eingelesen und bewertet.
Innerhalb des EEAMs ist die Schnittstelle zwischen LCI und Wirkungsabschätzung (LCIA) des LCAs implementiert. In der Datenbank werden den Elementarflüssen CF gesammelt. Die CF sind wiederum Bindeglied zwischen Quantität des Elementarflusses und ökologischer bzw. ökonomischer Indikatoren. Die vordefinierten CF verbinden die Elementarflüsse mit den Wirkungsindikatoren durch einfache lineare Gleichungen (siehe Tab. 3.2 und Tab. 3.3). So werden aus den gemessenen Elementarflüssen (LCI) über die CF die Indikatoren errechnet (LCIA). Mittels der damit ermittelten Wirkungsindikatoren kann die Wirkungsabschätzung erstellt und deren Ergebnisse interpretiert und verglichen werden.

Durch die Modellierung der Montage, der Definition der Teilprozesse sowie der Definition der Elementarflüsse innerhalb der Datenbank, wird gewährleistet, dass der Untersuchungsrahmen abgesteckt ist und keine Elementarflüsse innerhalb des Systems undokumentiert bleiben. Bewusste Entscheidungen zu Abschneidekriterien sollten im Vorfeld der Bewertung definiert werden.

3.2 Parametrisierung der Montagetechnologien im EEAM

Die Parametrisierung ist ein wichtiger Bestandteil bei der Erstellung von Modellen. Mithilfe von Parametern wird das Modell quantitativ beschrieben. Sie dienen als Stellschrauben des zu untersuchenden Systems.
Das Modell wird, wie im vorherigen Abschnitt erläutert, über CF beschrieben. Diese geben Auskunft über anwendungsspezifische Korrelationen zw. Elementarfluss und ausgewähltem Indikator. Die Ermittlung der Indikatoren erfolgt über das Verrechnen der

gemessenen Prozessparameter mit deren jeweiligen CF. Für die Bewertung der Montage wurden neunzehn ökologische Indikatoren und ein ökonomischer Indikator ausgewählt. Bei den ökologischen Indikatoren handelt es sich dabei um die in Kap. 2.2 beschriebenen Indikatoren, dem CED und den achtzehn ReCiPe Midpoint-Indikatoren. Als ökonomischer Indikator werden die DC betrachtet. Eine Übersicht der in der Datenbank benötigten CF zur Berechnung der Indikatoren ist in Tab. 3.1 zu sehen. Alle benötigten CF sind mit einem „✓“ gekennzeichnet.

Ökonomische Charakterisierungsfaktoren

Zur Berechnung der ökonomischen Indikatoren werden durch die CF der Items verschiedene Eigenschaften parametrisiert. Dazu gehören die Anschaffungskosten, Lebensdauer, jährliche Wartungkosten, jährliche Betriebszeit und gegebenenfalls Stromkosten, die bei allen Stromverbrauchern global in der Datenbank dem gleichen Wert entsprechen. Die Wartungskosten der Einrichtungen sind in dem CF Kosten pro Einheit (KPE) integriert. Die Wartungskosten der Ausstattung NRC werden als eigener CF angeführt. Stromkosten sind in dem CF KPE der Kategorie Ausstattung parametrisiert.

Hier zeigt sich das erste Problem der Inkonsistenz der Werte. Anschaffungskosten, Wartungskosten und Stromkosten sind dynamische Werte, die je nach monetärer Wertzuschreibung und Marktsituation fluktuieren. Diese Inkonsistenz erschwert später die Vergleichbarkeit der Ergebnisse der Bewertung des ALCAs. Zum Beispiel wird für den ökonomischen Indikator der DC ein CF genutzt, der dem Strompreis einer Kilowattstunde elektrischer Energie entspricht. Die Werte hierfür stammen aus der Eurostat Datenbank, des offiziellen statistischen Amts der Europäischen Union. Dieser entspricht einem Wert von 0,1445 €/kWh für die zweite Hälfte des Jahres 2021. Wiederum entsprach dieser Wert im Jahr 2019 noch 0.1150 €/kWh, was einen Preisanstieg von rund 25% innerhalb von zwei Jahren bedeutet. Dennoch gibt es den Vorteil, dass die Preise in der Regel transparent zugänglich sind und den Elementarflüssen konkrete monetäre Werte eindeutig zugeordnet werden können.

Die Berechnung der DC setzt sich je Elementarflusskategorie aus unterschiedlichen CF zusammen. Die dafür genutzten mathematsichen Beschreibungen sind Tab. 3.2 zu entnehmen. Für die Berechnung der meisten Kategorien, außer Formwerkzeug und Ausstattung NRC, wird der CF KPE benötigt, welcher sich aus dem Preis des Elementarflusses für die Quantität der jeweilig definierten Einheit zusammensetzt. Die beiden anderen Kategorien berechnen sich ebenso aus einfachen linearen Gleichungen. In den gegebenen Formeln entspricht x dem jeweiligen Elementarfluss, $n(x)$ der Menge von x, der Masse je Einheit $MPE(x)$, $t(x)$ der Zeit von x, $A(x)$ der Fläche von x und $E(x)$ der Energie von x.

Tabelle 3.1: Übersicht der CF der Datenbank je Elementarfluss-kategorie

Charakterisierungs-faktor	Arbeits-kraft	Einrich-tung	Ausstat-tung	Formwerk-zeug	Materi-alien	Verbrauchs-güter
KPE	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MPE	x	x	x	x	✓	✓
Anschaffungskosten	x	x	✓	x	x	x
Entsorgungskosten	x	x	x	x	✓	✓
Lebensdauer	x	x	✓	x	x	x
jährl. Wartungskosten	x	x	✓	x	x	x
jährl. Betriebszeit	x	✓	✓	x	x	x
CED pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ALOP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
GWP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
FDP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
FETP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
FEP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
HTP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
IRP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
METP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MEP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
MDP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
NLTP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ODP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
PMFP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
POFP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TAP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
TETP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ULOP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
WDP pro Einheit	✓	✓	✓	✓	✓	✓
ökol. Indikator je kWh*	x	x	✓	x	x	x

* Ökol. Indikator je kWh meint hier einen Sammelbegriff für alle bereits aufgezählten ökologischen Indikatoren je Kilowattstunde.

Tabelle 3.2: Berechnung der DC

Kategorie	Formel
Faser-, Harz-, Prepreg-, Kernmaterial	$DC(x) = n(x)\ [kg] \cdot KPE(x)\ \left[\frac{€}{kg}\right]$
Materialabfall, Vebrauchsgüter	$DC(x) = n(x)\ [Einheit] \cdot KPE(x)\ \left[\frac{€}{Einheit}\right]$ $+n(x) \cdot MPE(x)\ [kg] \cdot Entsorgungskosten\left[\frac{€}{kg}\right]$
Arbeitskraft	$DC(x) = n(x) \cdot t(x)\ [h] \cdot KPE(x)\left[\frac{€}{h}\right]$
Einrichtung	$DC(x) = \frac{A(x)\ [m^2] \cdot t(x)\ [h] \cdot KPE(x)\ \left[\frac{€}{m^2}\right]}{jährl.\ Betriebszeit(x)\ [h]}$
Energiekonsum	$DC(x) = E(x)\ [kWh] \cdot KPE(x)\ \left[\frac{€}{kWh}\right]$
Formwerkzeuge	$DC(x) = \frac{n(x) \cdot Anschaffungskosten(x)\ [€]}{Produktionsvolumen(x)}$
Ausstattung NRC	$DC(x) = \frac{t(x)\ [h] \cdot Anschaffungskosten(x)\ [€]}{\left(jährl.\ Betriebszeit(x)\ \frac{h}{a} \cdot Lebensdauer(x)\ [a]\right)}$ $+\frac{t(x)\ [h] \cdot jährl.Wartungskosten[€]}{jährl.\ Betriebszeit(x)\ [h]}$

Ökologische Charakterisierungsfaktoren

Ähnlich der DC werden die neunzehn ökologischen Indikatoren über die CF mittels linearer Gleichungen berechnet. Je Indikator gibt es einen korrespondierenden CF. Somit ergeben sich insgesamt neunzehn CF (siehe Tab. 2.2): CED, ALOP, GWP, FDP, FETP, FEP, HTP, IRP, METP, MEP, MDP, NLTP, ODP, PMFP, POFP, TAP, TETP, ULOP und WDP jeweils pro Einheit der Kategorie des Elementarflusses. Zusätzlich gibt es in den Kategorien Faser, Harz, Prepreg, Kernmaterial, Faser-, Harz-, Prepreg- und Kernmaterialabfall, Formwerkzeug und Verbrauchsgüter den CF MPE. Da in diesen Kategorien alle gewählten ökologischen CF die Wirkungsabschätzung je Kilogramm eingebrachten Materials beschreiben, ist der Faktor MPE zur Umrechnung notwendig. Für den Energiekonsum der Ausstattung gibt es für jedes Item der Kategorie Ausstattung weitere neunzehn CF, die den neunzehn bereits genannten CF pro kWh enstprechen. Die CF des Energiekonsums ist für jedes Ausstattungsitem der Datenbank gleich und entspricht den ökologischen Auswirkungen des Konsums einer Kilowattstunde des in der Datenbank angegebenen Strommixes.

Die Faktoren für den CED setzen sich jeweils aus der Summe der CF der Einzelkategorien fossile-, geothermale- und nukleare Energieerzeugung, Solar-, Wasser- und Windenergie, erneuerbare und nicht-erneuerbare Biomasse zusammen. Somit ergibt sich ein einzelner Indikator, der die gesammlte Energie in Megajoule Öl-Equivalenten angibt. Die Berechnung der ökologischen Indikatoren je Kategorie sind Tab. 3.3 zu entnehmen.

Tabelle 3.3: Berechnung der ökologischen Indikatoren; Einheit$_{Ind}$ entspricht der Einheit des jeweiligen Indikators

Kategorie	Formel
Faser, Harz, Prepreg, Kernmaterial, Materialabfall, Verbrauchsgüter	$Ind(x) = n(x) \cdot MPE(x)\ [kg] \cdot CF(x,Ind)\ \left[\frac{Einheit_{Ind}}{kg}\right]$
Arbeitskraft	$Ind(x) = n(x) \cdot t(x)\ [h] \cdot CF(x,Ind) \left[\frac{Einheit_{Ind}}{h}\right]$
Einrichtung	$Ind(x) = \frac{A(x)\ [m^2] \cdot t(x)\ [h] \cdot CF(x,Ind)\ \left[\frac{Einheit_{Ind}}{m^2}\right]}{jährl.\ Betriebszeit(x)\ [h]}$
Energiekonsum	$Ind(x) = E(x)\ [kWh] \cdot CF(x,Ind)\ \left[\frac{Einheit_{Ind}}{kWh}\right]$
Formwerkzeuge	$Ind(x) = \frac{n(x) \cdot CF(x,Ind)\ \left[\frac{Einheit_{Ind}}{kg}\right]}{Produktionsvolumen(x)}$
Ausstattung NRC	$Ind(x) = \frac{t(x)\ [h] \cdot CF(x,Ind)\ [Einheit_{Ind}]}{\left(jährl.\ Betriebszeit(x)\ [\frac{h}{a}] \cdot Lebensdauer(x)\ [a]\right)}$

Dabei ist die Syntax der verwendeten Größen ähnlich der Formeln aus Tab. 3.2. Zusätzlich kommt die Abkürzung $Ind(x)$ für Indikator des Elementarflusses x hinzu. Der Umwelteinfluss durch die Wartung der Gerätschaften der Kategorie Ausstattung wurde bei dem Modell vernachlässigt.

3.3 Umsetzung der Elementarflussanalyse im EEAM

Die Elementarflussanalyse ist ein Teilbereich des LCAs. Sie besteht aus dem LCI und dem LCIA. Die Elementarflüsse des Produktsystems werden in Form eines LCI dokumentiert und entsprechend ihrer jeweiligen Quantität mit den korrespondierenden CF verrechnet. Als Ergebnis erhält man die ökonomischen und ökologischen Auswirkungen des jeweiligen Elementarflusses. Wie zuvor in Kap. 2.3 ist diese Verknüpfung zwischen LCI und LCIA durch die EEAM-Software realisiert. Die Durchführung der LCIA ist im voherigen Kapitel durch einfach lineare Gleichungen mathematisch beschrieben und wird ebenfalls durch die Software ausgeführt.

Wie soeben erläutert, spielt die Software eine Schlüsselrolle in der Durchführung der Bewertung. Die Arbeit beruht auf der Python-basierten EEAM-Software mit Stand Dezember 2021. In dieser waren bereits Datenbank-Struktur, Einlese- und Rechenfunktionen für die Bewertung von Fertigungsprozessen implementiert. Im Rahmen dieser Untersuchung erfolgte zunächst eine Aktualisierung der Python Version 2.7 auf die Version 3.8. Desweiteren wurde das Programm um weitere Datenbank-Kategorien sowie -Einträge, die Funktion der Generierung individuell angepasster Prozessmodul-Datenblätter und

der LCIA-Formeln zu Berechnung der neueingeführten Umweltindikatoren erweitert. Dafür erforderte es zusätzlich einer Anpassung der vorhandenen LCIA-Formeln. Neben der Generierung der Daten zur Bewertung des Produktsystems wurde ein Visualisierungstool für eine benutzerfreundliche und interaktive Präsentation der Ergebnisse realisiert.

Die Arbeitsweise des Programms wird in Abb. 2.6 grob dargestellt. Aus der Darstellung ergeben sich die vier Aufgaben der Software. Dem Sammeln der Daten, Bereitstellen und Synchronisieren der Datenbank, dem Aktualisieren der Prozessmodul-Datenblätter und dem Berechnen der LCIA sowie dem Präsentieren der daraus resultierenden Ergebnisse. Die Realisierung der Elementarflussanalyse steckt in den vier Teilaspekten des Programms. In Abb. 3.3 ist der grundlegende Programmablauf visualisiert. Zu Beginn stehen LCI und Datenbank als Excel-Tabellen (siehe Anhang Abb. B.2). Die darin gespeicherten Daten werden durch die Python-basierte Software ausgelesen, in CSV-Dateien umgewandelt und in interne Variablen in Form von Matrizen gespeichert. Auf Basis dieser Matrizen erfolgt zunächst ein Datenabgleich. Dabei werden die LCI-Einträge gegenüber den Datenbankeinträgen verglichen und auf z.B. die Richtigkeit der Versionsnummer, der Elementarfluss-IDs oder der Elementarflusskategorien überprüft. Neben dem Abgleich erfolgen weitere Datenchecks und potentielle Fehlerbehandlungen für inkorrekte Inputformate. Die Matrizen werden danach formatiert und in eine zur Weiterverarbeitung praktische Datenstruktur gebracht. Diese nun fehlerfreien Matrizen werden an die für die Berechnung zuständige Funktion weitergegeben. Für die Berechnung iteriert das Programm die Elementarflüsse des LCIs durch und wendet je nach Kategorie des jeweiligen Elementarflusses die Berechnungsformel für ökologische oder ökonomische Indikatoren an. Die dafür nötigen CF werden mithilfe der Elementarfluss-ID, welche mit den Prozessparametern in der Matrix des LCIs gespeichert sind, aus der Matrix der Datenbank ausgelesen und bereitgestellt. Ergebnis sind die DC und CF der ökonomischen Indikatoren der jeweiligen Elementarflüsse. Diese werden entsprechend der Kategorien zu einzelnen Werten je Indikator und je Kategorie aufsummiert. Zusätzlich erfolgt eine Summierung aller Kategorie-Werte zu einem totalen Wert je UP. Diese Werte werden in einer neuen Matrix zwischengespeichert sowie als Excel- und CSV-Datei exportiert, um sie weiterführend nutzbar zu machen (siehe Anhang Abb. A.1). Neben dem Export der Ergebnisse erfolgt eine interaktive Visualisierung dieser über ein HTML-basiertes Visualisierungstool (siehe Anhang Abb. A.2).

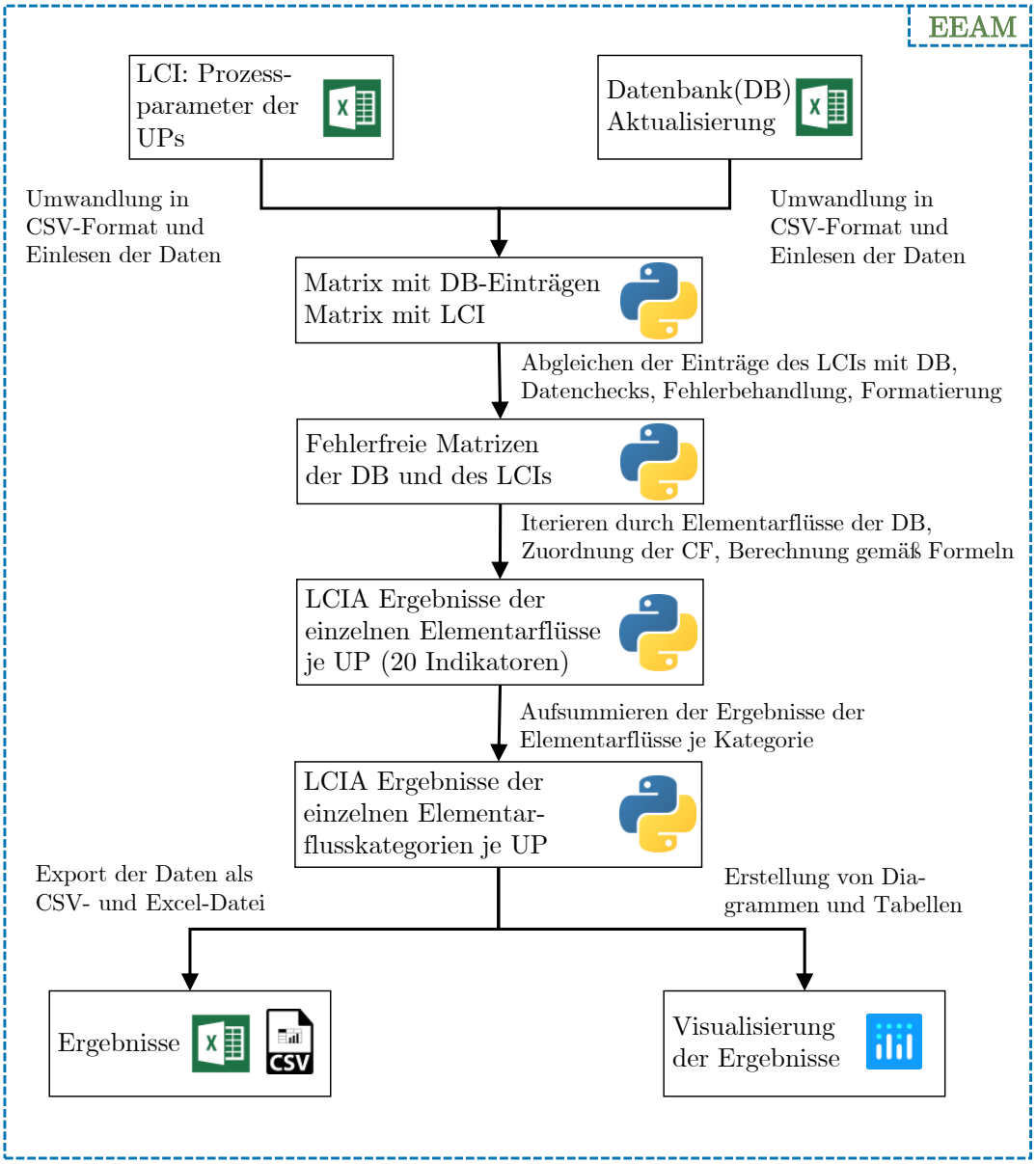


Abbildung 3.3: Vorgehensweise des EEAMs zur Durchführung der LCIA

4 Fallstudie

Aufbauend auf den Grundlagen aus Kap. 2 und dem Erstellen des Modells zur Elementarflussanalyse sowie dessen Integration im EEAM in Kap. 3, soll in diesem Abschnitt das konzipierte Modell am Beispiel einer Fallstudie Anwendung finden. In diesem Kapitel wird zunächst der Untersuchungsgegenstand der Studie erklärt. Dabei werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen der Fallstudie definiert sowie Anforderungen und Kriterien an diese festgelegt. Anschließend werden die Sachbilanz und die Vorgehensweise zur Wirkungsabschätzung dargestellt und deren Integration im EEAM aufgezeigt.

4.1 Untersuchungsgegenstand

Nach ISO 14044 ist es für das LCA notwendig das Produktsystem und den Rahmen der Bewertung ausreichend zu definieren [15]. Mit den Abschnitten zur Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens, der Sachbilanz und der Wirkungsabschätzung wird der in der Norm festgelegte, konzeptionelle Bestandteil abgearbeitet. In der Modellierung und Parametrisierung im EEAM wird das konkrete Vorgehen und Inhalt des LCI und der LCIA geklärt.

4.1.1 Festlegung des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Die Fallstudie untersucht den Fertigungs- und Montageprozess eines Flügelholms für ein unbemanntes Ultraleicht-Stratosphärenflugzeug (siehe Abb. 4.1). Das Projekt nennt sich Hochfliegende unbemannte Plattform (HAP). Für die Montage werden mehrere gewickelte Prepreg-FVK-Bauteile miteinander verklebt (siehe Abb. 4.2). Die Untersuchung beinhaltet die Fertigung der Bauteile, Vorbereitung, mechanische Bearbeitung des Innen- und Außenholms sowie einer kürzeren Hülse, das Fügen mittels Kleben und der Aushärtung. Der Fokus dieser Studie liegt dabei auf der Montage. Die Prozessparameter der Fertigung der Bauteile wurden als Teil der Untersuchung gemessen und werden ausgewertet. Sie dienen als Grundlage der Sachbilanz der Montage und sollen keinen größeren Schwerpunkt der Untersuchung darstellen.

Diese Studie verfolgt das Ziel, die mit der Montage verbundenen ökonomischen und ökologischen Auswirkungen quantitativ zu untersuchen und vergleichbar zu machen. Da durch Literarturrecherche keine vergleichbaren Studien gefunden werden konnten, ist es ein weiteres Ziel einen Beitrag zu dem noch unbehandelten Thema der ökologischen Bewertung von Montageprozessen mit Faserverbundmaterial zu leisten. Die Bewertung

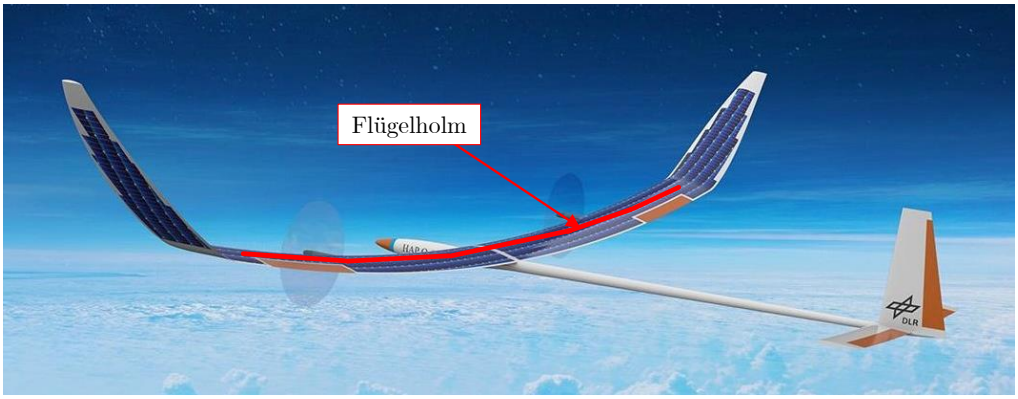


Abbildung 4.1: Illustration des HAP-Designs [20]

wird als ALCA durchgeführt

Bei dem zu untersuchenden Produktsystem handelt es sich um die Fertigung und Montage einzelner Bauteile zu einem Flügelholm (siehe Abb. 4.3) eines Flugzeugs. Die Untersuchung beschäftigt sich nicht mit der finalen Integration der Baugruppe in den Flugzeugflügel, sondern lediglich mit den Prozessmodulen der Fertigung mehrerer Bauteile und der Montage dieser zu einem Holmsegmet. Der Flügelholm ist ein Strukturbauteil und muss zur Gewährleistung der Funktionalität großen mechanischen Lasten standhalten. Als Fügeverfahren wurde das Kleben gewählt. Als funktionelle Einheit wurde „Die Fertigung und Montage zweier CFK Holme mit einer kleineren CFK Hülse zu einer Baugruppe durch Verklebung, die eine Länge von 760 mm, einen Innendurchmesser von 145 mm und ein Gewicht kleiner 0.5 kg besitzt“ definiert. Für die Herstellung der zwei Holme und der Hülse werden sie mit Kohlenstoff-Epoxid Prepregmaterial gewickelt und in einem Mikrowellen-Autoklav unter Vakuumbedingung ausgehärtet. Bei den in der Fallstudie untersuchten Holmen handelt es sich um Probekörper. Sie wurden gefertigt, um in einer Zugprüfung die Festigkeit des Materials und der Verbindung nachzuweisen.

Systemgrenze

Die angefertigte Ökobilanz kann als Cradle-To-Gate Bewertung angesehen werden. Die Elementarflüsse werden unter Betrachtung der eingebetteten ökologischen und ökonomischen Auswirkungen verrechnet. So stecken in den verwendeten Bauteilen bereits die Kosten, CED und Midpoint-Indikatorwerte, die für dessen Produktion aufgewandt wurden und werden mit Einbringen in das zu untersuchende Produktsystem in der Sachbilanz mit aufgeführt. Transportwege werden bei der Studie zu großen Teilen vernachlässigt. Die eingebetteten Werte der Produktion der Werkzeuge und Maschinen, welche zur Montage verwendet wurden, werden durch Annahmen in die Bewertung einbezogen.

In dem LCA werden alle Prozesse der Montage von der Lagerung der Bauteile bis zum

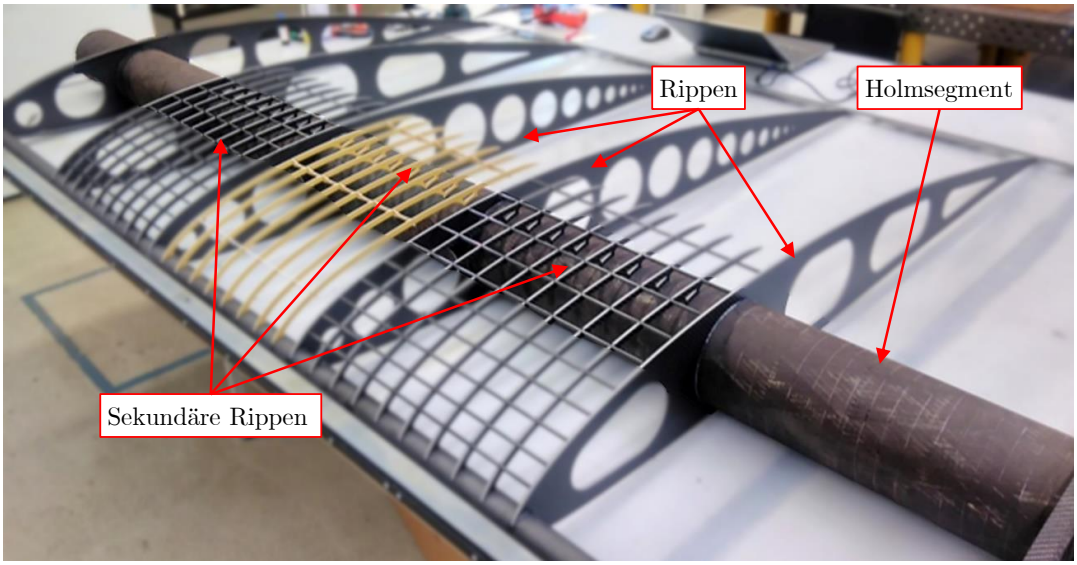


Abbildung 4.2: Darstellung des integrierten Flügelholms [20]

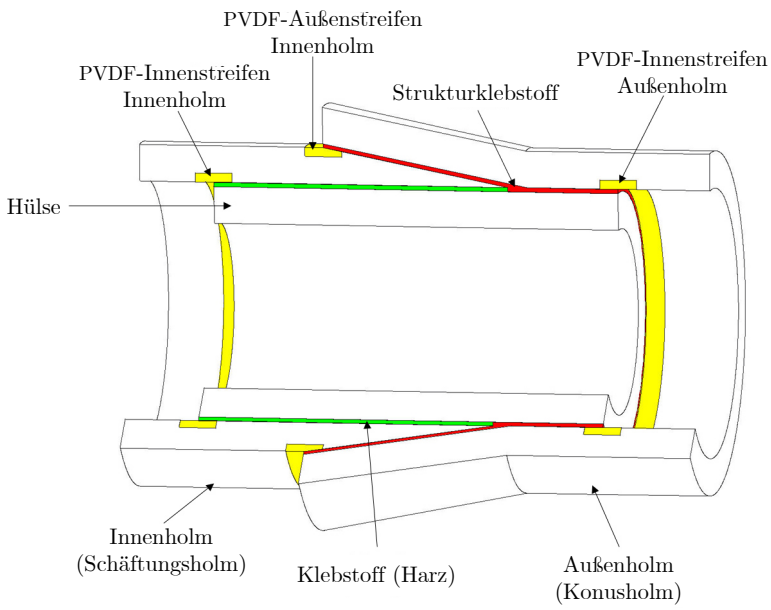


Abbildung 4.3: Darstellung der Klebung

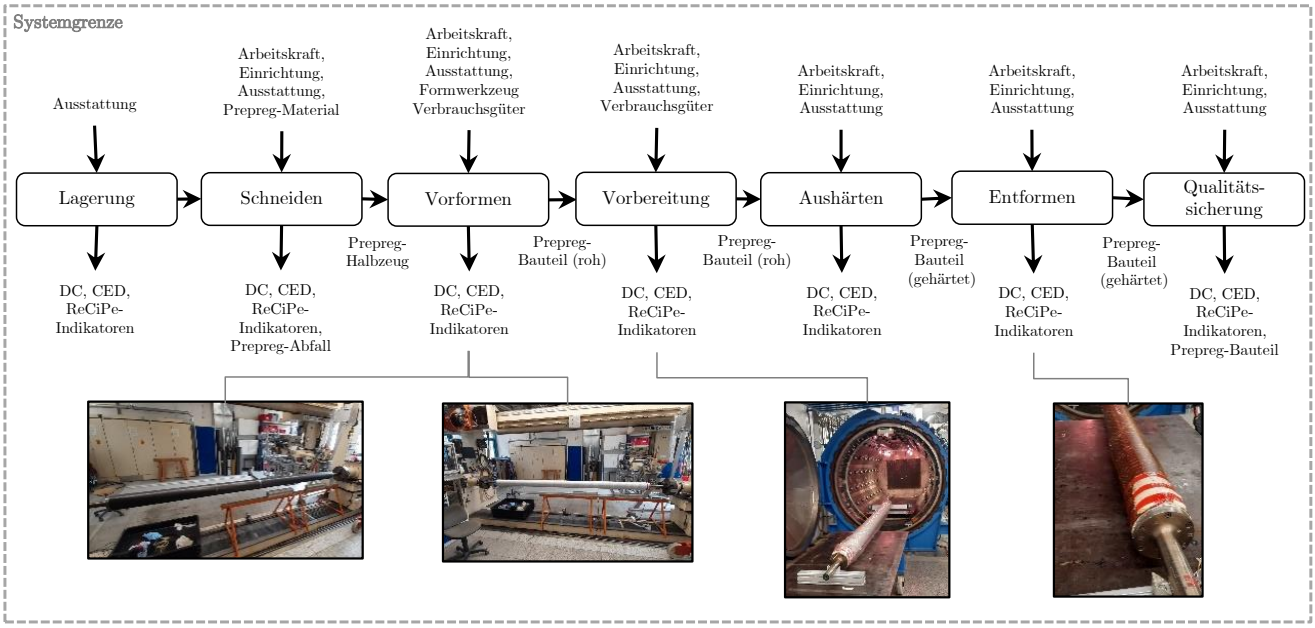


Abbildung 4.4: Systemgrenze der Fertigung

finalen Zustand des ausgehärteten Holmssegments betrachtet. Die beiden Prozesse der Fertigung und der Montage werden separat betrachtet. Zunächst erfolgt die Cradle-To-Gate Bewertung der Fertigung. Die daraus hervorgehenden Ergebnisse dienen wiederum als Input zur Bewertung der Montage. Die Umwelteinwirkungen durch die Fertigung der Bauteile sind durch Midpoint-CF der einzelnen ökologischen Indikatoren in den Elementarfluss der Bauteile eingebettet. Abb. 4.5 und Abb. 4.4 veranschaulichen die Systemgrenzen des untersuchten Produktsystems und alle drin enthaltenen Prozesse. Für die UP der Fertigung und Montage gelten die in Abb. 4.5 und Abb. 4.4 dargestellten Schemata des Allokationsverfahrens der Elementarflüsse.

Zur Wirkungsabschätzung werden für die Fallstudie die in Kapitel 2.2 vorgestellten Indikatoren der ReCiPe2008 LCIA-Methode und der CED verwendet. Das LCIA nach ReCiPe wird dabei mit der hierarchischen Perspektive durchgeführt. Es wurde sich für ReCiPe2008 statt für das neuere ReCiPe2016 entschieden, da die verwendeten Einträge der genutzten EcoInvent-Datenbank diese Methode vorgaben. Innerhalb der Untersuchung wird zusätzlich eine Kostenbewertung durchgeführt und neben den Umweltauswirkungen auch die DC der Prozesse bestimmt. Als Methode hierfür werden die ebenso bereits erläuterten MFKR und ABC Methoden verwendet.

Als Arbeitskraft waren Menschen drei verschiedener Gehaltsklassen in den Prozessen involviert: Studierende, Techniker:innen und wissenschaftliche Mitarbeiter:innen. Die Arbeiten wurden am DLR Braunschweig in einer teils klimatisierten-, teils unklimatisier-

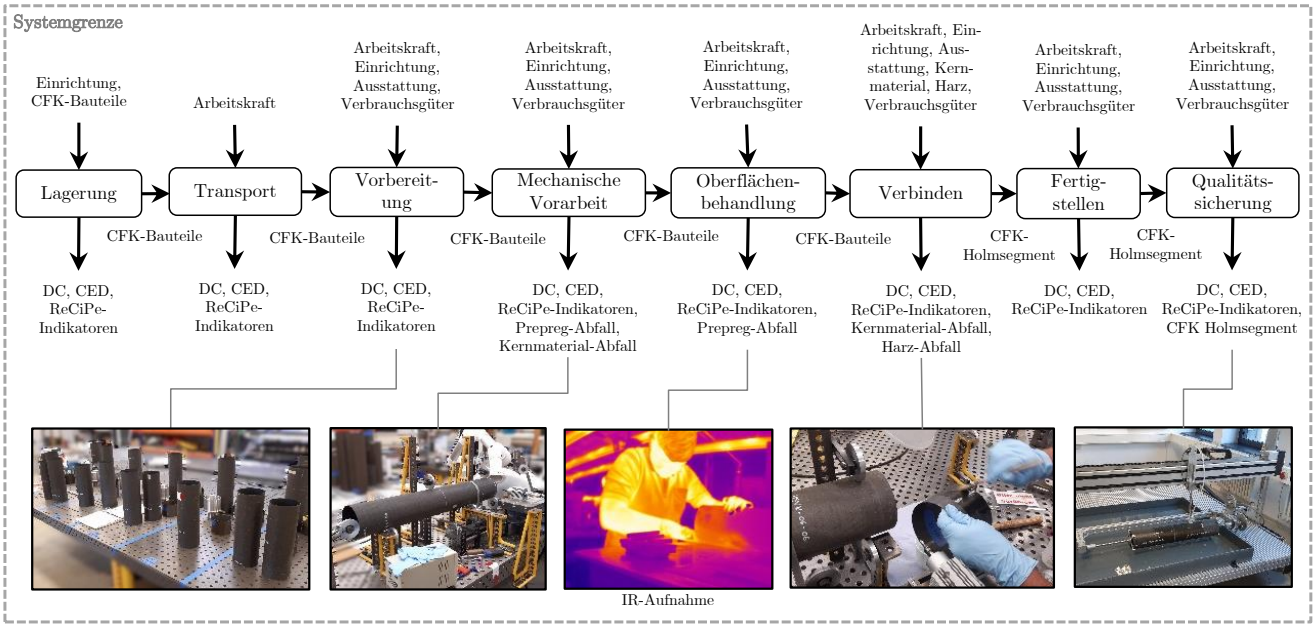


Abbildung 4.5: Systemgrenze des Montageprozesses

ten Laborumgebung durchgeführt. Als Material wurde Kohlenstoff-Epoxid Prepreg mit einer Zusammensetzung von 34% Epoxidharz und 66% Kohlenstofffaser gewählt. Das Prepreg-Material erfordert für die Lagerung Temperaturen von -18°C. Zur Lagerung der Halbzeuge wurde ein 20-Fuß Kühlcontainer genutzt. Neben der Wickelmaschine, mit einer maximalen Einspannlänge von 3.5 m, waren im Wickelprozess ein Hebekran, ein 12 kW IR-Heizer, mehrere kleine 0.8 kW Heizmodule, Werkzeuge, Laser-Längenmesser und ein ca. 3 m langes und 365 kg schweres Formwerkzeug involviert. Für das Aushärten wurde ein Mikrowellen-Autoklav mit einer Kapazität von ca. 8.04 m^3, eine Grobvakuum-Pumpe, einer Leistung von 0.08 kW, Kupferrohr, Vakuum-Schlauchadapter, Schlauchklemmen und PVC-Schlauch verwendet. Standardmäßiges Werkzeug wie Imbusschlüssel, Schraubenzieher etc. wurden in allen Prozessen verwendet. Sie sind in der LCI unter dem Elementarfluss „Werkzeugkasten“ zusammengefasst.

Für die mechanische Bearbeitung im Montageprozess fanden neben Maschinen wie Fräßspindel, Bandsäge, Tellerschleifer, Kreissäge und deren jeweils eingesetzten Bearbeitungswerkzeuge wie Diamantsägeband, polykristalline Diamant-Fräser, Schleifscheiben und Trennscheiben auch untersützende Gerätschaften für die Bearbeitungsschritte Verwendung. Dazu zählen Hochleistungsstaubsauer, ein Absaugsystem, ein Kompressor, Druckluftschlauch und -ventil, die Drehvorrichtung, eine Holzform, Lineale und Arbeitstische. Das Kleben wurde mit einem Epoxid-Harz System und einem Strukturklebstoff realisiert. Die Applikation des Letzteren erfolgte mit einer dafür kompatiblen Druckluft-Klebepistole. Das Harz hingegen brachte man mit einem Pinsel und Holzspatel auf die

Fügefläche auf. Zur Aushärtung wurde ein Wärmeschrank mit einer Kapazität von 0,24m^3 und Leistung von 2.7kW in den Prozess einbezogen. Neben den aufgezählten Gerätschaften nutzte man verschiedenste Verbauchsgüter einmaliger Verwendung in den Prozessen. Darunter befinden sich Aceton, Wasser, destilliertes Wasser, Klebeband, Vlies, Trennmittel, Handschuhe, Papierbecher, Holzspatel, Abreißgewebe, Vakuumfolie, Dichtband (Tacky Tape), Scotch-Brite, Schleifpapier, Pinsel, Kabelbinder, Aluminiumschalen, Baumwolltücher und Holzspatel. Alle diese Materialen wurden nach der Verwendung mit den teils anfallenden Prepreg-Abfall in dem Industiemüll entsorgt.

Die Fertigung und Montage wurden in Laborumgebung mit niedrigem Automatisierungsgrad durchgeführt. Das Produktionsvolumen der Bauteile ist sehr klein, wurde in manuellen, nicht-optimierten Prozessabläufen hergestellt und lässt sich deswegen schwer mit Produktionen industriellen Maßstabs vergleichen. Die Benutzung der Gerätschaften wurde dennoch mit Formeln des industriellen Maßstabs berechnet. Zum einen um dennoch vergleichbare Werte für die Bewertung der verwendeten Ausstattung zu generieren, zum anderen weil die Werkzeuge und Geräte neben diesem Produktsystem auch in vielen anderen Projekten genutzt werden und sich so die Anschaffungs-, Wartungs- und Gemeinkosten auf mehrere Projekte verteilt.

Die Daten wurden im Zeitraum von März bis Juni 2022 erhoben. Das definiert den Zeitraum der zeitlichen Begrenzung der Gültigkeit des LCAs. Die erhobenen CF stammen aus dem „cut-off“-Modell der EcoInvent Datenbank Version 3.8 [83]. Die Einträge der Datenbank haben wiederum eigene zeitliche Systemgrenzen, welche aufgrund der limitierten Datenlage vernachlässigt wurden. Für den Energiekonsum wurden die statistischen Werte des Strommixes 2021 in Deutschland genutzt.

Abschneidekriterien und Anforderung an die Datenqualität

Als Abschneidekriterien werden nach ISO 14044 die Parameter Masse, Energie und Umweltrelevanz angeführt. Für diese Arbeit gilt nur die Energie als Abschneidekriterium. Es werden alle Produkte unabhängig von Masse und Umweltrelevanz, die als Inputs/Outputs die Systemgrenze passieren, in die Bewertung miteinbezogen. Es werden Stromverbraucher mit einem Energieverbrauch kleiner als 1 kWh aufgrund von messtechnischem Aufwand von der Untersuchung abgeschnitten. Konnte wegen technischer Gründe keine Energieverbrauchsmessung durchgeführt werden, so wurde der die Zeit der Benutzung des Energieverbrauchers gemessen und mit angegebener Leistung verrechnet. Die Zeitmessung wurde mit einer handelsüblichen Uhr und einer IR-Kamera durchgeführt. Die gemessenen Zeiten wurden dabei jeweils auf die volle Minute aufgerundet.

Der Montageprozess wurde begleitet und händisch mit den nötigen Messgeräten dokumentiert. In Tab. 4.1 werden die verwendeten Messgeräte mit ihrer jeweiligen Präzision angegeben.

Tabelle 4.1: Übersicht der verwendeten Messgeräte

Messgerät	Einheit	Messbereich	Messungenauigkeit
Uhr	hh:mm:ss	00:00:00 - 24:00:00	±1 s
IR-Kamera	mm:ss:msms	00:00:00 - 99:99:99	±100 ms
Messband	m	0.001 - 3.0	±0.001 m
Datenlogger	kWh	0.01 - 9999	±0.01 kWh
Energiemessgerät groß	kWh	1 - 9999	±1 kWh
Energiemessgerät klein	kWh	0.001 - 9999	±0.001 kWh
Waage	g	1 - 6000	±1 g
Feinwaage	g	0.01 - 1000	±0.01 g

Für die erhobenen Daten der Bewertung gilt eine Anforderung an Konsistenz, Vollständigkeit und Repräsentativität. Durch die vorläufige Definition der Prozesse, der darin enthaltenen Elementarflüsse und deren Messung soll gewährleistet werden, die Bewertung nach einheitlichen Methoden durchzuführen, sodass die Daten eine wahre Grundgesamtheit der untersuchenden Produktsystems wiederspiegeln. Die erhobenen Daten werden zusätzlich ihrer Herkunft nach markiert. Sollte ein Wert nicht gemessen werden können, so wird dieser geschätzt. Die Schätzung des Wertes, wird in den Datensätzen dokumentiert. Die Datenvalidierung wird durch mehrfache Messung eines gleichen, aber zeitlich versetzten Montageprozesses gewährleistet. Somit sind für ein Produktsystem mehrfache Messungen und so auch Bewertungen vorhanden, die einander den Wahrheitsgehalt bestätigen. Zusätzlich wurden Massebilanzen durchgeführt, welche die Richtigkeit der Messungen bestätigen.

Bei der Untersuchung wurden die DC und Umwelteinflüsse resultierend aus der Entsorgung der Elemente der Kategorie Ausstattung nicht betrachtet. Zusätzlich wurden auch die DC und Umwelteinflüsse des Transports und der Infrastruktur zur Entsorgung anfallenden Mülls vernachlässigt und nur die einzelne Entsorgungsaktivität durch Verbrennung in die Bilanz einbezogen. Neben der Entsorgung gingen keine CF für den CED oder für die ReCiPe-Indikatoren außer dem GWP für die Kategorie Arbeitskraft aus der Literatur hervor. Aus diesem Grund konnte die Kategorie Arbeitskraft in der Bewertung dieser Indikatoren keinen Einfluss nehmen.

4.1.2 Sachbilanz

Die Datenerhebung wurde durch Messungen während des Fertigungs- und Montageprozesses realisiert. Die Inputs und Outputs einzelnen UPs sind im Anhang beispielhaft in Form von Datenblättern hinterlegt. Die Primärdaten der Elementarflüsse stammen aus den Messungen am DLR-Standort, Sekundärdaten wurden aus der Literatur und Ein-

trägen der EcoInvent-Datenbänken (EcoInvent v3.8 nach dem „cut-off“-Modell [1, 83]) akquiriert. Insgesamt wurden für Fertigung und Montage 81 verschiedene Elementarflüsse registriert und deren CF ermittelt.

Fertigung

Zur Erstellung des Cradle-to-Gate LCAs wird vor der Montage die Fertigung der montierten Bauteile betrachet. Für die Erstellung des LCAs der Fertigung wurde das von Al-Lami [53] definierte Modell herangezogen (siehe Abb. 4.4). Die verwendeten Holme sind sechslagig gewickelte FVK-Bauteile, welche aus Prepreg-Material gefertigt wurden. Der Prozess startet ähnlich der Montage mit dem UP der Lagerung. Das Material wird aus dem Lager geholt und aufgetaut. Währenddessen wird das Formwerkzeug in dem UP der Vorbereitung für das Wickeln vorbereitet und vorgewärmt. Das Wickeln selbst findet im UP Vorformen statt. In Abb. 4.6 sind zwei Aufnahmen des Wickel-Prozesses dargestellt. Das Formwerkzeug ist drehbar in der Wickelmaschine eingespannt. Während sich das Formwerkzeug in definierten Geschwindigkeiten dreht, fährt enstprechend eines vorab progammierten Prozessablaufs die auf Schienen gelagerte Spindel mit dem Prepreg-Material von einem zum anderen Ende der Wickelmaschine. Das Material wird dabei auf das Formwerkzeug abgelegt und haftet aufgrund des Harzanteils von allein. Während des Wickelprozesses werden die Prepreg-Endlosfasern zurechtgeschnitten. Beide Arbeitskräfte müssen nach jeder Bewegung an der jeweiligen Endposition die Endlosfaser vom gewickelten Material trennen. Zusätzlich werden vor dem Applizieren des Abreißgewebes mittig des Formwerkzeugs ca. 4cm Material herausgeschnitten. Das ist notwendig, um die Welle nach dem Aushärten entformen zu können. Diese Trennprozesse sind im UP Schneiden festgehalten. Die Holme werden nach dem Wickeln mit dem Formwerkzeug in einem Vakuumsack verpackt und unter angelegtem Feinvakuum in Hochdruck-Atmosphäre für fünfeinhalb Stunden in einem Autoklav getempert. Anschließend folgt der Entformungsprozess, woraufhin beide entformten Bauteile eingelagert werden.

Montage

Die Montage beinhaltet nach dem erstellten Modell (siehe Abb. 3.2) die UPs von dem Transport der Bauteile bis hin zum Fügen der finalen Baugruppe, der Lagerung, der mechanischen Vorarbeiten, der Vorbereitung, der Oberflächenbehandlung, dem Verbinden, dem Fertigstellen und der Qualitätssicherung. Zu Beginn existieren zwei Bauteile, die Hülse und ein langer Hohlzylinder, aus welchem später Innen- und Außenholm gefertigt werden. Die Bauteile werden zunächst aus dem Lager geholt und in die Werkstatt gebracht. Dort wird der Hohlzylinder geteilt, woraus Innen- und Außenholm resultieren. Beide werden folgend gekürzt und auf eine definierte Länge gefräst. In Abb. 4.7 ist beipsielhaft die Aktivität des Fräsens des entformten Hohlzylinders dargestellt. All diese Arbeitsschritte sind im UP mechanische Vorarbeit definiert. Zusätzlich werden die

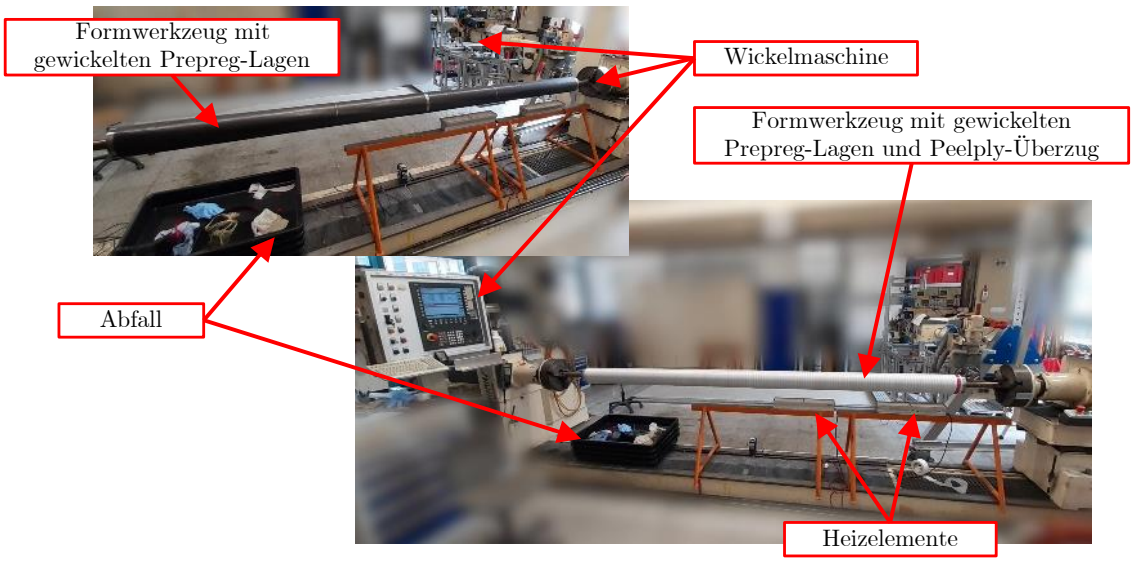


Abbildung 4.6: Wickeln des Bauteils

gefrästen Kanten entgratet, was dem UP Fertigstellen zugeordnet ist. Danach folgt der UP der Oberflächenbehandlung. Die erste Klebung findet zwischen der Außenfläche der Hülse und der Innenfläche des Innenholms statt (siehe Abb. 4.8). Dafür werden die zu fügenden Flächen erst gereinigt, geschliffen, erneut gereinigt, aktiviert und wieder gereinigt. Vor der Aktivierung wird ein klebespezifischer Qualitätscheck durchgeführt. Diese Qualitätsprüfung wird dem UP Qualitätssicherung zugeordnet. Nach der Aktivierung folgt der UP des Verbindens. Innenholm und Hülse werden mit einem Epoxidharz verklebt und an der Luft ausgehärtet (siehe Abb. 4.9).

Wenn das Aushärten abgeschlossen ist, wird der überschüssige Klebstoff entfernt. Zusätzlich wird am Innenholm eine zum Außenholm komplementäre Schäftung gefräst. Diese Aktivitäten sind wieder im UP mechanische Vorarbeit zu finden. Daraufhin folgt erneut das Reinigen, Schleifen, Reinigen, Testen, Aktivieren und Reinigen der Fügeflächen. Die Prozesse werden ähnlich der vorherigen Klebung den aufgeführten UPs der Oberflächenbehandlung und des Testens zugeordnet. Im zweiten Klebprozess werden die bereits gefügte Baugruppe des Innenholms und der Hülse mit dem Außenholm verklebt, was wiederum im UP Verbinden verortet wird. Nach der Aushärtung an der Luft wird die Baugruppe in einem Ofen getempert, um den Klebstoff in seine finale Form zu überführen. Diese Aktivität wird auch dem UP Verbinden zugeordnet. Zuletzt wird die Klebefuge abgefräst (UP Fertigstellen) und in einem Ultraschalltest-Labor untersucht (UP Testen). Dafür wird die finale Baugruppe von der Werkstatt in das Labor transportiert (UP Transport). Dem UP Transport wurden nur Transportaktivitäten die länger als eine Minute andauerten zugeordnet. Aktivitäten unter dieser Zeit werden den jeweiligen anderen UPs, in denen der Transport geschieht, zugeordnet.

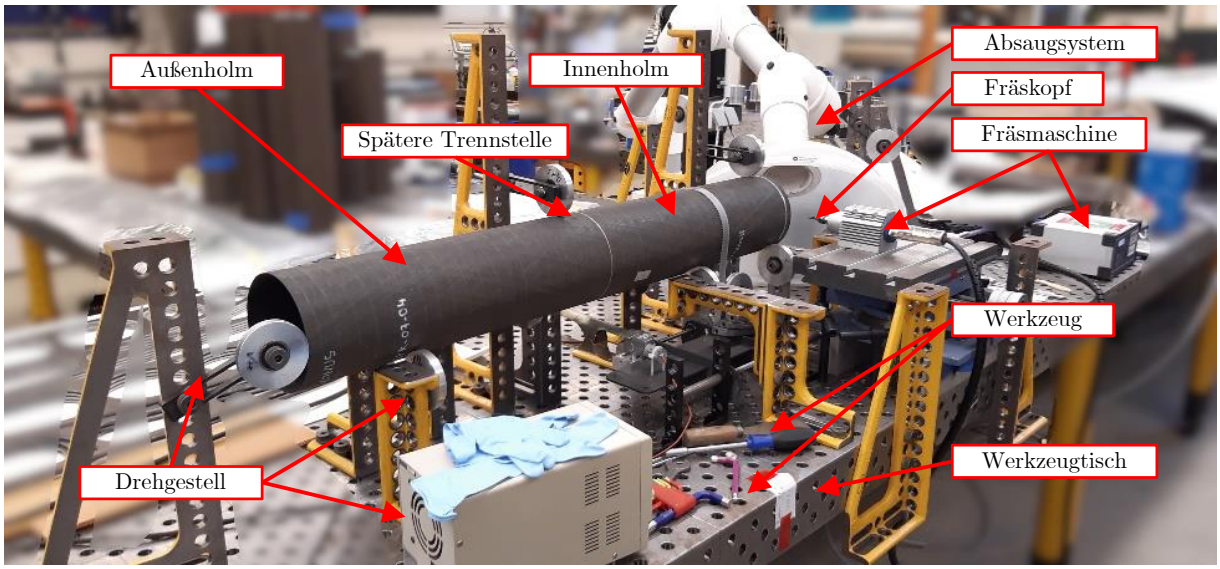


Abbildung 4.7: Fräsen des Hohlzylinders vor dem Teilen in Innen- und Außenholm

Hier endet die definierte Systemgrenze. Der gefügte Holm wird anschließend mit weiteren Holmen verklebt und als tragende Struktur im Flügel des Flugzeugs integriert. Die weitere Integration wurde aufgrund von Arbeitsaufwand und projektinterner Gegebenheiten nicht untersucht. Bei den untersuchten Holmen handelt es sich um Probekörper. Sie wurden gefertigt, um in einer Zugprüfung die Festigkeit des Materials und der Verbindung nachzuweisen.

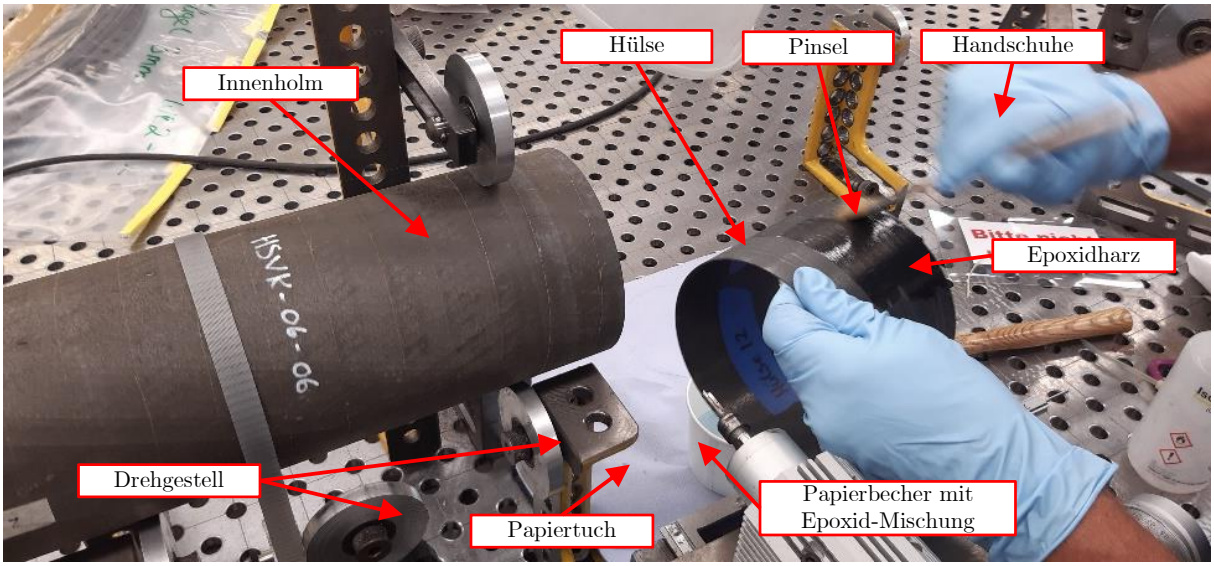


Abbildung 4.8: Verklebung von Innenholm und Hülse

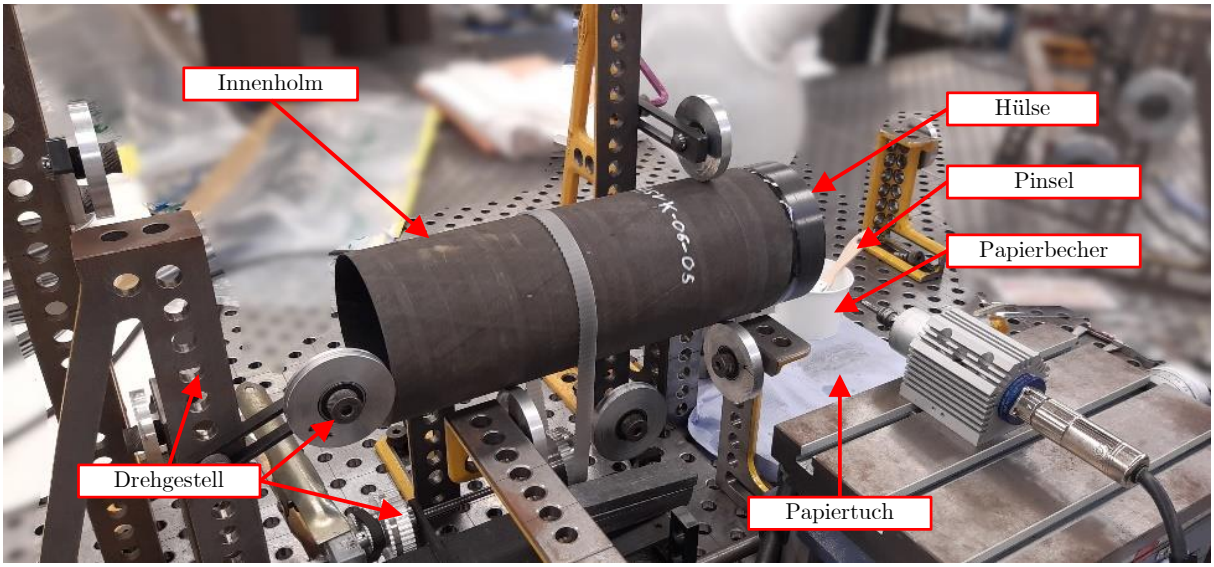


Abbildung 4.9: Aushärten der Verklebung

4.2 Modellierung und Parametrisierung der Fallstudie im EEAM

Für die Überführung der Fallstudie in das EEAM wurde das in Kap. 3 erstellte Modell genutzt. In jenem Modell werden die realen Prozesse durch die UP abstrahiert. Die Zuordnung der realen Prozesse zu den definierten UP wurde bereits im vorherigen Kap. 4.1 erläutert. Die Abstrahierung der einzelnen Aktivitäten zu UP unabhängig chronologischer Reihenfolge ist damit zu erklären, dass ein generisches Modell Verwendung finden soll, das technisch unterschiedliche Montageprozesse durch einheitliche Struktur vergleichbar macht. Zudem handelt es sich bei dieser Untersuchung um eine Bauteilbewertung, nicht um eine Anlagenbewertung. Deswegen spielt die zeitliche Reihenfolge der Elementarflüsse unter den UP eine untergeordnete Rolle. Zuletzt ist zu erwähnen, dass die Visualisierung bei der Entscheidung der Modellierung auch einen gewissen Stellenwert hat. Je komplexer das Bauteil, desto mehr Aktivitäten sind in der Regel notwendig, dieses zu fertigen. Wird die Bewertung nach Aktivitäten ausgeführt, so erhöht sich mit steigender Anzahl an Aktivitäten die Unübersichtlichkeit der Darstellung und mindert ab einem gewissen Punkt die Effizienz der Aufgabe des Entscheidungsunterstützungstools. Aus diesem Grund wurden bei der Montage die insgesamt 31 gemessenen Aktivitäten acht UPs zugordnet. Bei der Fertigung war das Vorgehen weniger komplex, sodass nur neun gemessene Prozessaktivitäten sechs UPs zugeordnet worden. Die Zuordnung der Aktivitäten während des Montageprozesses erfolgt gemäß Abb. 4.5 auf Basis der zweiten und dritten Ebene des in Abb. 3.2 dargestellten Modells. Bezüglich der Fertigung erfolgte die Zuordnung nach dem in Al-Lami vorgestellten Modell [53], dargestellt in Abb. 4.4. Die Transportaktivitäten wurden dabei dem UP Vorbereitung zugeordnet.

Die Prozesse zur Fertigung und Montage wurden vor Durchführung jener durch Prozessanweisungen definiert. Auf Basis dieser Prozessanweisungen wurden die darin erwähnten Maschinen, Materialien, Verbrauchsgüter, etc. als Elementarflüsse in die Datenbank überführt. Weitere nicht definierten Elementarflüsse, die während der Durchführung zusätzlich in das System ein- oder rausgingen, wurden dokumentiert und vor der Bewertung in die Datenbank eingepflegt. Neben der Registrierung des Elementarflusses in der Datenbank ist die Ermittlung der CF notwendig. Aus Tab. 3.1 geht hervor, welche Elementarflusskategorie welche CF zur Bewertung benötigt. Der Anspruch bei der Ermittlung der CF lag darin möglichst genaue Werte für die Elementarflüsse zu finden. Konnten keine Werte anhand valider Quellen gefunden werden, so wurde je Elementarfluss nach Komplexität und Relevanz für die Bewertung abgewogen, ob ein Wert geschätzt oder vernachlässigt wird. Dabei wurden die CF nur in wenigen Fällen tatsächlich vernachlässigt, was an den betreffenden Stellen deutlich benannt wird. Die Kosten je Einheit wurden zu größten Teilen aus internen Informationen zu Einkäufen ermittelt. Wenn das nicht möglich war, so sind die Werte aus den Angaben auf den Internetseiten potentieller Zulieferer entnommen worden. Die KPE der Ausstattung entspricht dem Strompreis von 0.1445 €/kWh, entnommen aus der Eurostat-Statistik für das Jahr 2021 [27]. Die Lagerzeit beruht auf den Schätzungen des zuständigen Perso-

nals, wohingegen für die Lagerfläche der grob-überschlagene Wert der Grundfläche des zulagernden Objekts genutzt wurde. Als Produktionsvolumen des Formwerkzeugs wurde eine Stückzahl von 30 angenommen. Die Fügefläche der Montage ergibt sich aus der kontaktierten Fügefläche zwischen Innenholm und Hülse, summiert mit der Fügefläche von Außenholm mit Innenholm und Hülse.

Die Masse je Einheit wurde für die jeweiligen Elemente durch einfache Messung und Normierung durchgeführt. Die Anschaffungskosten, welche lediglich die Kategorie Ausstattung betrifft, wurden ähnlich der Kosten je Einheit akquiriert. Die Anschaffungskosten der Einrichtung wurden vernachlässigt, da es dafür keine Daten gab. Für die Entsorgungskosten der Verbrauchsgüter und Materialabfälle wurde nur mit zwei Werten gearbeitet. Die Entsorgung des Materials findet über die Kategorie Gewerbemüll statt, wobei eine Beseitigung mittels Müllverbrennungsanlage angenommen wurde. Dementsprechend ergab eine Recherche Kosten von ca. 200 €/t gewerblichen Mülls und ca. 245 €/t gefährlicher Abfälle wie z.B. ungehärteter Prepreg-Abfall. Die Kosten für die Entsorgung beinhalten nur die Dienstleistungskosten der Müllverbrennung. Kosten für Abfallmanagement und Abfalltransport konnten nicht ermittelt werden und werden deswegen vernachlässigt. Lebensdauer und jährliche Wartungskosten wurden auf Basis von Schätzungen internen Personals erhoben. Aufgrund der ungenauen und inkonsistenten Angaben zu den Wartungskosten wurden diese aus der Bewertung ausgeschlossen. Die jährliche Betriebszeit wurde mit 3808 h angegeben. Das entspricht 272 Arbeitstagen pro Jahr mit sieben Stunden Arbeitszeit je zwei Schichten pro Tag.

Die ökologischen Indikatoren des CEDs und der ReCiPe-Methode wurden in zweifacher Ausführung in die Datenbank integriert. Einmal sind für alle Kategorien die neunzehn CF als jeweiliger Indikator je Einheit definiert. Zum Beispiel sind die CF für das GWP für Materialien, deren Messung in Kilogramm definiert ist, in der Einheit kgCO_2-Eq/kg eingetragen. Die zweite Ausführung der CF für ökologische Indikatoren ist lediglich für die Kategorie Ausstattung, welche neben der Einrichtung als Einzige messbaren Stromverbrauch beinhaltet. Die ebenfalls neunzehn CF sind als jeweiliger Indikator in dessen Einheit pro Kilowattstunde definiert. Bei der Kategorie Einrichtung fällt zwar Strom während des Benutzens jener an, dieser ist aber bereits global in den CF Indikatoreinheit je Kategorie-Einheit integriert.

Die Ermittlung der CF wurde mithilfe von Annahmen und der EcoInvent Datenbank realisiert. Aus urheberrechtlichen Gründen werden keine konkreten CF der Elementarflüsse gezeigt, sondern lediglich die Benennung des jeweils verwendeten Elements angegeben. Das Vorgehen soll am Beispiel der Werte für den Konsum elektrischer Energie skizziert werden. Die CF für den Stromverbrauch je Kilowattstunde setzen sich aus verschiedenen Energiequellen zusammen. Die Stromzusammensetzung stammt aus den Daten des Fraunhofer ISE für das Jahr 2021 [76]. Je Energieträger wurde der prozentuale Anteil ermittelt und auf eine Kilowattstunde umgerechnet. Den einzelnen Energieträgern

Tabelle 4.2: Zusammensetzung der CF des Stromverbrauchs im Strommix2021 nach [1, 76]

Energieträger	Stromerzeugung in TWh	in %	Annahmen EcoInvent Element	Geographie
Braunkohle	98.9	20.2	electricity production, lignite	DE
Steinkohle	46.4	9.5	electricity production, hard coal	DE
Kernenergie	64.3	13.4	electricity production, nuclear, boiling water reactor	DE
Erdgas	51.1	10.4	electricity production, natural gas, combined cycle power plant	DE
Windenergie	112.7	23.0	electricity production, wind, 1-3MW turbine, offshore	DE
Photovoltaik	48.4	9.9	electricity production, photovoltaic, 3kWp slanted-roof installation, multi-Si, panel, mounted	DE
Biomasse	43.1	8.8	heat and power co-generation, biogas, gas engine	DE
Wasserkraft	19.3	3.9	electricity production, hydro, reservoir, non-alpine region	DE
sonstige	3.9	0.8	-	-

wurden CF definierter Elementarflüsse der EcoInvent Datenbank zugeordnet und mithilfe der vorher ermittelten Verteilung die CF für eine Kilowattstunde des Strommixes 2021 berechnet. Die Werte bzw. Einträge sind Tab. 4.2 zu entnehmen.

Für die Arbeitskraft sind keine Daten für die ReCiPe CF in der EvoInvent Datenbank vorhanden. Dennoch wurde für die Bewertung ein Wert für das GWP einer Arbeitskraft pro Stunde aus der Literatur genutzt. Für die Kategorie Einrichtung gibt es zwei Elemente, klimatisierte und nicht-klimatisierte Einrichtung. Während sich die CF der nicht-klimatisierten Einrichtung aus den Umwelteinflüssen des Gebäudebaus, der Beleuchtung und Heizung zusammensetzen, kommt bei den CF der klimatisierten Einrichtung zusätzlich der Einfluss der Lüftung, in welcher die Kühlung integriert ist hinzu. Die Lebensdauer des Gebäudes wurde mit einer Zeit von 30 Jahren geschätzt. Diese Einflüsse wurden über weitere Annahmen und Schätzungen quantifiziert. Aufgrund der Komplexität und Schwierigkeit der Ermittlung dieser Umwelteinflüsse wurden keine weiteren Aspekte hinzugefügt und dahingehend vernachlässigt.

Als weiteren wichtigen Punkt soll auf die CF des Prepreg-Materials eingegangen werden. Die Herstellung des Kohlenstofffasermaterials aus Polyacrylnitril (PAN) gilt als ein sehr energieaufwändiger Prozess mit hoher Umwelteinwirkungen [58]. In der EcoInvent-Datenbank gibt es nur einen Eintrag zu CFK-Material, welcher für ein Kilogramm bereits gefertigtes Material gilt und deswegen für diese Anwendung unbrauchbar ist. Weitere

Tabelle 4.3: Zusammensetzung der CF des Prepreg-Materials

Zusammensetzung	Anteil	Annahmen: Element	Geographie
Kohlenstofffasern	66%	interne Studie	DE
Epoxidharz	34%	EcoInvent: epoxy resin production, liquid	Europa
+ 40MJ Herstellung [73]		eigener Datensatz Strommix 2021 (siehe Tab. 4.2)	DE

Quellen sind nicht verfügbar. Aus diesem Grund wurde ein unternehmensinterner Datensatz genutzt, der bei der Simulation der Herstellung von Kohlenstofffasern ohne explizit erwähnten PAN-Precurser generiert wurde [3]. Diese Simulation ist noch in Entwicklung und die Daten erscheinen ähnlich der Vergleichswerte aus anderen Literaturquellen. Das Modell auf dem die Werte beruhen ist jedoch noch nicht finalisert und weist Lücken auf. Dennoch wurde sich aufgrund mangelnder Alternativen für diesen Datensatz entschieden. Für die Fertigung der Bauteile wird Prepreg-Material, also Fasermaterial, welches bereit mit Harz benetzt ist, verwendet. Das Material hat dabei einen Fasergehalt von 66%. Daraus ergeben sich gemäß Tab. 4.3 die CF für das Prepreg-Material.

Für die Entsorgung des Prepreg-Abfalls wurde dem Elementarfluss zusätzliche Eigenschaften zugeschrieben. Nach Vo Dong et al. [79] entsteht bei der Entsorgung des CFK-Abfalls durch Verbrennung zusätzlich 32 MJ Energie und 0.08 kg Asche je Kilogramm Abfall. Diese Asche muss anschließend auf einer Deponie entsorgt werden. Diesen Angaben zufolge wird dem Prepreg-Abfall ein negativer Wert äquivlent zu 32 MJ elektrischer Energie zugeordnet und zusätzlich die Entsorgungseinflüsse durch Verbrennung (EcoInvent: market for hazardous waste, for incineration; Geography: Europe without CH [1]) und Entsorgung auf der Deponie (EcoInvent: market for process-specific burdens, residual material landfill; Geography: Europe without CH [1]) aufsummiert. Beide Klebungen werden mit unterschiedlichen Klebstoffen durchgeführt. Die erste Klebung erfolgt mit Epoxid-Harz, für dessen CF die Werte des EcoInvent-Eintrags aus Tab. 4.3 verwendet werden. Der Klebstoff der zweiten Klebung ist ein Strukturklebstoff, dessen beinhaltete Chemikalien-Zusammensetzung in der EcoInvent Datenbank nicht gefunden werden konnte. Aus diesem Grund wurde für diesen Klebstoff angenommen, dass er auf Polyurethan-Basis hergestellt wurde. Ein entsprechender Eintrag wurde unter „EcoInvent: polyurethane adhesive production; Geography: Europe without CH [1]“ gefunden und verwendet.

Zuletzt soll noch ein Beispiel für die CF der Ausstattung angeführt werden. Für keine der für den Prozess benutzten Elemente existiert von Seite der Hersteller ein LCA, EcoSheet oder EPDS (environmental product declaration sheet). Dementsprechend fällt

es schwer, CF für die jeweiligen Produkte zu finden. So wurden für die Kategorie teilweise sehr grobe Annahmen getroffen. Für die Wickelmaschine, welche zu größtem Anteil aus massivem Stahl besteht, ergeben sich die CF aus dem Umweltwirkungsäquivalent der Menge Stahl, die in der Maschine verbaut wurden. Mittels grober Schätzung wurde angenommen, dass die Maschine aus ca. 1.5 t Stahl besteht und diese Menge mit den CF für „EcoInvent: steel production, electric, low-alloyed; Geography: A [1]“ multipliziert der Umwelteinwirkung der Wickelmaschine entspricht.

5 Bewertung der Fallstudie

Nach der Definition des Produktsystems und dessen Systemgrenze sowie der Parametrisierung von CF der Elementarflüsse der Fallstudie werden in diesem Kapitel die Ergebnisse der Bewertung der Fallstudie vorgestellt. Die Fertigungs- und Montageprozesse wurden gemessen und die erhobenen Prozessparameter als LCI in ein für das EEAM kompatibles Format überführt. Mithilfe des EEAMs wurden die gemessenen Prozessparameter mit den Datenbankeinträgen der Elementarflüsse verknüpft und deren Wirkungsindikatoren ermittelt. Im Folgenden sollen die Ergebnisse der LCIA für Fertigung und Montage des Holmsegments vorgestellt und diskutiert werden. Neben der Diskussion findet sich zusätzlich eine Validierung der Bewertung. Die ökologischen Midpoint-Indikatoren nach ReCiPe werden dabei mit den Bezeichnungen der jeweiligen CF der Wirkungskategorien benannt. Diese Faktoren scheinen bezeichnender und differenzierbarer als die Indikatorbezeichnungen selbst zu sein.

5.1 Ergebnisse der Bewertung der Ökoeffizienz

Die Auswertung der Bewertung ist zweigeteilt. Zunächst wird auf die Bewertung der Fertigung, danach auf die Bewertung der Montage eingegangen. Dabei sind wiederum erst die Ergebnisse der ökonomischen, dann die der ökologischen Bewertung aufgeführt. Die Diskussion dieser Ergebnisse ist dem darauffolgenden Abschnitt zu entnehmen.

5.1.1 Bewertung der Fertigung

Der Prozess zur Fertigung der Bauteile wurde während zwei zeitlich unterschiedlicher Fertigungen begleitet, dessen Prozessparameter gemessen und bewertet. Beide Prozesse ähneln sich, wobei die bewerteten Indikatoren beider Fertigungen Abweichungen von ca. 0.90% bis 7.05% relativ zum Mittelwert zeigen. Die Ergebnisse beider Bewertungen sind in Tab. 5.1 gelistet. Zur Darstellung und Nutzung der Ergebnisse für die Montage wurden die Mittelwerte beider Bewertungen gebildet. Für die Fertigung ergeben sich DC von rund 1180 €/kg Bauteil. Die Kostenverteilung ist Abb. 5.1 und Abb. 5.2 zu entnehmen. Das kostenaufwändigste Prozessmodul stellt das Vorformen (Wickeln) dar. Die größten Kostenpunkte sind dabei die Kosten durch Arbeitskräfte und durch das Formwerkzeug. Hierbei ist zu erwähnen, dass das Formwerkzeug einen so gewaltigen Kostenpunkt darstellt, weil es sich um eine Fertigung in Labormaßstab in sehr geringer Produktionszahl handelt. Dementsprechend sind die Kosten für das Formwerkzeug je Fertigung sehr hoch. Nach dem Vorformen folgt in der Kostenverteilung an zweiter Stelle die Vorbereitung. Sie schließt die Vorbereitungsprozesse vor dem Wickeln sowie die Vorbereitung vor dem

Tabelle 5.1: Ergebnisse der LCIA der Fertigungsprozesse

Indikator	Einheit	Fertigung 1	Fertigung 2	Mittelwert	Standardabweichung
DC	€	1986.36	1867.02	1926.69	4.38 %
CED	MJ oil-Eq	3838.95	4092.16	3965.56	4.52 %
ALOP	m^2·a	4.41	4.59	4.50	2.84 %
GWP	kg CO2-Eq	209.05	220.54	214.80	3.78 %
FDP	kg oil-Eq	64.57	67.77	66.17	3.42 %
FETP	kg 1.4-DCB	5.36	5.78	5.57	5.41 %
FEP	kg P-Eq	0.22	0.24	0.23	7.05 %
HTTP	kg 1.4-DCB	138.93	152.86	145.90	6.75 %
IRP	kg U235-Eq	39.18	42.31	40.74	5.45 %
METP	kg 1.4-DB.	5.00	5.40	5.20	5.43 %
MEP	kg N-Eq	9.96E-02	1.04E-01	1.02E-01	3.23 %
MDP	kg Fe-Eq	15.74	15.95	15.84	0.90 %
NLTP	m^2	-7.89E-03	-8.53E-03	-8.21E-03	5.45 %
ODP	kg CFC-11	7.53E-06	7.77E-06	7.65E-06	2.22 %
PMFP	kg PM10-Eq	2.10E-01	2.14E-01	2.12E-01	1.64 %
POFP	kg NMVOC	0.33	0.34	0.33	2.69 %
TAP	kg SO_2-Eq	0.68	0.70	0.69	1.38 %
TETP	kg 1.4-DCB.	9.82E-03	1.08E-02	1.03E-02	6.84 %
ULOP	m^2·a	0.53	0.56	0.55	3.30 %
WDP	m^3	1.40	1.48	1.44	3.75 %

Aushärten im Autoklav ein. Vor allem zweiteres stellt einen zeitaufwändigen Prozess dar, weswegen auch bei der Vorbereitung der größte Kostenpunkt die Arbeitskraft ist. Der UP Schneiden stellt sich als drittgrößter Kostenpunkt heraus. Insgesamt setzten sich die Kosten zu 56% aus Arbeitkraft, 17% aus Formwerkzeug, 12% Prepreg-Material, 8% Energiekonsum und 7% anderer Kategorien, wobei ca. 1% davon Prepreg-Abfall ist.

In der ökologischen Bewertung wird aufgrund der Vielzahl der Indikatoren nur auf einzelne Aspekte eingegangen, dennoch sind die Indikatornen Abb. 5.4 und Abb. 5.5 dargestellt. Für die Fertigung wurde ein GWP von ca. 132 kgCO_2-Eq je Kilogramm Bauteil und ein CED von rund 3502 MJ oil-Eq ermittelt. Die relative Verteilung der Wirkungsschwerpunkte ist für die Indikatoren CED, GWP, IRP, MEP, NLTP, ODP, PMFP, POFP, TETP, ULOP und WDP sehr ähnlich. Die Aufschlüsselung der Wirkungsanteile für das GWP sind Abb. 5.3 und Abb. 5.4 zu entnehmen. Als größter Treiber wird der Energieverbrauch in dem UP Aushärten identifiziert. Die Einflüsse durch den Energiekonsum bestimmen knapp 49% des CO_2-Eq Anteils bzw. 50% des CEDs. Aus der Verwendung des Faserverbundmaterials geht der zweitgrößte Anteil der verursachten Umweltauswirkungen in der Bilanz des Fertigungsprozesses hervor. Die Elementarflüsse

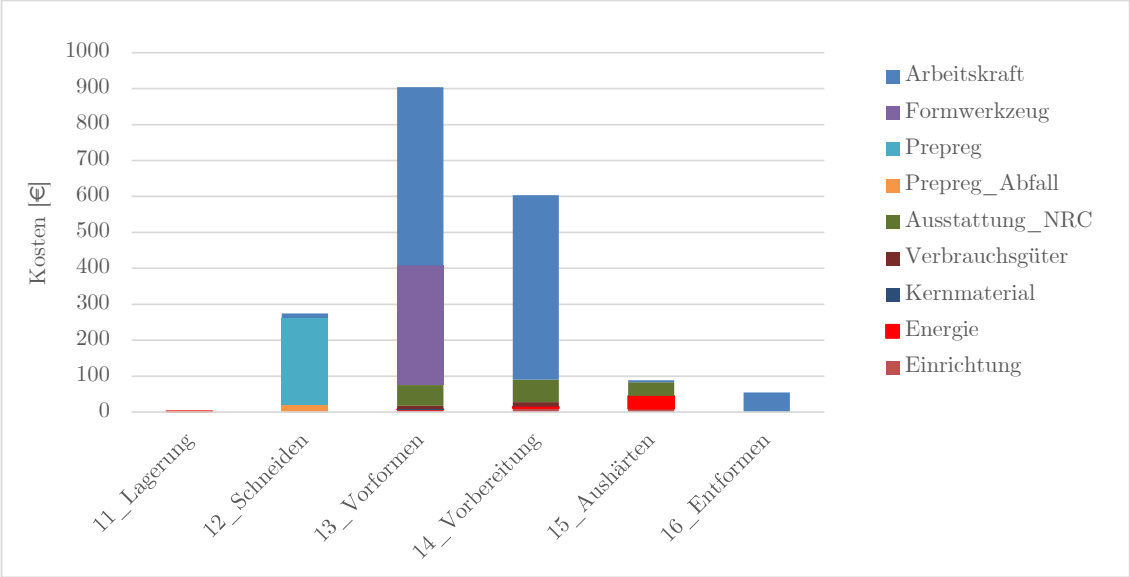


Abbildung 5.1: Kostenverteilung des Fertigungsprozesses

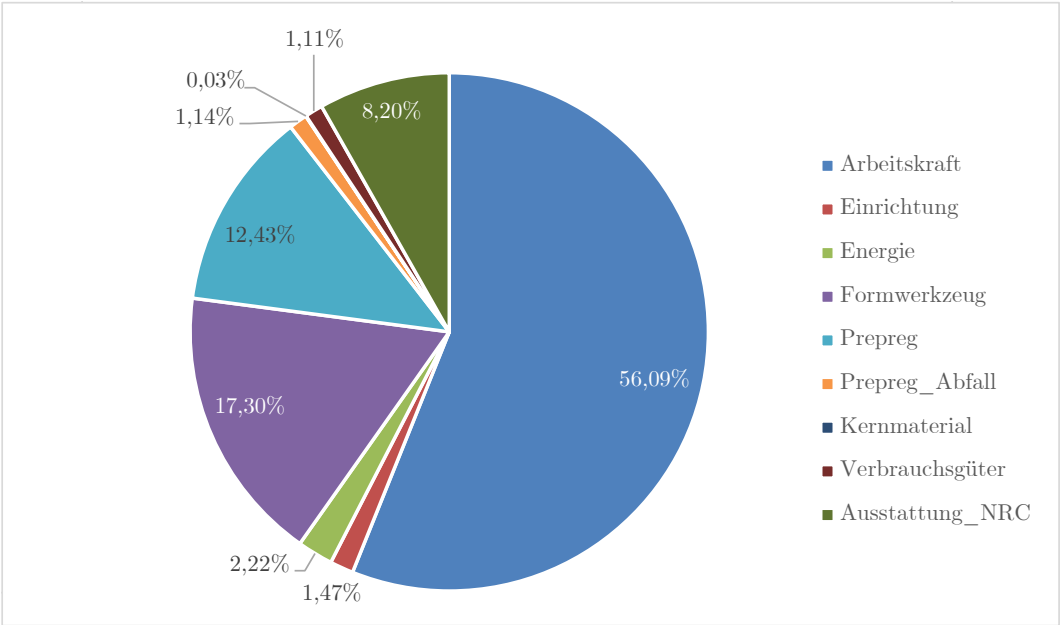


Abbildung 5.2: Kostenverteilung des Fertigungsprozesses

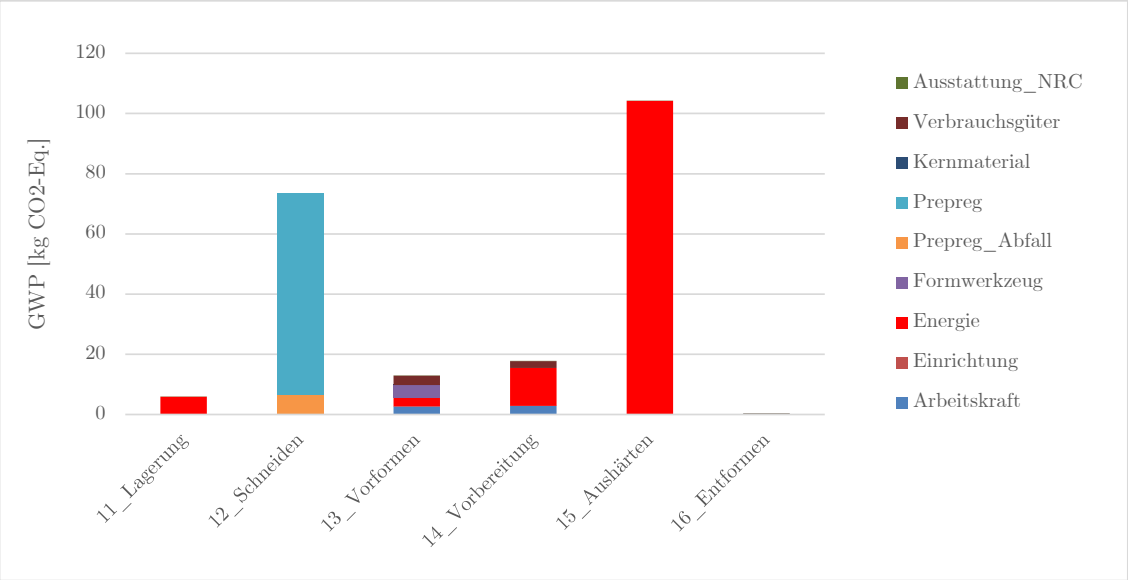


Abbildung 5.3: Verteilung der Einflüsse des Fertigungsprozesses auf den Indikator GWP

werden im UP Schneiden registriert und sind Ursache von rund 40% des GWPs sowie ca. 40% des CEDs des Produktsystems. Dabei gehen rund 35% aus dem verwendeten Prepreg-Material und 5% aus Prepreg-Abfällen hervor.

Für den Indikator MDP ist das Vorformen mit über 80% ausschlaggebend. Dort geht durch die Verwendung des Formwerkzeugs ein großer Anteil des MDPs in die Bilanz ein. Für die Indikatoren FETP, FEP, HTP und METP, welche die Ökotoxizität für Mensch und Ökosystem (Wasser) beschreiben, ist der Energiekonsum mit knapp 81% der größte Treiber (siehe Abb. 5.4). Dieser ist wiederum zu 83% dem UP Aushärten, dem 10% im UP Vorbereitung und mit knapp 5% der Lagerung zugeordnet. Als zweitgrößter Einfluss zeigt sich wieder das Prepreg-Material mit ca. 16% zu erkennen. Der große Anteil der Umwelteinwirkungen durch den Energiekonsum ist somit auf den hohen Energieverbrauch des Autoklavs zurückzuführen. Grundsätzlich sind für alle Indikatoren ausschließlich des MDPs der Energieverbrauch und das Prepreg-Material größte Treiber.

5.1.2 Bewertung der Montage

Die CF der Bauteile, welche in der Montage bearbeitet und verbunden werden, entsprechen den Mittelwerten der Ergebnisse der LCIA der Fertigung. Die Mittelwerte der Indikatoren sind Tab. 5.1 zu entnehmen. Im Laufe des Messzeitraums wurden sechs Probekörper montiert. Alle sechs Montageprozesse wurden dokumentiert, deren Prozessparameter gemessen und ausgewertet. Die Ergebnisse der LCIA sind in Tab. 5.2 zu sehen. Im Sinne der Übersichtlichkeit wurden nur die Ergebnisse von drei der sechs Probekör-

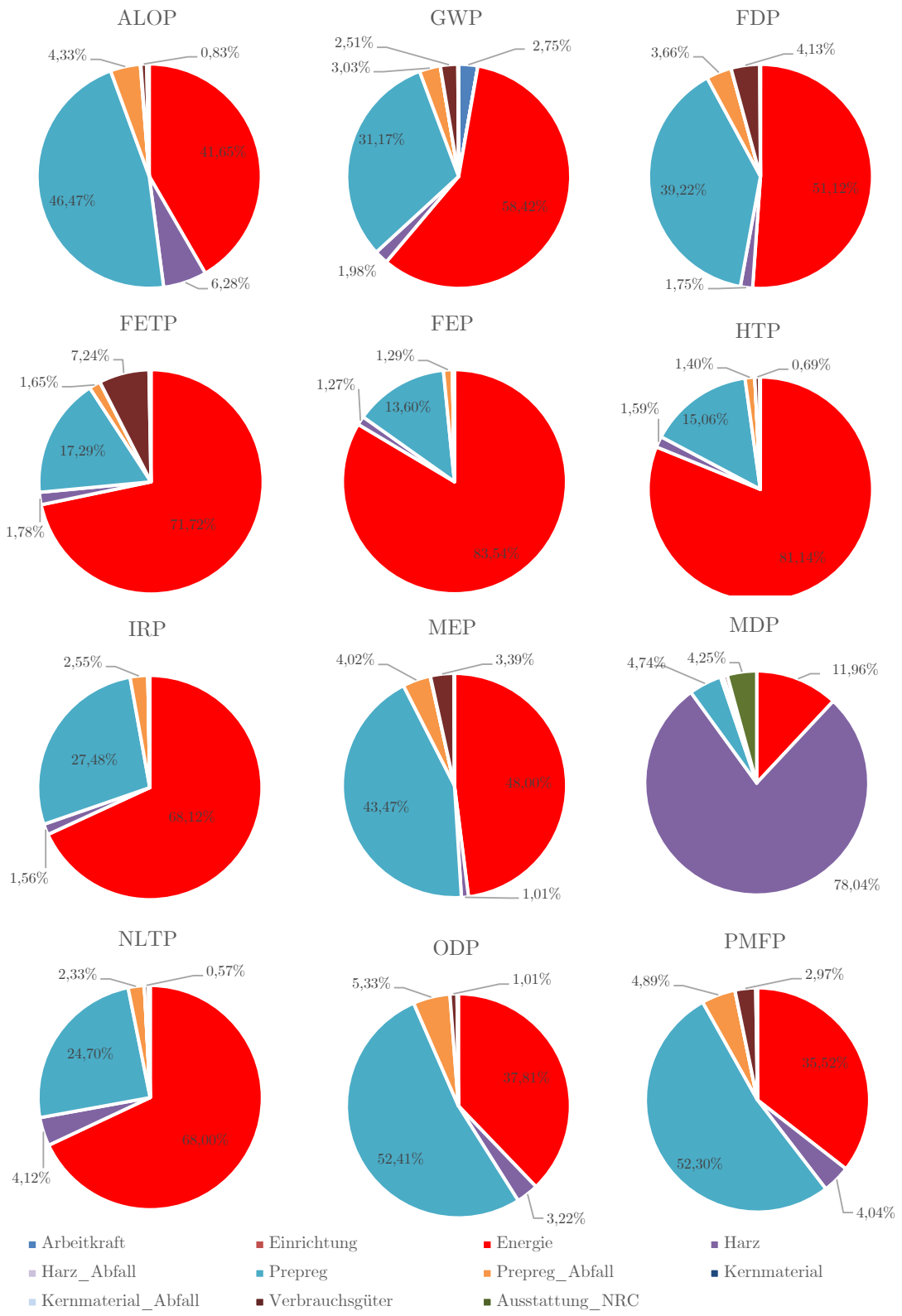


Abbildung 5.4: Verteilung der Mittelwerte der Einflüsse des Fertigungsprozesses auf die ReCiPe-Indikatoren

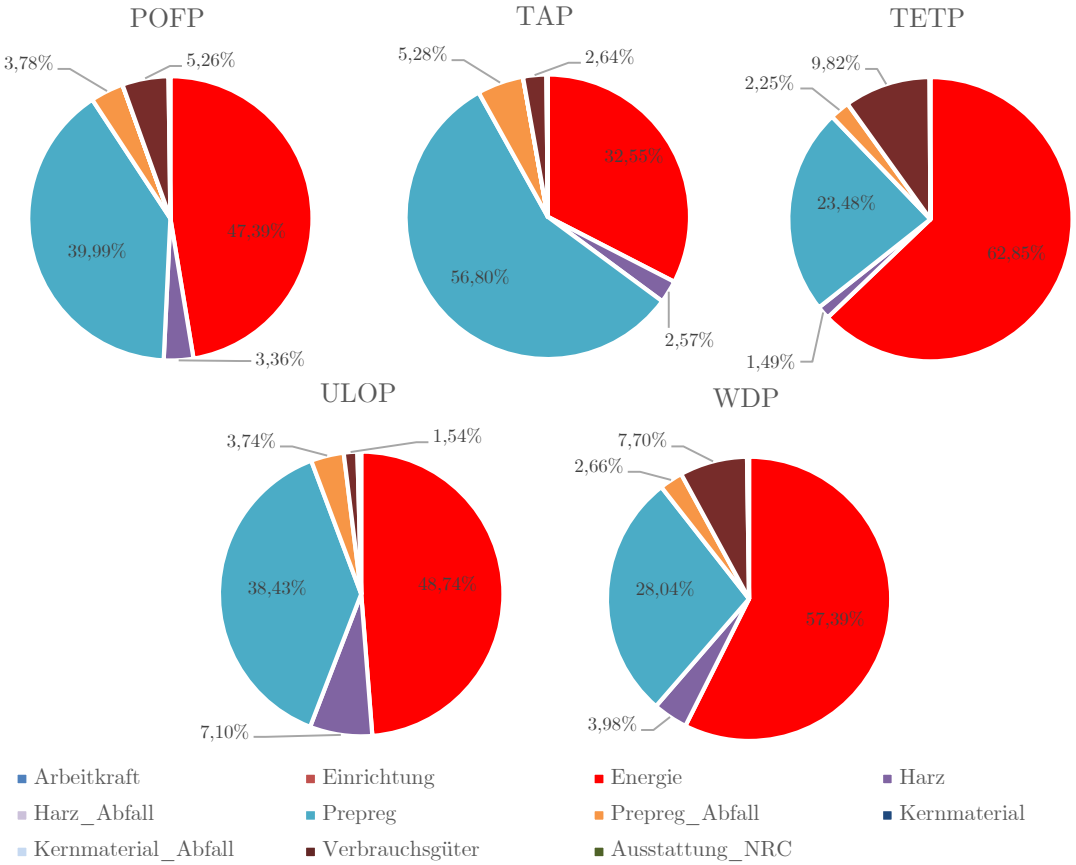


Abbildung 5.5: Fortsetzung von Abb. 5.4: Verteilung der Mittelwerte der Einflüsse des Fertigungsprozesses auf die ReCiPe-Indikatoren

per dargestellt. Unter den Resultaten der montierten Baugruppen kommt es zu relativen Abweichungen von ca. 0.5% bis 6.4%. Die größten Abweichungen sind bei dem Indikator TETP mit rund 6.4% zugeordnet. Die zweitgrößte Abweichung findet sich in den DC mit 3.5% wieder. Die Abweichung der Kosten je Probekörper sind zusammen mit deren jeweiligen Gewicht in Abb. 5.6 dargestellt. Für die Auswertung und Darstellung der Ergebnisse der Montage werden im Folgenden, ähnlich der Resultate der Fertigung, die Mittelwerte aus den sechs Montagemessungen errechnet und genutzt. Die Ergebnisse der Montage beinhalten dabei alle DC und ökologischen Indikatoren die von Cradle-To-Gate innerhalb der Systemgrenze anfallen.

Tabelle 5.2: Ergebnisse der LCIA der Montageprozesse als Cradle-To-Gate Bewertung. (PK..Probekörper, MW..Mittelwert, SDEV..Standardabweichung)

Indikator	Einheit	PK 1	PK 3	PK 6	MW	SDEV
Gewicht	g	482.17	486.57	490.75	484.17	0.84 %
Zeit (o. Lag.)	h	65.20	64.02	63.65	64.03	1.10 %
DC	€	1715.91	1614.22	1598.12	1618.65	3.51 %
CED	MJ oil-Eq	2278.15	2286.48	2289.38	2278.37	0.54 %
ALOP	m^2·a	2.92	2.95	2.93	2.92	0.83 %
GWP	kg CO2-Eq	126.21	126.1	126.34	125.78	0.63 %
FDP	kg oil-Eq	38.48	38.65	38.67	38.5	0.54 %
FETP	kg 1.4-DCB	3.41	3.41	3.43	3.41	0.54 %
FEP	kg P-Eq	0.13	0.13	0.13	0.13	0.55 %
HTTP	kg 1.4-DCB	83.73	83.85	84.16	83.69	0.54 %
IRP	kg U235-Eq	23.06	23.12	23.21	23.07	0.54 %
METP	kg 1.4-DB.	3.17	3.17	3.19	3.17	0.54 %
MEP	kg N-Eq	6.17E-02	6.22E-02	6.21E-02	6.17E-02	0.59 %
MDP	kg Fe-Eq	8.93	8.99	9.05	8.97	0.54 %
NLTP	m^2	-4.68E-03	-4.69E-03	-4.71E-03	-4.68E-03	0.52 %
ODP	kg CFC-11	4.37E-06	4.39E-06	4.41E-06	4.38E-06	0.47 %
PMFP	kg PM10-Eq	0.12	0.12	0.12	0.12	0.50 %
POFP	kg NMVOC	0.20	0.20	0.20	0.20	0.52 %
TAP	kg SO_2-Eq	0.40	0.40	0.40	0.40	0.51 %
TETP	kg 1.4-DCB	2.74E-02	2.87E-02	2.62E-02	2.64E-02	6.38 %
ULOP	m^2·a	0.32	0.32	0.32	0.32	0.49 %
WDP	m^3	0.93	0.94	0.94	0.93	0.58 %

Für die Produktion mit Einbeziehen der Montage ergibt sich für die DC ein mittlerer Wert von ca. 3343 €/kg. Die Kostenverteilung nach UP und Elementarflusskategorie ist Abb. 5.7 und Abb. 5.8 zu entnehmen. Wie erwartet, ist der größte Kostenpunkt dabei die Verwendung der zu montierenden Bauteile unter der Kategorie Prepreg-Material und

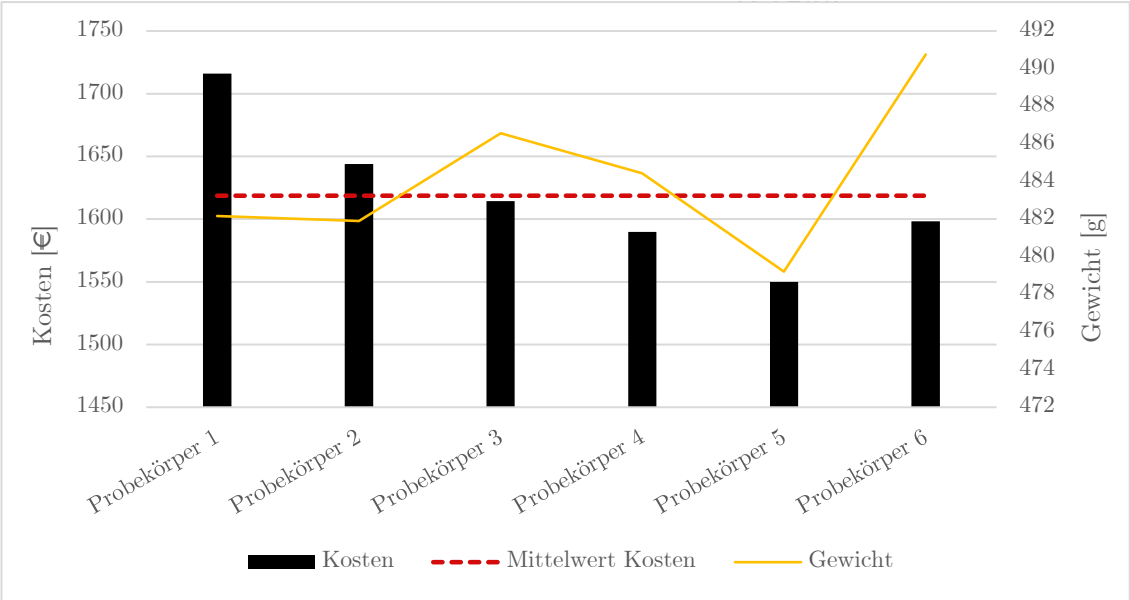


Abbildung 5.6: Kosten- und Gewichtsverteilung der sechs Probekörper

Prepreg-Abfall. Dabei machen die Kategorien Prepreg-Material mit 571 € ca. 35% und Prepreg-Abfall mit 489 € rund 30% der Kosten aus. Beide Elementarflüsse sind dem UP Mechanische Vorarbeit zugeordnet, in welchem die Bearbeitung und der Verschnitt der Bauteile stattfindet. Betrachtet man das Bauteil und den Bauteilabfall nicht gemeinsam, so steht das Bauteil finalen Gewichts an erster Stelle. Als zweitgrößten Kostenpunkt, noch vor dem Bauteilabfall, ergibt sich die Arbeitskraft mit rund 31% der Gesamtkosten. Die übrigen 4% ergeben sich aus den restlichen Kategorien. Vernachlässigt man das Bauteilmaterial und betrachtet somit nur den Montageprozess, ergibt sich eine anschaulichere Verteilung der übrigen Kategorien. Die Verteilung ist in Abb. 5.9 dargestellt. Mit Vernachlässigung der Bauteile dominiert die Arbeitskraft mit 90% die Gesamtkosten der Montage. Die meiste Arbeitszeit steckt in dem UP Mechanische Vorarbeit und dem UP Oberflächenbehandlung. An dritter Stelle folgt die Vorbereitung der jeweiligen Prozesse. Neben der Arbeitkraft bestimmen die Kosten knapp 3% Kernmaterial wie Klebstoff, 3% Verbrauchsgüter wie Isopropanol oder Scheilfpapier, 2% Einrichtung und 2% sonstige Kategorien.

Für den Produktionsprozess bis zur Montage wurde ein mittlerer GWP von 125.8 kgCO_2-Eq zugeordnet. Auf das Gewicht des Bauteils bezogen entspricht das 259.8 kgCO_2-Eq/kg bzw. 1624 kgCO_2-Eq/m^2 bezogen auf die gesamte Fügefläche. Die Verteilung der Einwirkung der Elementarflüsse auf das GWP ist in Abb. 5.11 dargestellt. Aus der Darstellung wird ersichtlich, dass mit rund 95% des gesamten GWPs der größte Anteil durch die verwendeten Faserverbund-Bauteile in die Bilanz eingehen. Dabei ergeben sich ca. 51% aus dem final vorliegenden Material und 44% aus Materialabfällen. Die Verteilung der

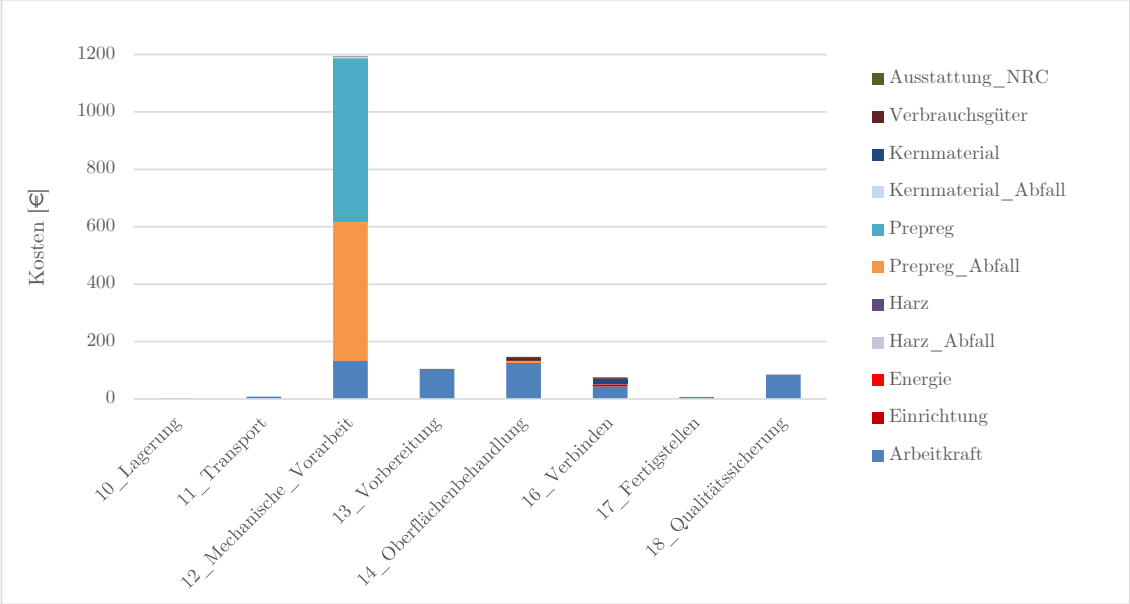


Abbildung 5.7: Kostenverteilung der Montage inklusive des Produktionsprozesses als Cradle-To-Gate Bewertung

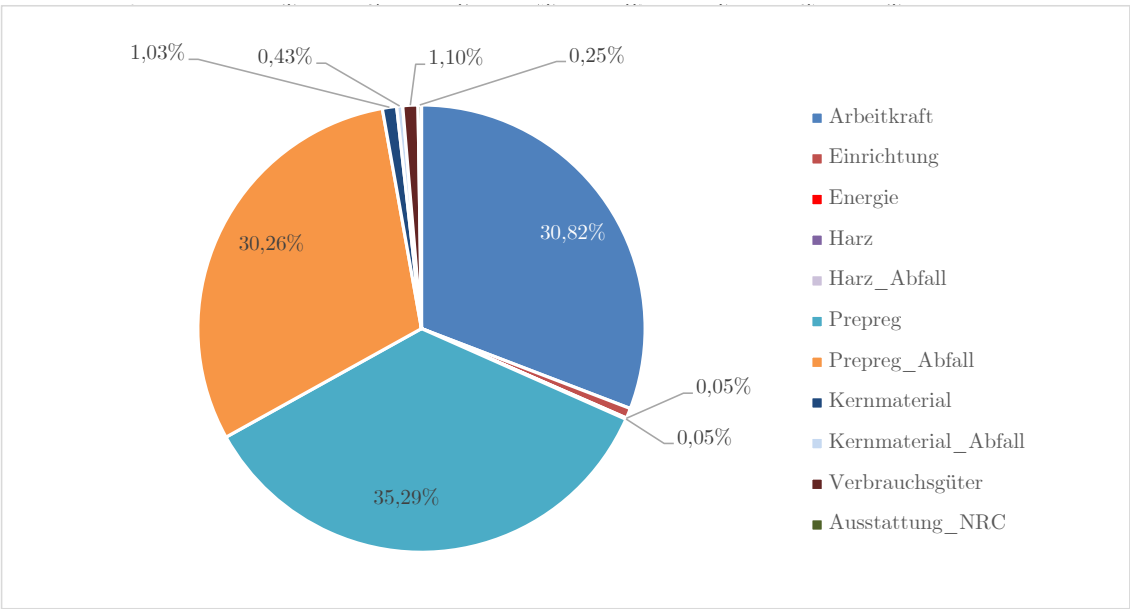


Abbildung 5.8: Kostenverteilung der Montage inklusive des Produktionsprozesses als Cradle-To-Gate Bewertung

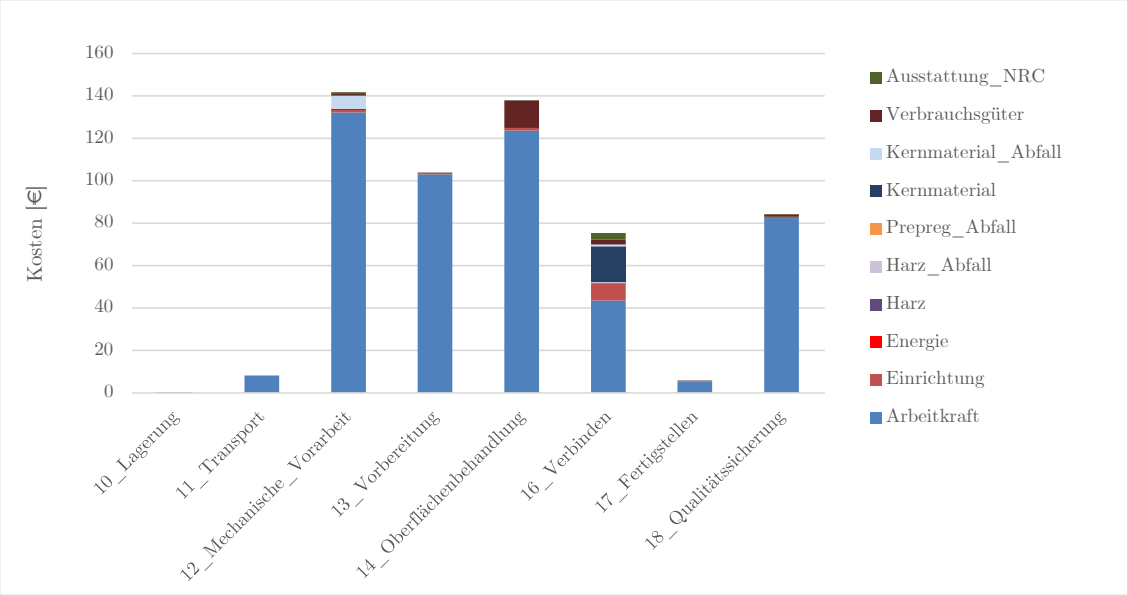


Abbildung 5.9: Kostenverteilung des Montageprozesses

Einflüsse auf die ökologischen Indikatoren durch die Elementarflüsse während des Montageprozesses sind in Abb. 5.11 und Abb. 5.12 dargestellt. Außer dem TETP verhalten sich alle anderen ökologischen Indikatoren ähnlich dem GWP. So ergibt sich ein CED von insgesamt 2.3 GJ oil-Eq für das Bauteil, 4.7 GJ oil-Eq/kg bezogen auf das Gesamtgewicht der finalen Baugruppe und 29.4 GJ oil-Eq/m^2 bezogen auf die Fügefläche. Für das TETP, die terrestrische Ökotoxizität, sieht die Verteilung anders aus (siehe Abb. 5.10). Dabei ergeben sich nur 23% der Indikatormenge aus dem Bauteilmaterial und -abfall. Haupttreiber des TETP ist die Kategorie Verbrauchsgüter mit einem Anteil von rund 77%. Diese sind wiederum auf die UP Oberflächenbehandlung und Qualitätssicherung aufgeteilt. Der dafür verantwortliche Elementarfluss sind die fusselfreien Baumwolltücher zur Reinigung der Oberflächen nach Schleifen, Aktivieren und der Durchführung von Qualitätsprüfungen.

Vernachlässigt man den Einfluss des Bauteils und betrachtet den Montageprozess isoliert, ergibt sich ein detaillierterer Einblick in die Verteilung der UP und Elementarflusskategorien auf die Wirkungsindikatoren. Bei der Betrachtung des reinen Montagprozesses ergeben sich die in Tab. 5.4 und Tab. 5.3 dargestellten Indikatorwerte. Betrachtet man das GWP der Montage in Abb. 5.13, so ist daraus erkenntlich, dass nach dem hier vernachlässigten Faserverbundmaterial, Arbeitskraft mit 32%, Verbrauchsgüter mit 31% und Energie mit 29% die größten Einwirkungen haben. Dabei stechen die mechanische Vorarbeit, mit langer Maschinenzeit und dementsprechend hohem Energieverbrauch, die Oberflächenbehandlung, mit hohem Verbrauch an Schleifpapier, Isopropanol und Reinigungstüchern, sowie das Verbinden mit Einbringen von Harz, Klebstoff und Verbrauch-

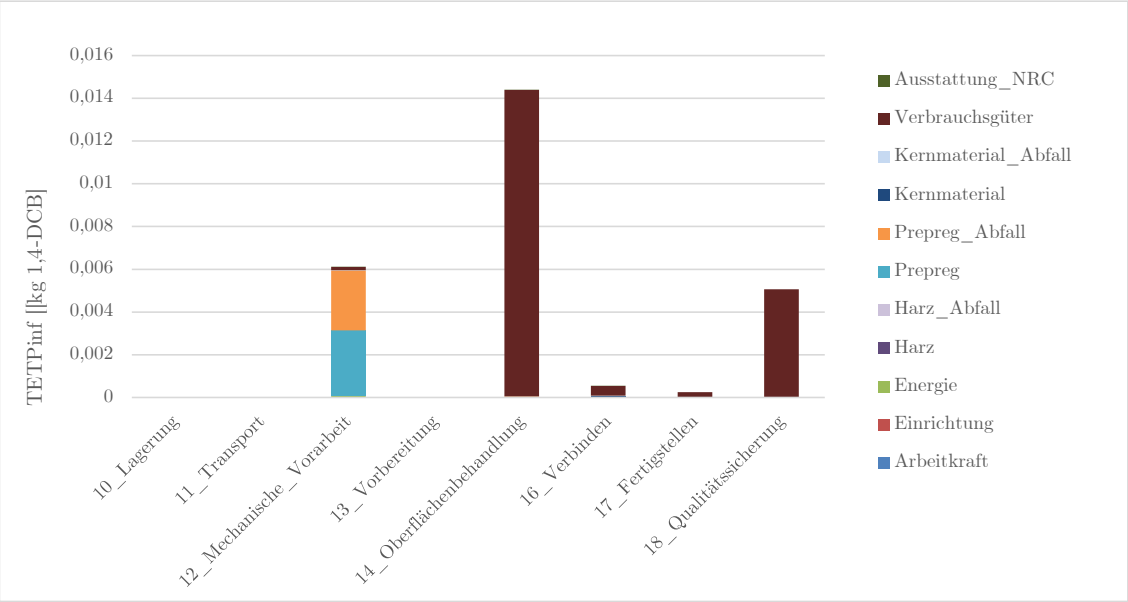


Abbildung 5.10: Verteilung der Einflüsse des Montageprozesses auf den Indikator TETP

Tabelle 5.3: Ergebnisse der LCIA der isoliert-betrachteten Montageprozesse. (MW.. Mittelwert; MW_{kg}.. bezogen auf ein kg Bauteilgewicht; MW_{m^2}.. bezogen auf ein m^2 Fügefläche)

Indikator	MW	MW_{kg}	MW_{m^2}
Gewicht	484 g	-	-
DC	558 €	1152 €/kg	7202 €/m^2
GWP	7.5 kgCO_2-Eq	15.5 kgCO_2-Eq/kg	97.0 kgCO_2-Eq/m^2
CED	94 MJ oil-Eq	194 MJ oil-Eq/kg	1215 MJ oil-Eq/m^2

sutensilien, zur Durchführung der Klebungen, hervor. Die Kategorie Prepreg-Abfall beinhaltet hierbei nur die Entsorgung des Materials. Beispielhaft ist in der Verteilung des CEDs in Abb. 5.14 die in Kap. 4.2 erläuterte Zusammensetzung der ökologischen CF der Abfälle gut zu erkennen. Für den CF des Prepreg-Abfalls wurde ein Negativwert an Energie deklariert, der aus Energierückgewinnung bei der Verbrennung von Faserverbundmaterial resultiert. Diese in den CF implementierte Eigenschaft des Elementarflusses ergibt eine negative Einwirkung in die CED-Bilanz des Prepreg-Materials.

Neben den Verbrauchsgütern ist, ohne das Einbeziehen des Bauteilmaterials, die verbrauchte elektrische Energie ausschlaggebend für den CED des Montageprozesses. Dabei bestimmen die Verbrauchsgüter knapp 53% und der Energiekonsum 39% des CEDs. Bezüglich des ALOPs sind die Verbrauchsgüter zu 89% und Energiekonsum zu 8% maßgebend. Die Indikatoren FDP und MEP werden zum größten Teil durch Verbrauchsgüter mit 62% und Energie mit 29% bestimmt. Ähnliche ist es bei FETP, METP, ODP, PMFP,

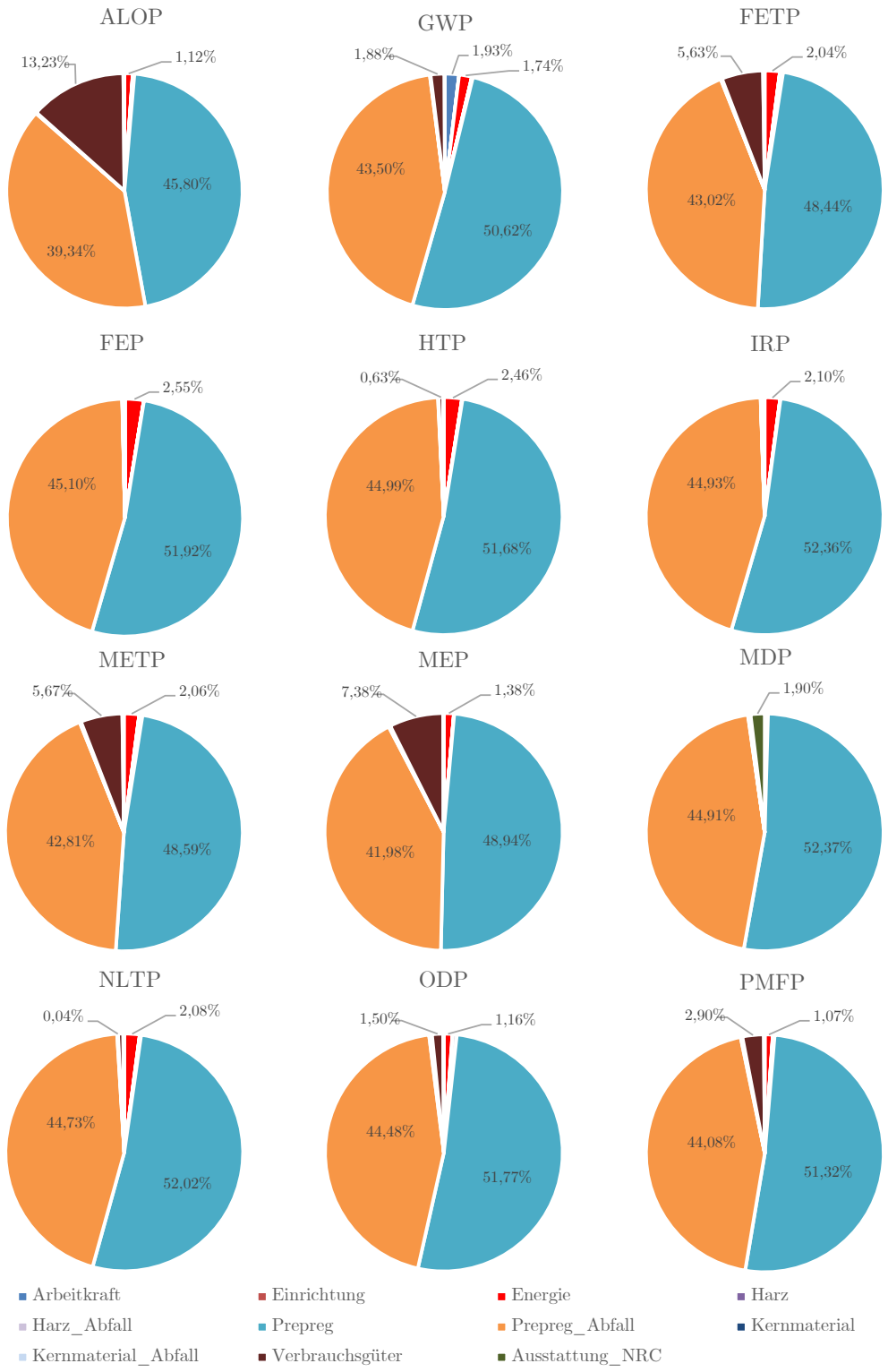


Abbildung 5.11: Verteilung der Einflüsse des Montageprozesses auf die ReCiPe-Indikatoren

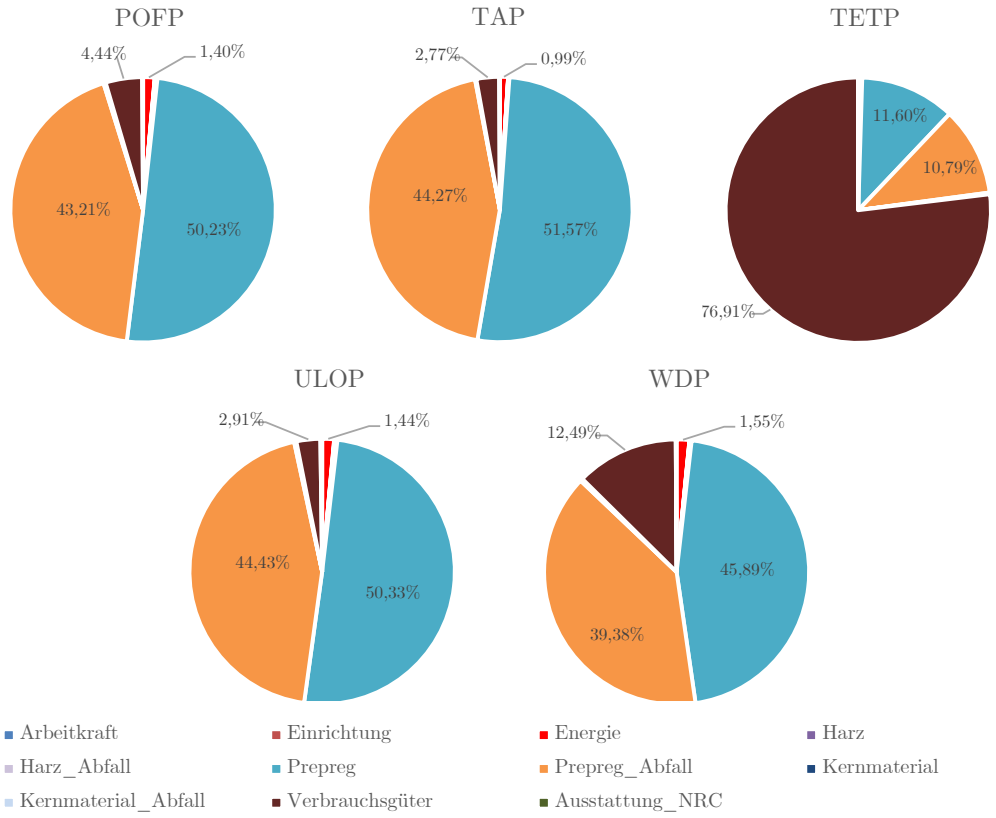


Abbildung 5.12: Fortsetzung von Abb. 5.11: Verteilung der Einflüsse des Montageprozesses auf die ReCiPe-Indikatoren

Tabelle 5.4: Ergebnisse der LCIA des isolierten Montageprozesses als Gate-To-Gate Bewertung. (PK..Probekörper, MW..Mittelwert, SDEV..Standardabweichung)

Indikator	Einheit	PK1	PK3	PK6	MW	SDEV
DC	€	661.84	550.10	526.33	557.76	10.60 %
CED	MJ oil-Eq	107.94	95.58	82.68	94.11	10.72 %
ALOP	m^2·a	0.46	0.46	0.43	0.44	5.04 %
GWP	kg CO2-Eq	8.70	7.47	6.85	7.51	10.22 %
FDP	kg oil-Eq	2.27	2.10	1.86	2.06	8.19 %
FETP	kg 1.4-DCB	0.36	0.33	0.33	0.34	4.60 %
FEP	kg P-Eq	5.62E-03	4.60E-03	4.13E-03	4.71E-03	12.95 %
HTTP	kg 1.4-DCB	3.91	3.27	3.00	3.35	11.08 %
IRP	kg U235-Eq	0.77	0.62	0.54	0.63	14.32 %
METP	kg 1.4-DB.	0.33	0.30	0.30	0.31	4.81 %
MEP	kg N-Eq	5.99E-03	5.90E-03	5.46E-03	5.62E-03	4.74 %
MDP	kg Fe-Eq	0.26	0.24	0.23	0.24	4.35 %
NLTP	m^2	-1.87E-04	-1.54E-04	-1.40E-04	-1.58E-04	11.60 %
ODP	kg CFC-11	1.90E-07	1.65E-07	1.58E-07	1.69E-07	6.70 %
PMFP	kg PM10-Eq	6.20E-03	5.74E-03	5.40E-03	5.73E-03	5.17 %
POFP	kg NMVOC	1.43E-02	1.34E-02	1.22E-02	1.32E-02	6.06 %
TAP	kg SO_2-Eq	1.82E-02	1.70E-02	1.57E-02	1.68E-02	5.54 %
TETP	kg 1.4-DCB.	2.18E-02	2.30E-02	2.05E-02	2.07E-02	8.14 %
ULOP	m^2·a	2.27E-02	2.10E-02	2.00E-02	2.10E-02	4.71 %
WDP	m^3	0.14	0.14	0.13	0.14	3.41 %

POFP, TAP und ULOP, bei welchen neben den Verbrauchsgütern mit 56% Energie mit 20% und Prepreg-Abfall mit 15% die Bilanz prägen. In den Wirkungskategorien der Indikatoren FEP, HTP, IR, NLTP und WDP sind die Schwerpunkte anders verteilt. Dort bestimmt der Energiekonsum zu 71%, der Prepreg-Waste zu 16% und die Verbrauchsgüter zu 9% die Umweltauswirkung. Letzlich ist noch das MDP zu erwähnen. Für den Wert des MDPs ist Ausstattung NRC zu 70%, Energiekonsum zu 13% und Verbrauchsgüter zu 10% verantwortlich.

Bei der Betrachtung der Ergebnisse fällt auf, dass Harz und Kernmaterial sowie deren Abfälle wenig Einfluss in die Umweltbilanz des Produktsystems haben. Beide Kategorien beinhalten die zum Fügen benötigten Klebstoffe, die das Prozessverfahren bestimmen. Aus den Ergebnissen geht zusätzlich hervor, dass neben den genannten Materialien ebenso die Kategorien Ausstattung NRC und Einrichtung kaum für Umweltauswirkungen verantwortlich sind.

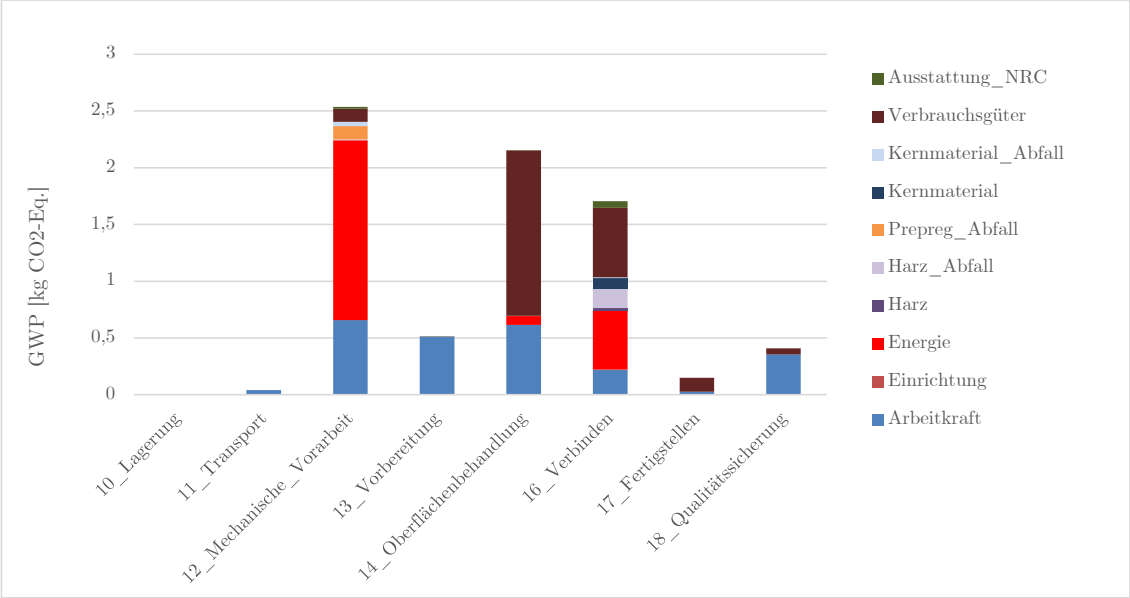


Abbildung 5.13: Verteilung der Einflüsse des Montageprozesses auf den Indikator GWP ohne Bauteileinflüsse

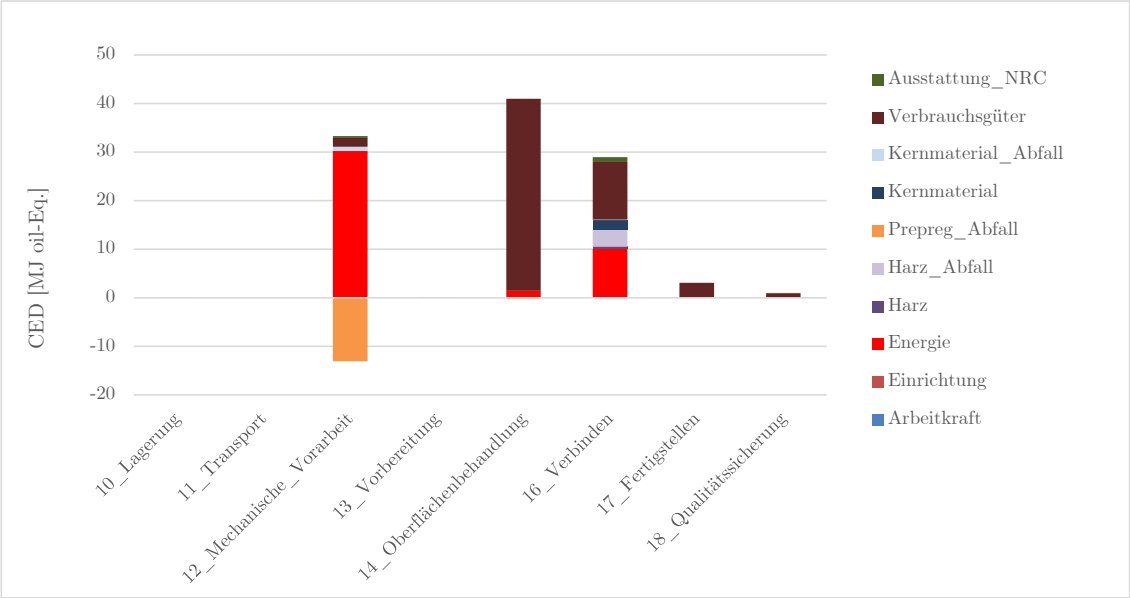


Abbildung 5.14: Verteilung der Einflüsse des Montageprozesses auf den Indikator CED ohne Bauteileinflüsse

5.2 Validierung

Die Validierung ist ein kontinuierlicher Prozess, der sich durch die gesamte Arbeit zieht. Jede durchgeführte Korrektur im Erarbeitungsprozess ist sinnvollerweise ein Teil der Validierung [53]. Sie orientiert sich am Schema des Validierungsrahmens, der in der Dissertation Al-Lamis angewandt wurde (siehe Abb. 2.3).

Die Qualifizierung wurde durch das Aufstellen und Erarbeiten des genutzten Modells zur Bewertung von Montageprozessen durchgeführt. Es wurde versucht die realen Montageprozesse in ein abstraktes Modell zu überführen. Die dafür genutzten Methoden des LCAs und der LCCA wurden erläutert, die Systemgrenze definiert und der Untersuchungsrahmen abgesteckt. „Ein komplexes System [wie die Realität] hat kein anderes gültiges, umfassendes Repräsentationsmodell neben sich selbst.“ [53] Daraus folgt, dass durch die Erstellung eines abstrakten Modells immer Abweichungen vom realen System einhergehen. Die Erstellung des Modells erfolgte in mehreren Iterationsstufen. Die erste Stufe war die theoretische Recherche zu Montageprozessen und deren technischen Abläufe (siehe Kap. 2.4). Das daraus entstandene Modell wurde in der zweiten Stufe auf Basis des für die Fallstudie erstellten theoretischen Ablaufplans überarbeitet. In der dritten Stufe wurden bei der Durchführung der Montage die Prozesse neben den Prozessparametern zusätzlich dokumentiert und anschließend in das Modell eingearbeitet, woraus das finale Prozessmodell (siehe Abb. 3.2) entstand. Des Weiteren wurden Messung, IR-Aufnahmen, Revisionen und Rücksprachen mit Monteuren und Produktionsleitung in den Qualifikationsprozess des Modells und der darin enthaltenen Elementarflüsse aufgenommen.

Das mathematische Modell beschreibt das konzeptionelle Modell mithilfe von Formeln. Die Formeln stammen zum Großteil aus dem bereits implementierten EEAM, welches in den Arbeiten von Nothdurft und Hilmer, Schachinger und Al-Lami, Al-Lami et al., Rudolf und Al-Lami und Al-Lami [53, 54, 61, 64, 67] bereits validiert wurde. Die Formeln zur Beschreibung des Modells wurden in Kap. 3 aufgeführt. Aufgrund der Erweiterung des Modells um die Entsorgung von Materialabfällen und Verbrauchsgüter wurde die dafür korrespondierende Formel angepasst. Wegen der Einfachheit der mathematischen Beschreibung des Modells machen sich Fehler schnell bemerkbar und lassen sich in der Regel eindeutig identifizieren. Die CF der Elementarflüsse stellen den größeren Verifizierungsaufwand dar. Die Datenlage für die Werte der CF ist unklar und an einigen Stellen unvollständig, weswegen in der Arbeit mit sehr vielen Annahmen und Vereinfachungen gearbeitet werden musste, was mit Ungenauigkeiten einhergeht Dennoch wurden die Annahmen in Kap. 4 klar definiert, aus validen Quellen akquiriert und wenn möglich mit anderen Quellen verglichen.

Als Beispiel soll an dieser Stelle der Strompreis angeführt werden. Für den Strompreis wurde zunächst festgestellt, dass ein veralteter Wert in der Datenbank definiert war. In

Tabelle 5.5: Vergleich der DC für einzelne UP der Fertigung je Kilogramm gefertigter Struktur aus CFK

Studien	Vorbereitung	Schneiden	Vorformen	Summe
Denkhaus, Hilmer [10]	378.47 €	117.26 €	28.30 €	524.03 €
Al-Lami et al. [54]	94.16 €	228.33 €	133.80 €	469.02 €
Al-Lami [53]	5.20 €	196.60 €	5.40 €	221.30 €
diese Arbeit	369.60 €	168.06 €	553.39 €	1091.06 €

Auswertungen fielen die niedrigen Kosten durch Energieverbrauch bei einer Revision auf und wurden folglich auf einen aktuelleren Wert angepasst. Die Ermittlung der Werte der ökologischen Indikatoren wurde in Kap. 4.2 beschrieben. Nimmt man den dort ermittelten CF für den Indikator GWP mit einem Wert von ca. 0.423 kgCO_2-Eq/kWh und vergleicht ihn mit anderen Werten wie dem aus der Statistik des UBAs von 0.428 kgCO_2-Eq/kWh [42], ergibt sich eine Verifizierung der Ergebnisse und somit auch der Methode.

Neben der Verifizierung der genutzten CF und des mathematischen Modells ist die Verifizierung der Umsetzung des Modells in der Software notwendig. Ähnlich der bereits genannten Validierungsschritte wurde auch die Verifizierung der Software iterativ durchgeführt und dadurch kontinuierlich Fehlerquellen beseitigt. So wurden im Verifizierungsprozess, von einfachen Formatierungs-Bugs bis hin zu konzeptionellen Fehlern, Änderungen vollzogen. Zusätzlich wurden die mit EEAM generierten Ergebnisse stichprobenartig mittels händischer Microsoft-Excel Kalkulation geprüft. Dabei konnten bei der Prüfung der generierten Ergebnisse dieser Arbeit keine groben Fehler festgestellt werden. Es wurde dabei eine mittlere relative Abweichung von $1.38 \cdot 10^{-8}$% ermittelt, welche sich durch Rundungsfehler bei der Übersetzung der Datenformate erklären lässt.

Nach der Verifizierung des mathematischen, computergestützten Modells erfolgt die Modellvalidierung anhand der Realität. Die Validierung wurde in Form von Vergleichen und Sensitivitätsanalysen durchgeführt. Zunächst konnten die Kosten und CO_2-Werte der Fertigung der Bauteile mit den Werten von Al-Lami, Al-Lami et al. und Denkhaus und Hilmer [10, 53, 54] verglichen werden. Die Vergleiche sind Tab. 5.5 und Tab. 5.6 zu entnehmen. Die Ergebnisse beider Tabellen werden im nächsten Abschnitt diskutiert.

Für den Vergleich des Montageprozesses wurden keine vergleichbaren Studien gefunden, in denen Kosten oder ökologische Indikatoren von Faserverbund-Klebeprozessen bewertet wurden. Aus diesem Grund wurde für die Montage eine Sensitivitätsanalyse durchgeführt. Neben der Auswertung mit den in Kap. 4.2 beschriebenen CF für das Prepreg-Material wurden weitere Bewertungen mit einem abgewandelten Wert durchgeführt. Für die CF des Prepreg-Materials wurden aus der gleichen internen Untersuchung die Werte für Kohlenstofffasern mit explizit einbezogenen Polyacrylnitril-Precurser ver-

Tabelle 5.6: Vergleich des Kohlenstoff-Fußabdrucks für einzelne UP der Fertigung je Kilogramm gefertigter Struktur aus CFK

Studien	Vorbereitung	Schneiden	Vorformen	Summe
Denkhaus, Hilmer [10]	2.14 kg CO_2	7.62 kg CO_2	0.09 kg CO_2	9.86 kg CO_2
Al-Lami et al. [54]	1.37 kg CO_2	76.39 kg CO_2	2.47 kg CO_2	80.35 kg CO_2
Al-Lami [53]	0.49 kg CO_2	99.57 kg CO_2	1.60 kg CO_2	105.70 kg CO_2
diese Arbeit	10.90 kg CO_2	45.02 kg CO_2	7.92 kg CO_2	63.84 kg CO_2
Sensitivitätsanalyse	10.90 kg CO_2	115.96 kg CO_2	7.92 kg CO_2	134.78 kg CO_2

wendet. Ähnlich der Ursprungswerte stammen diese CF aus dem Ergebnis einer internen Simulation der Kohlenstofffaserherstellung mit Umberto. Das dafür verwendete Modell ist noch unvollständig und basiert auf Vorgaben der Literatur [3]. Die CF dieses Datensatzes weichen teilweise mit Faktor drei von den für die Auswertung genutzten Werten ab. Mit diesen CF wurden beide Fertigungsprozesse bewertet, die Mittelwerte beider Ergebnisse berechnet und diese wiederum als Input für die CF der Bauteile in der Bewertung der Montageprozesse verwendet.

In Abb. 5.15 und Tab. 5.7 sind die Ergebnisse der Sensitivitätsanalyse dargestellt. Dem Diagramm sind die Abweichungen der CF des Prepreg-Inputs, der LCIA Ergebnisse der Fertigung und der LCIA Ergebnisse der Montage, normiert auf deren jeweilige Referenzwerte aus ursprünglicher Bewertung, dargestellt. Die Analyse zeigt bei jedem ökologischen Indikator ein konvergierendes Verhalten hin zum Referenzwert. Während die Abweichungen zu Beginn bei Vergleich der Eingangsparameter sehr groß ist, nehmen sie mit den Ergebnissen der Fertigung und Montage ab und nähern sich der Referenz an. Dies bestätigt, dass das Modell robust ist und auch bei abweichenden Eingangsparametern, ähnliche Tendenzen zeigt und nicht divergiert. Zuletzt ist zu erwähnen, dass die Prozesse mehrmals begleitet und gemessen wurden, sodass mehrere vergleichbare, nicht identische Datensätze generiert und ausgewertet worden. Das Vorgehen validiert nicht das Modell gegenüber der Realität, jedoch die Konsistenz des Modells in sich, Robustheit gegenüber der Varianz der Parameter und der Reproduzierbarkeit der Ergebnisse.

Eine vollwertige Validierung konnte aufgrund der Datenlage und Mängeln an vergleichbaren Literaturen in dieser Arbeit nicht erreicht werden. Vielmehr dient diese Arbeit dazu einen Teil zur Validierung der angewandten Methoden und Instrumente beizutragen und quantifizierbare Ergebnisse für zukünftige Untersuchungen bereitzustellen.

Tabelle 5.7: Sensitivitätsanalyse mit Variation der Input-CF des Prepreg-Materials. (Input.. Input-CF für Prepreg-Material [1, 3, 73]; Fert.. LCIA Ergebnisse der Fertigung; Mont.. LCIA Ergebnisse der Montage; Ref.. Referenzwert der Auswertung; Sen.. Ergebnisse mit Werten der Sensitivitätsanalyse)

Ind	Einheit	Input$_{Ref}$*	Input$_{Sen}$*	Fert.$_{Ref}$	Fert.$_{Sen}$	Mont.$_{Ref}$	Mont.$_{Sen}$
CED	MJ oil-Eq	776.44	1760.28	3965.56	5719.90	2278.37	3243.65
ALOP	m^2·a	1.28	4.74	4.50	10.67	2.92	6.31
GWP	kg CO2-Eq	40.99	105.97	214.80	330.66	125.78	189.58
FDP	kg oil-Eq	15.89	37.02	66.17	103.85	38.50	59.25
FETP	kg 1.4-DCB	0.59	1.35	5.57	6.92	3.41	4.15
FEP	kg P-Eq	0.02	0.03	0.23	0.26	0.13	0.15
HTP	kg 1.4-DCB	13.45	25.37	145.90	167.15	83.69	95.39
IRP	kg U235-Eq	6.86	14.54	40.74	54.45	23.07	30.61
METP	kg 1.4-DB.	0.54	1.14	5.20	6.29	3.17	3.77
MEP	kg N-Eq	0.03	0.04	0.10	0.12	0.06	0.07
MDP	kg Fe-Eq	0.46	1.12	15.84	17.02	8.97	9.61
NLTP	m^2	-1.24E-03	-3.52E-03	-8.21E-03	-1.23E-02	-4.68E-03	-6.92E-03
ODP	kg CFC-11	2.45E-06	3.54E-06	7.65E-06	9.58E-06	4.38E-06	5.44E-06
PMFP	kg PM10-Eq	0.07	0.15	0.21	0.35	0.12	0.20
POFP	kg NMVOC	0.08	0.24	0.33	0.62	0.20	0.35
TAP	kg SO_2-Eq	0.24	0.49	0.69	1.14	0.40	0.65
TETP	kg 1.4-DCB.	1.48E-03	4.85E-03	1.03E-02	1.63E-02	2.64E-02	2.97E-02
ULOP	m^2·a	0.13	0.39	0.55	1.02	0.32	0.58
WDP	m^3	0.25	0.43	1.44	1.77	0.93	1.11

* Die gewählten Input-CF beruhen auf einem noch unvollständigen Modell zur Herstellung von fabrikneuen Karbonfasern. Das Modell entstammt einer nicht abgeschlossenen, unternehmensinternen Untersuchung.

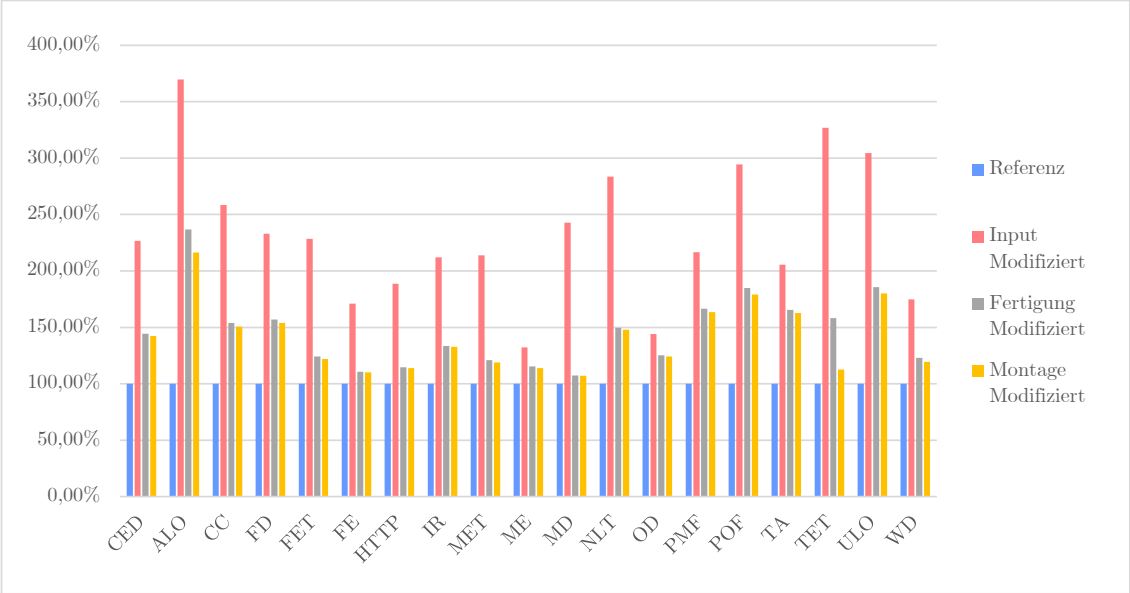


Abbildung 5.15: Sensitivitätsanalyse durch Variierung der Input-CF des Prepreg-Materials. *Input* entspricht den Eingangs-CF vor der Fertigung; *Fertigung* entspricht den Ergebnissen der Bewertung der Fertigung; *Montage* entspricht den Ergebnissen der Bewertung der Montage; *Modifiziert* entspricht dem neuen, zur Sensitivitätsanalyse genutzten Datensatz

5.3 Diskussion

Die Fallstudie wurde für Fertigungs- und Montageprozess getrennt ausgewertet. Die Ergebnisse wurden in dem vorherigen Abschnitt präsentiert. Ähnlich der Präsentation der Ergebnisse soll in der Diskussion zunächst auf die Bewertung der Fertigung und danach auf die Bewertung der Montage eingegangen werden.

Fertigung

Bei der Fertigung bestimmen die Kosten für die genutzte Arbeitskraft maßgeblich die Bilanz. Sie resultieren aus den relativ langen Prozesszeiten der nicht voll-automatisierten UP wie dem Vorformen und der Vorbereitung. Für das Wickeln im Schritt Vorformen werden aufgrund der besonderen Prozesseigenschaften in dem Projekt mindestens zwei Arbeitskräfte zur Durchführung der Arbeit benötigt. Ähnlich dem Wickeln benötigt auch die Vorbereitung des Vakuumsacks längere Zeit und mindestens zwei Personen, da das Formwerkzeug durch Gewicht und Abmaße allein kaum präpariert werden kann. Das Formwerkzeug im UP Vorformen stellt aufgrund des niedrigen Produktionsvolumens ebenfalls einen großen Kostenpunkt dar. Als drittgrößte Kategorie dominiert das Prepreg-Material als teures Halbzeug die Kostenbilanz. Schaut man sich die Ergebnisse der Bewertung der ökologischen Indikatoren an, so liegt nach dem Prepreg-Material das Aushärten aufgrund des hohen Energiekonsums an zweiter Stelle der Emissionsquellen. Dass das Faser- bzw. Prepreg-Material ausschlaggebend für die Ökobilanz des Produktsystems ist, wurde bereits in verschiedenen anderen Studien festgestellt. Grund hierfür ist u.a. die energieaufwändige Herstellung der Kohlenstofffaserkomponente PAN [18, 28].

Für Entscheidungsträger wäre das Resultat der ökonomischen Bewertung, als erstes die Arbeitszeit der Arbeitskräfte zu reduzieren, was durch die Erhöhung des Automatisierungsgrads der Fertigung ermöglicht werden könnte. Die Sachverhalte sind dabei vielschichtig. Eine weiterführende Automatisierung würde sich nur bei einem Produktionsvolumen in industriellem Maßstab wirtschaftlich lohnen. Bei erhöhtem Produktionsvolumen würden sich die Kostenpunkte des Formwerkzeugs und der Arbeitskraft für Vorformen und Vorbereitung ebenfalls reduzieren. Durch die Automatisierungsmaßnahmen würden die Kosten der Kategorie Ausstattung NRC steigen, sich jedoch auch über die große Stückzahl und Fertigungszeit verteilen und daher tendenziell nur geringfügig wachsen. An dieser Stelle kommt der Punkt der Ökoeffizienz ins Spiel. Betrachtet man nun auch die ökologische Bewertung des Prozesses, so ist das größte Einsparpotential im Energieverbrauch zu lokalisieren. Würde der Prozess in diesem Szenario automatisiert werden und dementsprechend mehr Maschinen zum Einsatz kommen, so würden wiederum auch größere Mengen elektrischer Energie konsumiert werden und dadurch größere Umwelteinwirkungen entstehen.

Mithilfe der Bewertung der Ökoeffizenz, also dem Betrachten sowohl ökologischer als

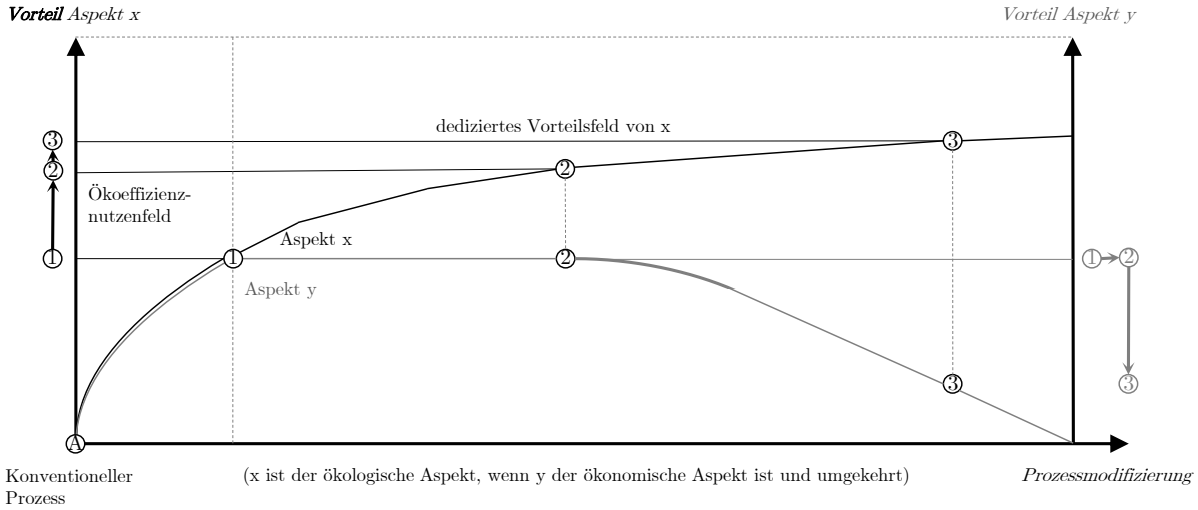


Abbildung 5.16: Ökologische, ökonomische und ökoeffiziente Direkt-Anwendungen nach Al-Lami et al. [54]

auch ökonomischer Aspekte eines Produktsystems, soll eine erweiterte Sicht für Entscheidungsträger geschaffen werden, die einen Trade-Off aus ökologischen und ökonomischen Vorteilen darstellt. Dieser Trade-Off wurde in Al-Lami et al. [54] visualisiert und ist in Abb. 5.16 dargestellt. Mittels der generierten Ergebnisse wurden die Treiber für Kosten und Umweltwirkung lokalisiert und quantiativ bewertet. Nun gilt es durch Optimierung der Prozesse eine effektive Zone zu finden, in der mit nicht zu großem ökonomischem Einsatz effektive Einsparungen der Umwelteinwirkung erreicht werden können. Diese Optimierung ist jedoch auch umgekehrt zu verstehen. So kann auch mit gewissen Einbußen in der Ökobilanz eine effektive Verbesserungen der Kosteneffizienz des Produktsystems erreicht werden. In diesem konkreten Beispiel könnte die Optimierung der Prozesse eine Automatisierung der Prozesskette sein, die bestmöglich mit energieeffizienteren Maschinen realisiert wird. Das würde dazu führen, dass dasselbe Produktsystem, in höheren Stückzahlen durch optimiertere Prozesse hergestellt wird und so je Kilogramm Bauteilmaterial einen gleich großen Umwelteinfluss, aber wesentlich niedrigere Kosten haben könnte.

Dahingehend ist das LCA und EEAM als Entscheidungsunterstützungstool effektiv und für die CFK-Produktion geeignet, da solche potentiellen Optimierungen und Änderungen auf Basis der bereits vorhandenen Daten sehr einfach implementiert und abgeschätzt werden können. Die Simulation der Prozessoptimierung kann mit Schätzungen und Annahmen bewertet werden und zum Entscheidungsprozess positiv beitragen.

In Tab. 5.5 sind die Ergebnisse der drei UP Vorbereitung, Schneiden und Vorformen mit Werten anderer Studien gelistet. Aus dem Vergleich geht hervor, dass die in dieser Arbeit bewertete Fertigung wesentlich teurer je Kilogramm Bauteilgewicht ist. Das lässt

sich größtenteils durch den Automatisierungsgrad der Fertigung begründen. Während bei Al-Lami [53] die Fertigungen mit einer automatisierten Fertigungsstrecke realisiert wurde, sind die Prozesse dieser Arbeit aufgrund von Design- und Prozesseigenschaften, die besondere Aktivitäten beim Wickeln erfordern, welche nur manuell durchgeführt werden können, zu großen Teilen in manueller Handarbeit vollzogen worden. Die großen Kosten im UP Vorformen sind wiederum mit dem Wickelprozess und der geringen Stückzahl zu erklären. Es ist je nach Bauteilgröße und Komplexität ein langwieriger Prozess, der in diesem Fall mit mindestens zwei Personen vollzogen werden muss. Bei sechs Lagen mit unterschiedlichen Faserorientierungen sowie der Bauteilgröße von 3 m, ergibt sich eine dementsprechend lange Prozesszeit. Zuletzt ist zu erwähnen, dass die Fertigungsprozesse, die untersucht worden, die ersten Fertigungen mit dem Formwerkzeug und den gegebenen Spezifikationen waren. Dementsprechend war bei Fertigung 1 (siehe Tab. 5.1) das Vorgehen unerfahren, wobei viele Einzelschritte das erste Mal getätigt und teilweise währenddessen improvisiert worden. Somit ist eine Lernkurve miteinzubeziehen. Von Fertigung 1 zu Fertigung 2 konnte eine Kostenverringerung von 119 € und Zeitabnahme von 87 min gemessen werden. Schaut man in Tab. 5.1, so sieht man neben den Kosten eher eine Steigerung der Werte. Diese Steigerungen sind mit einem erhöhten Stromverbrauch zu erklären. Dieser kommt zum einen während des Vorbereitungsprozesses zustande, in welchem das Formwerkzeug mit einem weiteren Heizmodul aufgewärmt wurde, zum anderen war der Energieverbrauch des Autoklavs bei Fertigung 2 trotz identischem Durchlaufprogramm um knapp 36 kWh größer. Die Ursache für den erhöhten Energieverbrauch des Autoklavs konnte nicht identifiziert werden.

Beim Vergleich zwischen den Ergebnissen für das GWP in Tab. 5.6 besitzen die Werte dieser Arbeit nicht die größten Beträge. Die Vorbereitung erzielt wesentlich größere CO_2-Eq Mengen, da während der Vorbereitung mehrere Heizelemente mit mehr als 10 kWh Verbrauch zum Einsatz kamen. Die erhöhten Werte bei dem UP Vorformen lassen sich wieder durch das Formwerkzeug und das geringe Produktionsvolumen erklären. So ist die Umwelteinwirkungen des 365 kg schweren Stahlwerkzeugs auf 30 gefertigte Produkte aufgeteilt, wodurch entsprechend hohe Werte der Wirkungsindikatoren dem gefertigten Bauteil zugeordnet sind. Die CO_2-Eq Menge während des Schneidens entstehen durch die CF des Elementarflusses Prepreg-Material. Das zeigt die Sensitivitätsanalyse, welche in derselben Tabelle aufgeführt ist. Geht man von erhöhten Werten mit Einbeziehen des PANs in dem Herstellungsprozess von CFK wie in der Sensitivitätsanalyse aus, so werden größere Werte als die in der Arbeit von Al-Lami erreicht. Der Wert der Sensitivitätsanalyse ist mit Vorsicht zu betrachten, da der Datensatz auf einem unvollständigen Modell beruht. Das Aushärten ist die UP mit dem größten Energiekonsum und dahingehend auch den größten Umwelteinflüssen der Fertigung. Grund hierfür ist die Aushärtung in dem Autoklaven, der in Umfangsrichtung dem Bauteil gegenüber überdimensioniert ist. Eine potentielle Optimierung könnte an dieser Stelle das Ausnutzen des vorhandenen Platzes im Autoklav sein, sodass die eingebrachte Energie zur Aushärtung mehrerer Bauteile verwendet wird.

Montage

Die in der Montage bewerteten Prozesse waren, ähnlich der Fertigung, die ersten Arbeiten nach dem definierten Prozessplan. Dementsprechend war für die Arbeiter:innen der Prozessablauf in Probekörper 1 neu und bedurfte mehr Ressourcen. Bei den Bewertungen der Montageprozesse ist eine Lernkurve zu erkennen. Diese Kurve ist hinsichtlich der Kosten in Abb. 5.6 dargestellt. So lässt sich von Probekörper 1 zu Probekörper 5 eine fallende Gerade interpolieren. In Probekörper 6 steigt der Preis wieder, was sich teilweise mit dem erhöhten Gewicht erklären lässt. Vergleicht man die Werte für Kosten und Zeit von Probekörper 1 und Probekörper 6, so sind Abnahmen von ca. 113 € und 1 h 33 min aufgrund des Lernprozesses zu verzeichnen.

Wie bereits im vorherigen Abschnitt bemerkt, liegt der größte Kostenpunkt sowie die größte Umwelteinwirkung der Montage in der Bearbeitung des Bauteils mit dem Elementarfluss des Bauteilmaterials. Das finale Gewicht des Bauteilmaterials selbst kann schwer optimiert werden. Ein Hebel wäre an dieser Stelle der Materialabfall, der ca. 46% des anfänglichen Rohmaterials ausmacht und rund 85% des finalen Bauteilgewichts entspricht. Da es sich bei den Bauteilen jedoch um Probekörper handelt, die nicht im Flugzeugflügel verbaut, sondern in der Prüfmaschine eingespannt und bei der Festigkeitsprüfung in Form eines Zugversuchs zerstört werden, sind die Ergebnisse nicht anwendungsgetreu. Der Materialabfall fällt in dieser Größenordnung aus, da die Probekörper auf die Maße der Versuchsvorrichtung gebracht werden müssen. In späterer Anwendung sollten die Schnittabfälle wesentlich geringer ausfallen. Dennoch demonstriert dieses Beispiel der Analyse ein klassisches Vorgehen der Prozessbewertung für Entscheidungsträger.

In der Studie von Katsiropoulos und Pantelakis [50], bei der eine Kostenbewertung der Montage von Verbundmaterialien mithilfe der Co-Bonding Technologie untersucht wurde, identifizierte man das Aushärten als kostenintensivstes Prozessmodul mit 79% der Gesamtkosten, wohingegen das Material nur 7% zu den totalen Kosten beitrug. Die Untersuchung ist mit der Fallstudie jedoch nur bedingt vergleichbar, da bei dem Co-Bonding das Aushärten, was in der Regel in dem Prozess der Fertigung stattfindet, zeitgleich mit der Aushärtung des Klebstoffs durchgeführt wird. Somit würden die in der Studie von Katsiropoulus und Pantelakis ermittelten Kosten für die Aushärtung in dieser Fallstudie sowohl den Kosten der Aushärtung im Prozess der Fertigung, als auch im Prozess der Montage entsprechen. Dennoch kommt man, auch bezogen auf die restlichen Kostenkategorien, nicht auf ähnliche Ergebnisse. Vernachlässigt man bei der Bewertung der Fallstudie dieser Arbeit die Bauteileinflüsse, dominiert die Arbeitskraft die Prozesskosten. Das liegt wiederum in dem geringen Automatisierungsgrad der Montage und der langen Aktivitätszeiten wegen manueller Bearbeitung. So wurden z.B. in der Oberflächenbehandlung fast alle Schleifarbeiten per Hand ausgeführt, was in einer Dauer des Schleifprozesses von bis zu einer Stunde resultierte. In dem UP der mechanischen Vorarbeit wurden lange Maschinenzeiten gemessen, für die jeweils eine Arbeitskraft für die

volle Zeit involviert ist. Aufgrund der Bauteilgeometrie und gestellten Anforderung ist die Bearbeitung nicht in einer einfachen CNC-Fräsmaschine möglich. Es wären Spezialmaschinen notwendig, was wiederum zu neuen Kosten führen und sich nur bei hohem Produktionsvolumen rentieren würde. Unerwarteter Weise fallen kosten für Klebstoff und Harz relativ gering aus.

Neben ökologischer Einwirkungen des Bauteils wurde für die Verbrauchsgüter eine dominante Rolle auf den Indikator TETP identifiziert. Der Ursprung dieses Einflusses liegt, wie bereits im vorherigen Abschnitt erläutert, in den verwendeten Baumwolltüchern. Als Lösungsansatz könnte an dieser Stelle eine Substitution der verwendeten Tücher mit einer umweltfreundlicheren Alternative genannt werden. Dennoch ist dieses Ergebnis kritisch zu hinterfragen. Als CF der Baumwolltücher wurde aus der EcoInvent Datenbank der Eintrag „fibre production, cotton, ginning; RoW [1]“ genutzt. RoW steht dabei für die geographische Zuordnung „Rest of World“ einer Zusammenstellung mehrerer vorhandener, geographisch globaler Datensätze, welche potentiell nicht der Produktion der tatsächlich verwendeten Tücher entsprechen könnten. Ähnlich der Fertigung wäre eine Automatisierung der Montageprozesse und dahingehend eine effizientere Nutzung von Material, Zeit und Arbeitskraft ein logischer Rückschluss der Bewertung der Ökoeffizienz.

Allgemein ist die Benutzung von Annahmen der größte Kritikpunkt der angewandten Methoden. Die Annahmen, die für die Bewertung der Prozesse realisiert worden, sind teilweise mit großen Vereinfachungen der Realität verbunden. So ist die Kategorie Ausstattung NRC besonders kritisch zu betrachten, da für die verwendeten Maschinen keine LCIA-Werte vorhanden waren und diese mehrheitlich durch Material- und Gewichtsschätzungen approximiert wurden. Ähnliche Kritik gilt für CF des Klebstoffs. Unerwarteterweise fielen die Einflüsse des Klebstoffs auf die Ökobilanz sehr gering aus. Das kann zum einen, verglichen mit Bauteilmasse und Masse der Verbrauchsgüter, mit den sehr geringen Mengen des Klebstoffmaterials erklärt werden. Zum anderen kann eine nicht zureichende LCIA mit ungenauen CF der Grund sein. Von Herstellerseite konnten keine Aussagen über die Ökobilanzen der Produkte getroffen werden. Die genutzte EcoInvent-Datenbank beinhaltet keine Parameter für die aufgelisteten Chemikalien des Sicherheitsdatenblatts des Klebstoffs, weswegen die Daten für die Substanz mit Polyurethan angenommen wurden. Zusätzlich vernachlässigt die Bewertung viele Aspekte, die für die Ganzheitlichkeit der Prozessanalyse notwendig wären. So wurden keine Recyclingkosten der Maschinen und Einrichtungen betrachtet. Weiterhin wurde für die Arbeitskraft nur die Indikatoren der DC und GWP betrachtet. Für alle anderen Indikatoren konnten keine Werte für die CF ausfindig gemacht werden.

6 Zusammenfassung und Ausblick

Die Aufgabe dieser Arbeit war die Bewertung der Ökoeffizienz von Faserverbund-Montageprozessen. In der Arbeit wurden zu Beginn benötigte Grundlagen zur Methode des LCAs und der LCCA, zu relevanten ökologischen und ökonomischen Indikatoren, zur bereits exisiteren Software des EEAMs sowie zu den verschiedenen Montageverfahren erläutert. Anhand des dort erarbeiteten Wissens wurde auf Basis vorangehender Arbeiten von Al-Lami et al. und Al-Lami [53, 54] ein Modell zur Elementarflussanalyse erstellt und in die Software des EEAMs integriert. Als Fallstudie wurde die Fertigung und Montage eines Flügelholms eines unbemannten Stratosphärenflugzeugs begleitet und hinsichtlich seiner Ökoeffizienz bewertet. Es wurden mehrere Bauteile gefertigt und anschließend mittels Klebung miteinander verbunden. Dabei wurden die Elementarflüsse der Prozesse gemessen und mithilfe des EEAMs und der dort implementierten Elementarflussanalyse parametrisiert. Die Bewertung der Prozesse wurde nach neunzehn ökologischen Indikatoren und einem ökonomischen Indikator durchgeführt. Die Auswertung der Ergebnisse ergab, dass bei der Montage die Elementarflüsse des verwendete Faserverbundmaterials in Form des Bauteils und dessen Wegschnitte größte Treiber für Kosten und Umwelteinflüsse sind. Dieses ökonomische und ökologische Gewicht des Bauteils ergibt sich aus den bereits eingeflossenen Elementarströmen während der Fertigung der Einzelbauteile. Neben der Arbeitkraft sind bei der Fertigung das Prepreg-Material und das Formwerkzeug größte Kostenpunkte. Beim Betrachten der ökologischen Aspekte der Fertigung bestimmen der Energiekonsum durch das Aushärten im Autoklav und das Prepeg-Material die ökologische Bilanz. Vernachlässigt man bei der Montage die Einflüsse der Elementarflüsse durch die zumontierenden Bauteile, ist der größte Kostentreiber die Arbeitskraft. Dieser Sachverhalt resultiert daraus, dass die Montage zu großen Teilen in dieser projektspezifischen Ausführung in nicht-automatisierter Handarbeit durchgeführt wurde. Das bedingt längere Prozesszeiten und längerer Arbeitszeiten des Personals. Bezüglich der ökologischen Bewertung wurde bei der Montage, unter Vernachlässigung der Bauteileinflüsse, der Großteil der Umwelteinwirkungen bei dem Energiekonsum durch Werkzeuge und der Nutzung von Verbrauchsgütern lokalisiert. Für das erstellte Modell wurde eine Validierung durchgeführt, welche aufgrund mangelnder Literaturen und Daten nicht vollständig die Validität der Anwendung belegen kann. Im Allgemeinen wurde die Bewertung des Produktsystems mit vielen Annahmen und Vereinfachungen durchgeführt, was mit einer großen Ungenauigkeit gegenüber der Realität einhergeht.

Für zukünftige Anwendungen gibt es einige Stellen, die Verbesserungs- und Optimierungspotential aufweisen. Angefangen bei der Nutzung der CF benötigt es eine zugängliche und weitreichendere Datenlage. Keines der verwendeten Produkte für die Durchfüh-

rung der Prozesse besaß von Herstellerseite Angaben zu ökologischen Auswirkungen. Das Thema der Ressourcenschonung und der Klimaneutralität zeigt immer größeren Stellenwert in Politik sowie Wirtschaft und wird dahingehen den Markt immer mehr prägen. Mit dem Ziel der Klimaneutralität der Bundesrepublik Deutschland bis zum Jahr 2045, werden Produzenten mit großer Wahrscheinlichkeit in Zukunft dazu verpflichtet, Ökobilanzen für ihre gefertigten Produkte durchzuführen und vorzuweisen. Das sollte eine umfassendere Datenlage schaffen. Dementsprechend wäre eine gobale Open-Source Datenbank, welche alle LCIA-Ergebnisse verschiedenster Produkte beinhaltet, von Vorteil. Dennoch sind weitere Untersuchungen in den Bereichen notwendig, um auch die Methodik weiterzuentwickeln. So komplex wie das Thema der Umweltauswirkung ist, benötigt es vereinheitlichtere Methoden und Indikatoren, die der Wirtschaft von der Politik vorgegeben werden müssen. Das schafft eine Basis, auf der Prozesse und Produkte verglichen und in Relation gesetzt werden können.

Das Thema der Montage zeigt sich im Gegensatz zur Fertigung als ein Prozess mit eher geringem Einfluss auf die Gesamtbilanz. Um ein ganzheitlicheres Bild zu generieren, ist es zum einen notwendig, die Bewertung um weitere Abschnitte des Lebenszyklus zu erweitern und eine Cradle-To-Grave, als auch Cradle-To-Cradle Bewertung durchzuführen. Zum anderen erfordert es für die weiterführende Validierung des Modells und der Ergebnisse vergleichbare Studien und Untersuchungen anderer Produktsysteme, in welcher die Montage von Faserverbundkunststoffen betrachtet werden. Die Ergebnisse dieser Fallstudie sollen als Grundstein für weitere Untersuchungen gelten und die Ökobilanzierung der Produktion von Faserverbundbauteilen um die detailierte Untersuchung der Montage erweitern. Da ein Großteil der ökologischen Auswirkungen in der Verwendung von Faserverbundmaterial und dem hohen Energiekonsum resultieren zeigt das zwei Verbesserungsansätze auf. Zum einen gilt es, Stoffkreisläufe zu etablieren, um den Faserverbundkunststoff zu recyclen und erneut in Anwendungen verwendbar zu machen. Zum anderen ist es notwendig, die Energieproduktion durch den Ausbau erneuerbarer Energien voranzutreiben und nachhaltiger zu gestalten, um die Umwelteinwirkung resultierend aus dem Energiekonsum zu verringern. Hinsichtlich der Etablierung von Stoffkreisläufen ergibt sich weiterführend ein großes Themengebiet der Circular Indicators, welche vor allem in dem Themengebiet der Faserverbundkunststoffe noch wenig definiert und kaum etabliert sind.

Literaturverzeichnis

[1] ecoinvent Association. *EcoInvent Database*. 2022. URL: https://ecoinvent.org/the-ecoinvent-database/ (besucht am 09. 06. 2022) (siehe S. 19, 49, 55–57, 76, 82).

[2] Ecochain Technologies B.V. *Ökobilanz (LCA) – Leitfaden für Anfänger*. 2022. URL: https://ecochain.com/de/knowledge-base/oekobilanz-lca-kompletter-leitfaden-fur-anfanger/ (besucht am 09. 06. 2022) (siehe S. 10).

[3] J. Bachmann. „Wirkungsabschätzung der Herstellung fabrikneuer Kohlenstofffasern mit PAN Precurser“. interne Untersuchung. Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrttechnik e.V., 2022 (siehe S. 56, 75, 76).

[4] I. Bianchi, A. Forcellese, M. Marconi, M. Simoncini, A. Vita und V. Castorani. „Environmental impact assessment of zero waste approach for carbon fiber prepreg scraps“. In: *Sustainable Materials and Technologies* 29 (2021). ISSN: 2214-9937. DOI: https://doi.org/10.1016/j.susmat.2021.e00308 (siehe S. 18).

[5] D. Blanco, E. M. Rubio, R. M. Lorente-Pedreille und M. A. Sáenz-Nuño. „Lightweight Structural Materials in Open Access: Latest Trends“. In: *Materials* 14.21 (2021). ISSN: 1996-1944. DOI: 10.3390/ma14216577 (siehe S. 5).

[6] J. Clarke, A. McIlhagger, E. Archer, T.s Dooher, T. Flanagan und P. Schubel. „A Feature-Based Cost Estimation Model for Wind Turbine Blade Spar Caps“. In: *Applied System Innovation* 3.2 (2020), S. 17 (siehe S. 13).

[7] R. Cooper und R. S. Kaplan. „Profit priorities from activity-based costing“. In: *Harvard business review* 69.3 (1991), S. 130–135 (siehe S. 12).

[8] A. P. da Costa1, E. C. Botelho1, M. L. Costa, N. Eiji Narita und J. R. Tarpani. „A Review of Welding Technologies for Thermoplastic Composites in Aerospace Applications.“ In: *J.Aerosp. Technol.Manag., Sao José dos Campos* 4.3 (2012), S. 255–265. DOI: https://doi.org/10.5028/jatm.2012.04033912 (siehe S. 25, 26).

[9] S. Das. „Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites“. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 16 (März 2011), S. 268–282. DOI: 10.1007/s11367-011-0264-z (siehe S. 18).

[10] J. Denkhaus und P. Hilmer. „LEconomical and Environmental Assessment of CFRP Manufacturing Process Variations with Special Regards to Production Equipment“. Bachelorarbeit. TU Braunschweig, 2014 (siehe S. 5, 74, 75).

[11] L. D. DeSimone und F. Popoff. *Eco-Efficiency: The Business Link to Sustainable Development*. Bd. 1. MIT Press Books 0262541092. The MIT Press, Dez. 2000. ISBN: ISBN: 9780262541091 (siehe S. 7).

[12] DIN 8593-0 (Ausgabe: 2003-09): Fertigungsverfahren Fügen, Teil 0: Allgemeines (siehe S. 22).

[13] DIN EN 9100 (Ausgabe: 2018-08): Qualitätsmanagementsysteme - Anforderungen an Organisationen der Luftfahrt, Raumfahrt und Verteidigung; Deutsche und Englische Fassung EN 9100:2018 (siehe S. 23).

[14] DIN EN ISO 14040 (Ausgabe: 2006-10): Umweltmanagement - Ökobilanz - Grundsätze und Rahmenbedingung (siehe S. 8, 9).

[15] DIN EN ISO 14044 (Ausgabe: 2022-02): Umweltmanagement - Ökobilanz - Anforderung und Anleitung (siehe S. 8, 10, 42).

[16] DIN EN ISO 14050 (Ausgabe:2020-08): Umweltmanagement - Begriffe (siehe S. 7).

[17] DIN EN ISO 14051 (Ausgabe: 2011-12): Umweltmanagement - Materialflusskostenrechnung - Allgemeine Rahmenbedingungen (siehe S. 12).

[18] J. Duflou, Y. Deng, K. Van Acker und W. Dewulf. „Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study“. In: *MRS Bulletin* 37 (Apr. 2012), S. 374–382. DOI: `10.1557/mrs.2012.33` (siehe S. 18, 78).

[19] AVK Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V. *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites*. Frankfurt am Main, Deutschland: Springer Vieweg, 2014. ISBN: 978-3-658-02754-4 (siehe S. 22–27).

[20] DLR e.V. *DLR entwickelt unbemanntes Stratosphärenflugzeug*. 2021. URL: `https://www.dlr.de/content/de/artikel/news/2021/02/20210421_dlr-entwickelt-unbemanntes-stratosphaerenflugzeug.html` (besucht am 16. 06. 2022) (siehe S. 43, 44).

[21] J. Ehrenfeld. „Ecoefficiency: Philosophy, Theory, and Tools“. In: *Journal of Industrial Ecology - J IND ECOL* 9 (Okt. 2005), S. 6–8. DOI: `10.1162/1088198057752 48070` (siehe S. 7).

[22] H. Eickenbusch und O. Krauss. „Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien“. In: *VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH (VDI ZRE)* 3 (2016) (siehe S. 5).

[23] Tomas Ekvall. „Attributional and Consequential Life Cycle Assessment“. In: *Sustainability Assessment at the 21st century.* Hrsg. von M. J. Bastante-Ceca, J. L. Fuentes-Bargues, L. Hufnagel, F.-C. Mihai und C. Iatu. Rijeka: IntechOpen, 2019. Kap. 4. DOI: `10.5772/intechopen.89202`. URL: `https://doi.org/10.5772/intechopen.89202` (siehe S. 10).

[24] A. Engels, M. Roehrig und T. Witte. „Possible Optimization of the Energy Balance in the Automotive Sector by the use of Carbon Composite Structures“. In: *Procedia Engineering* 49 (2012). International Energy Congress 2012, S. 303–309. ISSN: 1877-7058. DOI: `https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.10.141` (siehe S. 5).

[25] Institute for Environment European Commission Joint Research Centre und Sustainability. „ILCD Handbook: Analysing of existing Environmental Impact Assessment methodologies for use in Life Cycle Assessment“. In: 2010 (siehe S. 14).

[26] Institute for Environment European Commission Joint Research Centre und Sustainability. „ILCD Handbook: Recommendations for Life Cycle Impact Assessment in the European context“. In: 2010 (siehe S. 15).

[27] Eurostat. *Electricity price statistics (Data extracted in April 2022).* 2022. URL: `https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Electricity_price_statistics#Electricity_prices_for_non-household_consumers` (besucht am 09. 05. 2022) (siehe S. 53).

[28] A. Forcellese, M. Marconi, M. Simoncini und A. Vita. „Environmental and buckling performance analysis of 3D printed composite isogrid structures“. In: *Procedia CIRP* 98 (2021), S. 458–463 (siehe S. 78).

[29] H. E. Friedrich. *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik.* DLR Stuttgart, Deutschland: Springer Vieweg, 2017. ISBN: 978-3-658-12294-2 (siehe S. 24, 26, 27).

[30] R. Frischknecht, F. Wyss, S. Büsser Knöpfel, Th. Lützkendorf und M. Balouktsi. „Cumulative energy demand in LCA: the energy harvested approach“. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 20.7 (2015), S. 957–969 (siehe S. 18).

[31] J. M. Gardner, J. P. Wolbert, L. R. Holmes Jr. und D. D. Pappas. „Evaluation of Peel Ply Surface Preparation of Composite Surfaces for Secondary Bonding“. In: *Army Research Laboratory: A reprint from the 2012 SAMPE Conference Proceedings* (2013) (siehe S. 31).

[32] M. Goedkoop, R. Heijungs, M. Huijbregts, A. Schryver, J. Struijs und R. Zelm. „ReCiPE 2008: A life cycle impact assessment method which comprises harmonised category indicators at the midpoint and the endpoint level“. In: (Jan. 2008) (siehe S. 14–17).

[33] M. Goedkoop, R. Müller-Wenk, Th. Mettier, K. Hungerbühler, A. Braunschweig und Th. Klaus. „Eco-indicator 99–eine schadensorientierte Bewertungsmethode“. In: *Nachbereitung zum* 12 (2000) (siehe S. 14).

[34] J. Gonçalves, J.F. dos Santos, L.B. Canto und S.T. Amancio-Filho. „Friction spot welding of carbon fiber-reinforced polyamide 66 laminate.“ In: *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS* 159 (2015), S. 506–509. DOI: `http://doi.org/10.1016/j.matlet.2015.08.036` (siehe S. 25).

[35] Maurice Gosselin. „A Review of Activity-Based Costing: Technique, Implementation, and Consequences“. In: Hrsg. von C.r S. Chapman, A. G. Hopwood und M. D. Shields. Bd. 2. Handbooks of Management Accounting Research. Elsevier, 2006, S. 641–671. DOI: `https://doi.org/10.1016/S1751-3243(06)02008-6` (siehe S. 12, 13).

[36] J. Guinée, M. Gorrée, R. Heijungs, G. Huppes, R. Kleijn, A. Koning, L. Oers, A. Wegener S., S. Suh, H. Haes, H. Bruijn, R. van Duin und M. Huijbregts. *Handbook on LCA, operational guide to the ISO standards*. Jan. 2002. ISBN: ISBN 1-4020-0228-9 (siehe S. 14, 15).

[37] K. Gustke, D. Kupke, R. Drehmann, T. Lampke, J. Gebauer, U. Klotzbach und A.F. Lasagni. „Low Temperature Soldering of Laser Structured and Metal Coated Fiber Reinforced Plastics.“ In: *Thermal Spray 2021: Proceedings from the International Thermal Spray Conference* (2021), S. 569–577. DOI: `https://doi.org/10.31399/asm.cp.itsc2021p0569` (siehe S. 23).

[38] G. Habenicht. *Kleben - Grundlagen, Technologien, Anwendungen*. München, Deutschland: Springer Berlin, 2009. ISBN: 978-3-540-85264-3 (siehe S. 27–30).

[39] P. Hilmer, A. Al-Lami und M. Buggisch. „Assessment of Hybrid Heating for Curing of CFRP Structures“. In: *7th EASN conference-Proceedings*. 2017 (siehe S. 13).

[40] J. Holtmannspötter, J. V. Czarnecki, M. Wetzel, D. Dolderer und C. Eisenschink. „The Use of Peel Ply as a Method to Create Reproduceable But Contaminated Surfaces for Structural Adhesive Bonding of Carbon Fiber Reinforced Plastics“. In: *The Journal of Adhesion* 89 (2013), S. 96–110. DOI: `http://doi.org/10.1080/00218464.2012.731828` (siehe S. 31).

[41] M. Huijbregts, Z. Steinmann, P. Elshout, G. Stam, F. Verones, M. Vieira, M. Zijp, A. Hollander und R. Zelm. „ReCiPe2016: a harmonised life cycle impact assessment method at midpoint and endpoint level“. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 22 (Dez. 2016). DOI: 10.1007/s11367-016-1246-y (siehe S. 14, 15, 17).

[42] P. Icha, Dr. T. Lauf und G. Kuhs. „Entwicklung der spezifischen Treibhausgas-Emissionen des deutschen Strommix in den Jahren 1990 - 2021“. In: (Apr. 2022) (siehe S. 74).

[43] Presse- und Informationsamt der Bundesregierung. *Weltklimarat: CO2-Emissionen einsparen.* 2021. URL: https://www.bundesregierung.de/breg-de/themen/klimaschutz/ipcc-bericht-klimawandel-1949346 (besucht am 19. 06. 2022) (siehe S. 5).

[44] O. Jolliet, M. Margni, R. Charles, S. Humbert, J. Payet, G. Rebitzer und R. Rosenbaum. „IMPACT 2002+: a new life cycle assessment methodology. Int J Life Cycle Assess 8:324-330“. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 8 (Nov. 2003), S. 324–330. DOI: 10.1007/BF02978505 (siehe S. 14, 15, 20).

[45] I. Jölly, S. Schlögl, M. Wolfahrt, G. Pinter, M. Fleischmann und W. Kern. „Chemical functionalization of composite surfaces for improved structural bonded repairs“. In: *Composites: Part B* 69 (2015), S. 296–303. DOI: http://doi.org/10.1016/j.compositesb.2014.10.020 (siehe S. 31).

[46] C. B. Joung, J. Carrell, P. Sarkar und S. C. Feng. „Categorization of indicators for sustainable manufacturing“. In: *Ecological Indicators* 24 (2013), S. 148–157. ISSN: 1470-160X. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2012.05.030 (siehe S. 14, 18).

[47] V. A. Kagan und R. J. Nichols. „Benefits of Induction Welding of Reinforced Thermoplastics in High Performance Applications.“ In: *Journal of Reinforced Plastics and Composites* 24.13 (2005), S. 1345–1352. DOI: https://doi.org/10.1177/0731684405048846 (siehe S. 25).

[48] M. Kanerva und O. Saarela. „The peel ply surface treatment for adhesive bonding of composites: A review“. In: *International Journal of Adhesion Adhesives* 43 (2013), S. 60–69. DOI: http://doi.org/10.1016/j.ijadhadh.2013.01.014 (siehe S. 31).

[49] R. S. Kaplan und S. R. Anderson. „Time-driven activity-based costing“. In: *SSRN 485443* (2003) (siehe S. 12, 13).

[50] C.V. Katsiropoulos und S.G. Pantelakis. „An overall assessment of a new adhesive bonding process for composite materials, with regard to quality and cost“. In: *Plastics, Rubber and Composites* 45.1 (2016), S. 22–30. DOI: 10.1080/14658011.2015.1113038 (siehe S. 33, 81).

[51] B. Klein. „Leichtbauweisen“. In: *Leichtbau-Konstruktion: Berechnungsgrundlagen und Gestaltung*. Wiesbaden: Vieweg+Teubner Verlag, 2001, S. 16–20. ISBN: 978-3-322-96964-4. DOI: 10.1007/978-3-322-96964-4_4 (siehe S. 21, 22).

[52] D. Knoll. „Verkleben von glasfaserverstärkten Duroplasen“. In: *Adhäsion - Kleben & Dichten*. Band 34, Heft 5 (1990), S. 36–39 (siehe S. 24).

[53] A. Al-Lami. „Time-Dependent Eco-Efficiency Assessment in the Production of Composite Structures Case study from manufacturing aircraft ribs made of fiber-reinforced polymer (FRP)“. Diss. Jan. 2021 (siehe S. 5, 7, 32, 33, 49, 53, 73–75, 80, 83).

[54] A. Al-Lami, P. Hilmer und M. Sinapius. „Eco-efficiency assessment of manufacturing carbon fiber reinforced polymers (CFRP) in aerospace industry“. In: *Aerospace Science and Technology* 79 (2018), S. 669–678 (siehe S. 5, 11, 13, 19, 21, 73–75, 79, 83).

[55] R. Lässig, M. Eisenhut, A. Mathias, R. T. Schulte, F. Peters, T. Kühmann, T. Waldmann und W. Begemann. „Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen“. In: *Roland Berger Strategy Consultants* (2012). ISSN: 0376-0421 (siehe S. 5).

[56] B. Lotter und H.-P. Wiendahl. *Montage in der industriellen Produktion*. VDI-Buch. Heidelberg, Deutschland: Springer, Berlin, Heidelberg, 2006. ISBN: 978-3-540-21413-7 (siehe S. 22).

[57] K. Madden, R. Young, K. Brady und J. Hall. „Eco-efficiency Learning Module. Technical report, World Business Council for Sustainable Development, File Winds International.“ In: 2005 (siehe S. 7).

[58] F. Meng, E. A. Olivetti, Y. Zhao, J. C. Chang, S. J. Pickering und J. McKechnie. „Comparing Life Cycle Energy and Global Warming Potential of Carbon Fiber Composite Recycling Technologies and Waste Management Options“. In: *ACS Sustainable Chemistry & Engineering* (2018) (siehe S. 55).

[59] A. Möller und S. Schaltegger. „The Sustainability Balanced Scorecard as a Framework for Eco-efficiency Analysis“. In: *Journal of Industrial Ecology* 9 (Okt. 2005), S. 73–83. DOI: 10.1162/108819805775247927 (siehe S. 7).

[60] G. A. Norris. „Integrating life cycle cost analysis and LCA“. In: *The International Journal of Life Cycle Assessment* 6.3 (2001), S. 118–120. DOI: https://doi.org/10.1007/BF02977849 (siehe S. 11).

[61] N. Nothdurft und P. Hilmer. „Integrierte Umweltkostenrechnung von Faserverbundfertigungsprozessen am Beispiel einer CFK-Flügelrippe“. Masterarbeit. TU Braunschweig, 2016 (siehe S. 5, 73).

[62] W. L. Oberkampf, T. G. Trucano und C. Hirsch. „Verification, Validation, and Predictive Capability in Computational Engineering and Physics“. In: *Applied Mechanics Reviews* 57 (2004), S. 345–384 (siehe S. 10, 11).

[63] H. M. Rao, J. Kang, G. Huff und K. Avery. „Impact of Specimen Configuration on Fatigue Properties of Self-Piercing Riveted Aluminum to Carbon Fiber Reinforced Polymer Composite“. In: *International Journal of Fatigue* 113 (2018), S. 11–22. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ijfatigue.2018.03.031 (siehe S. 24).

[64] H.-C. Rudolf und A. Al-Lami. „Leistungsmessung in der Produktion von Faserverbundbauteilen: Ein generisches Modell zur Abbildung und Bewertung in Bezug auf Kosten, Ressourcen und Umweltverträglichkeit“. Masterarbeit. TU Clausthal, 2019 (siehe S. 73).

[65] P. Saling. *Special Types of Life Cycle Assessment*. Springer Netherlands, 2016. Kap. Eco-Efficiency Assessment, S. 115–178 (siehe S. 7).

[66] P. Saling, A. Grosse-Sommer, A. Alba-Perez und D. Kralisch. „Using the Eco-Efficiency Analysis and SEEbalance in the Sustainability Assessment of Products and Processes. In: Sustainable Neighbourhood, from Lisbon to Leipzig through Research“. In: Mai 2007 (siehe S. 7).

[67] A. Schachinger und A. Al-Lami. „Real-Time Life Cycle Assessment in the Production of Composite Structures using Visual Recognition“. Masterarbeit. FH JOANNEUM, 2018 (siehe S. 73).

[68] S. Schaltegger und A. Sturm. „Ökologieorientierte Entscheidungen in Unternehmen. Ökologisches Rechnungswesen statt Ökobilanzierung: Notwendigkeit, Kriterien, Konzepte“. In: (Jan. 1992) (siehe S. 7).

[69] S. Schlesinger, R. E. Crosbie, R. E. Gagné, G. S. Innis, C. S. Lalwani, Sylvester Loch J., Wright R. J., N. R. D. Kheir und D. Bartos. „Terminology for model credibility“. In: *SIMULATION* 32.3 (1979), S. 103–104. DOI: 10.1177/003754977903200304. URL: https://doi.org/10.1177/003754977903200304 (siehe S. 10, 11).

[70] M. Schmidt und M. Nakajima. „Material Flow Cost Accounting as an Approach to Improve Resource Efficiency in Manufacturing Companies“. In: *Resources* 2.3 (2013), S. 358–369. ISSN: 2079-9276. DOI: 10.3390/resources2030358. URL: https://www.mdpi.com/2079-9276/2/3/358 (siehe S. 11).

[71] K. Schönthaler und S. Pieck. „Weiterentwicklung der umweltbezogenen Nachhaltigkeitsindikatoren und des Umwelt-Kernindikatorensystems zur Bilanzierung der Fortschritte in der deutschen Nachhaltigkeitsstrategie“. In: *Umweltbundesamt* (2013) (siehe S. 14).

[72] M. Schweizer, D. Meinhard, S. Ruck, H. Riegel und V. Knoblauch. „Adhesive bonding of CFRP: a comparison of different surface pre-treatment strategies and their effect on the bonding shear strength“. In: *Journal of Adhesion Science and Technology* 31.23 (2017), S. 2581–2591. DOI: https://doi.org/10.1080/01694243.2017.1310695 (siehe S. 29, 30).

[73] Young S. Song, Jae R. Youn und Timothy G. Gutowski. „Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites“. In: *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing* 40.8 (2009), S. 1257–1265. DOI: https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2009.05.020. URL: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S1359835X09001687 (siehe S. 56, 76).

[74] C. Soutis. „Fibre reinforced composites in aircraft construction“. In: *Progress in Aerospace Sciences* 41.2 (2005), S. 143–151. ISSN: 0376-0421. DOI: https://doi.org/10.1016/j.paerosci.2005.02.004 (siehe S. 5).

[75] T.F. Stocker, D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex und P.M. Midgley. „IPCC, 2013: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change“. In: *MRS Bulletin* 5 (2013), S. 1535. DOI: CambridgeUniversityPress,Cambridge,UnitedKingdomandNewYork,NY,USA (siehe S. 17).

[76] Strom-Report. *Strommix 2021: Stromerzeugung in Deutschland*. 2022. URL: https://strom-report.de/strom/ (besucht am 09. 05. 2022) (siehe S. 54, 55).

[77] P. Thumann. *Laserbasierte Klebflächenvorbereitung für CFK Strukturbauteile*. Hamburg, Deutschland: Springer Berlin, 2020. ISBN: 978-3-662-62240-7 (siehe S. 29).

[78] UNCED. *Agenda 21. UNCED, 1992*. 2022. URL: https://sustainabledevelopment.un.org/outcomedocuments/agenda21 (besucht am 08. 05. 2022) (siehe S. 13).

[79] P. Anh. Vo Dong, C. Azzaro-Pantel und A.-L. Cadene. „Economic and environmental assessment of recovery and disposal pathways for CFRP waste manage-

ment“. In: *Resources, Conservation and Recycling* 133 (Juni 2018), S. 63–75. DOI: 10.1016/j.resconrec.2018.01.024 (siehe S. 56).

[80] G. Wagner, F. Balle und D. Eifler. „Ultrasonic Welding of Aluminium Alloys to Fiber Reinfored Polymers.“ In: *ADVANCED ENGINEERING MATERIALS* 15.9 (2013), S. 792–803. DOI: https://doi.org/10.1002/adem.201300043 (siehe S. 25).

[81] M.D. Wakeman und J-A.E. Månson. „Cost Analysis“. In: Hrsg. von Long AC. Design and Manufacture of Textile Composites. Cambridge: Woodhead Publishing, 2006. DOI: https://doi.org/10.1016/S1751-3243(06)02008-6 (siehe S. 13).

[82] X. Wang, J. Yan, . Li und S. Yang. „FEM Investigation of the Temperature Field of Energy Director During Ultrasonic Welding of PEEK Composites“. In: *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 19 (2006), S. 593–607. DOI: https://doi.org/10.1177/0892705706067479 (siehe S. 26).

[83] G. Wernet, C. Bauer, B. Steubing, J. Reinhard, E. Moreno-Ruiz und B. Weidema. „The ecoinvent database version 3 (part I): overview and methodology“. In: *International Journal of Life Cycle Assessment* 21 (2016), S. 1218–1230. DOI: https://doi.org/10.1007/s11367-016-1087-8 (siehe S. 47, 49).

[84] R. A. Witik, F. Gaille, R. Teuscher, H. Ringwald, V. Michaud und J.-A. Manson. „Assessing the economic and environmental potential of out of autoclave processing“. In: *18th ICCM* (2011) (siehe S. 5, 13, 33).

[85] E. Witten, V. Mathes, M. Sauer und M. Kühnel. „Composites-Marktbericht 2018: Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen“. In: *AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoffe e.V.* (2018) (siehe S. 5).

[86] J. Wu, S. Lu, H.-J. Wang, Y. Wang, F.-B. Xia und J.n Wang. „A review on laser transmission welding of thermoplastics“. In: *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology* 116 (2021), S. 2093–2109. DOI: https://doi.org/10.1007/s00170-021-07519-z (siehe S. 26).

[87] P. Xing und H. Yu. „Tension-tension fatigue behavior and its modelling for life estimation of rivet-bonding CFRP/CFRP single lap joints“. In: *Composite Structures* 275 (2021). DOI: https://doi.org/10.1016/j.compstruct.2021.114367 (siehe S. 24).

[88] X. Xiong, D. Wang, J. Wei, P. Zhao, R. Ren, J. Dong und X. Cui. „Resistance welding technology of fiber reinforced polymer composites: a review“. In: *Journal of Adhesion Science and Technology* 35.15 (2021), S. 1593–1619. DOI: https://doi.org/10.1080/01694243.2020.1856514 (siehe S. 26).

[89] M. Zottler. „Life-Cycle Analyse von Leichtbaukonzepten für den Automobilbau“. Diplomarbeit. TU Graz, 2014 (siehe S. 5).

Abbildungsverzeichnis

2.1 Phasen einer Ökobilanz 8
2.2 Vorgehen der Wirkabschätzung 9
2.3 Valierungsrahmen nach Oberkampf et al. und Schlesinger et al. 11
2.4 Klassifizierung der Nachhaltigkeitsindikatoren 14
2.5 Übersicht der Wirkungskategorien und deren Indikatoren nach der ReCiPe2008 Methode 15
2.6 Funktionsweise des EEAMs 21
2.7 DIN 9539-0: Übersicht über die Fertigungsverfahren 23
2.8 Verfahrensarten zur Herstellung von Klebungen 28
2.9 Scherfestigkeiten von Einzelüberlappungsfügestellen 30

3.1 Diskretisierungsmodell nach Al-Lami 33
3.2 Modellierung der Montageprozesse 34
3.3 Vorgehensweise des EEAMs zur Durchführung der LCIA 41

4.1 Illustration des HAP Designs 43
4.2 Darstellung des integrierten Flügelholms 44
4.3 Darstellung der Klebung 44
4.4 Systemgrenze der Fertigung 45
4.5 Systemgrenze des Montageprozesses 46
4.6 Wickeln des Bauteils 50
4.7 Fräsen des Hohlzylinders vor dem Teilen in Innen- und Außenholm . . . 51
4.8 Verklebung von Innenholm und Hülse 52
4.9 Aushärten der Verklebung 52

5.1 Kostenverteilung des Fertigungsprozesses 60
5.2 Kostenverteilung des Fertigungsprozesses 60
5.3 Verteilung der Einflüsse des Fertigungsprozesses auf den Indikator GWP 61
5.4 Verteilung der Mittelwerte der Einflüsse des Fertigungsprozesses auf die ReCiPe-Indikatoren 62
5.5 Fortsetzung von Abb. 5.4: Verteilung der Mittelwerte der Einflüsse des Fertigungsprozesses auf die ReCiPe-Indikatoren 63
5.6 Kosten- und Gewichtsverteilung der sechs Probekörper 65
5.7 Kostenverteilung der Montage inklusive des Produktionsprozesses als Cradle-To-Gate Bewertung 66
5.8 Kostenverteilung der Montage inklusive des Produktionsprozesses als Cradle-To-Gate Bewertung 66

5.9 Kostenverteilung des Montageprozesses 67
5.10 Verteilung der Einflüsse des Montageprozesses auf den Indikator TETP 68
5.11 Verteilung der Einflüsse des Montageprozesses auf die ReCiPe-Indikatoren 69
5.12 Fortsetzung von Abb. 5.11: Verteilung der Einflüsse des Montageprozesses auf die ReCiPe-Indikatoren 70
5.13 Verteilung der Einflüsse des Montageprozesses auf den Indikator GWP ohne Bauteileinflüsse 72
5.14 Verteilung der Einflüsse des Montageprozesses auf den Indikator CED ohne Bauteileinflüsse 72
5.15 Sensitivitätsanalyse durch Variierung der Input-CF des Prepreg-Materials 77
5.16 Ökologische, ökonomische und ökoeffiziente Direkt-Anwendungen 79

A.1 Excel-Tabelle mit Ergebnissen der Durchführung einer Bewertung mit der EEAM-Software II
A.2 Visualisierung der Ergebnissen der EEAM-Software III

B.1 Prozessdaten des Teilschritts Vorformen im Fertigungsprozess V
B.2 Prozessdaten des Teilschritts Aushärten im Fertigungsprozess VI
B.3 Prozessdaten des Teilschritts mechanische Vorarbeit im Montageprozess VII
B.4 Prozessdaten des Teilschritts Oberflächenbehandlung im Montageprozess VIII

Tabellenverzeichnis

2.1 Übersicht der Midpoint-Kategorien und ökologischen Wirkungsindikatoren nach ReCiPe2008(v1.13) 16
2.2 Übersicht der Midpoint-Kategorien und CF nach ReCiPe2008(v1.13) . . 17
2.3 Vor- und Nachteile des Klebens 27

3.1 Übersicht der CF der Datenbank je Elementarfluss-kategorie 37
3.2 Berechnung der DC 38
3.3 Berechnung der ökologischen Indikatoren 39

4.1 Übersicht der verwendeten Messgeräte 48
4.2 Zusammensetzung der CF des Stromverbrauchs im Strommix2021 55
4.3 Zusammensetzung der CF des Prepreg-Materials 56

5.1 Ergebnisse der LCIA der Fertigungsprozesse 59
5.2 Ergebnisse der LCIA der Montageprozesse als Cradle-To-Gate Bewertung 64
5.3 Ergebnisse der LCIA der isoliert-betrachteten Montageprozesse. (MW.. Mittelwert; MW_{kg}.. bezogen auf ein kg Bauteilgewicht; MW_{m^2}.. bezogen auf ein m^2 Fügefläche) 68
5.4 Ergebnisse der LCIA des isolierten Montageprozesses als Gate-To-Gate Bewertung 71
5.5 Vergleich der DC für einzelne UP der Fertigung je Kilogramm gefertigter Struktur aus CFK 74
5.6 Vergleich des Kohlenstoff-Fußabdrucks für einzelne UP der Fertigung je Kilogramm gefertigter Struktur aus CFK 75
5.7 Sensitivitätsanalyse mit Variation der Input-CF des Prepreg-Materials . 76

Anhang

A Screenshots der EEAM-Anwendung

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1			10_Lagerung	1_Transpor	hanische_V	_Vorbereitu	rflächenbeh	6_Verbinde	_Fertigstell	ualitätssicherung
2	Time	Time	26,75	0,026389	0,054861	0,040278	0,063194	2,411111	0,002778	0,053472
3	Cost	Labor	0	8,25	108,625	103,125	115,5	39,875	5,5	82,42667
4		Facilities	0,474621	0	0,935111	0,701849	1,101176	7,755126	0,065714	0,612398
5		Energy	0	0	0,433934	0	0	0,176579	0	0
6		Molds	0	0	0	0	0	0	0	0
7		Fiber	0	0	0	0	0	0	0	0
8		Fiber_Wast	0	0	0	0	0	0	0	0
9		Resin	0	0	0	0	0	0,109371	0	0
10		Resin_Wast	0	0	0,030403	0	0	0,713999	0	0
11		Prepreg	0	0	573,9904	0	0	0	0	0
12		epreg_Was	0	0	489,1727	0	8,707416	0	0	0
13		ore_Materi	0	0	0	0	0	21,95802	0	0
14		Material_V	0	0	5,719154	0	0	0,84798	0	0
15		Supplies	0	0	0,69499	0,010666	12,81922	2,477556	0,323494	1,1632
16		uipment_N	0	0	0,675319	0,069519	0,050853	3,024771	0	0,003601
17	Cost Total	Total Cost	0,474621	8,25	1180,277	103,907	138,1787	76,9384	5,889208	84,20587
18		ecurrent Co	0,474621	8,25	1179,602	103,8375	138,1278	73,91363	5,889208	84,20226
19		Recurrent	0	0	0,675319	0,069519	0,050853	3,024771	0	0,003601
20	Energy	Energy	0	0	3,054	0	0,001	1,224	0	0
21	CED	Labor	0	0	0	0	0	0	0	0
22		Facilities	0,005851	0	0,010638	0,007945	0,012465	0,088385	0,00081	0,007404
23		Energy	0	0	24,636	0	0,008067	9,87376	0	0
24		Molds	0	0	0	0	0	0	0	0
25		Fiber	0	0	0	0	0	0	0	0
26		Fiber_Wast	0	0	0	0	0	0	0	0
27		Resin	0	0	0	0	0	0,514297	0	0
28		Resin_Wast	0	0	0,142096	0	0	3,339785	0	0
29		Prepreg	0	0	1181,4	0	0	0	0	0
30		epreg_Was	0	0	994,0996	0	17,69526	0	0	0
31		ore_Materi	0	0	0	0	0	2,711762	0	0
32		Material_V	0	0	0,707959	0	0	0,104969	0	0
33		Supplies	0	0	1,816309	0	35,16628	11,62244	3,087987	0,96299
34		uipment_N	0	0	0,306441	0,026672	0,015524	1,005308	0	2,01E-05
35	CED Total	Total	0,005851	0	2203,119	0,034617	52,89759	29,26071	3,088797	0,970413
36		Recurrent	0,005851	0	2202,813	0,007945	52,88207	28,2554	3,088797	0,970393
37		on Recurre	0	0	0,306441	0,026672	0,015524	1,005308	0	2,01E-05
38	ALOP	Labor	0	0	0	0	0	0	0	0
39		Facilities	5,3E-06	0	1,02E-05	7,65E-06	1,2E-05	8,47E-05	7,34E-07	6,8E-06
40		Energy	0	0	0,019324	0	6,33E-06	0,007745	0	0
41		Molds	0	0	0	0	0	0	0	0
42		Fiber	0	0	0	0	0	0	0	0
43		Fiber_Wast	0	0	0	0	0	0	0	0
44		Resin	0	0	0	0	0	0,000837	0	0
45		Resin_Wast	0	0	0,000232	0	0	0,005443	0	0
46		Prepreg	0	0	1,341815	0	0	0	0	0
47		epreg_Was	0	0	1,145461	0	0,02039	0	0	0
48		ore_Materi	0	0	0	0	0	0,003254	0	0
49		Material_V	0	0	0,000852	0	0	0,000126	0	0
50		Supplies	0	0	0,002816	0	0,22239	0,084879	0,007272	0,063817
51		uipment_N	0	0	0,000546	0,000101	5,9E-05	0,003597	0	5,1E-08
52	ALOP Total	Total	5,3E-06	0	2,511055	0,000109	0,242857	0,105966	0,007273	0,063824
53		Recurrent	5,3E-06	0	2,51051	7,65E-06	0,242798	0,102369	0,007273	0,063824
54		on Recurre	0	0	0,000546	0,000101	5,9E-05	0,003597	0	5,1E-08

Abbildung A.1: Excel-Tabelle mit Ergebnissen der Durchführung einer Bewertung mit der EEAM-Software

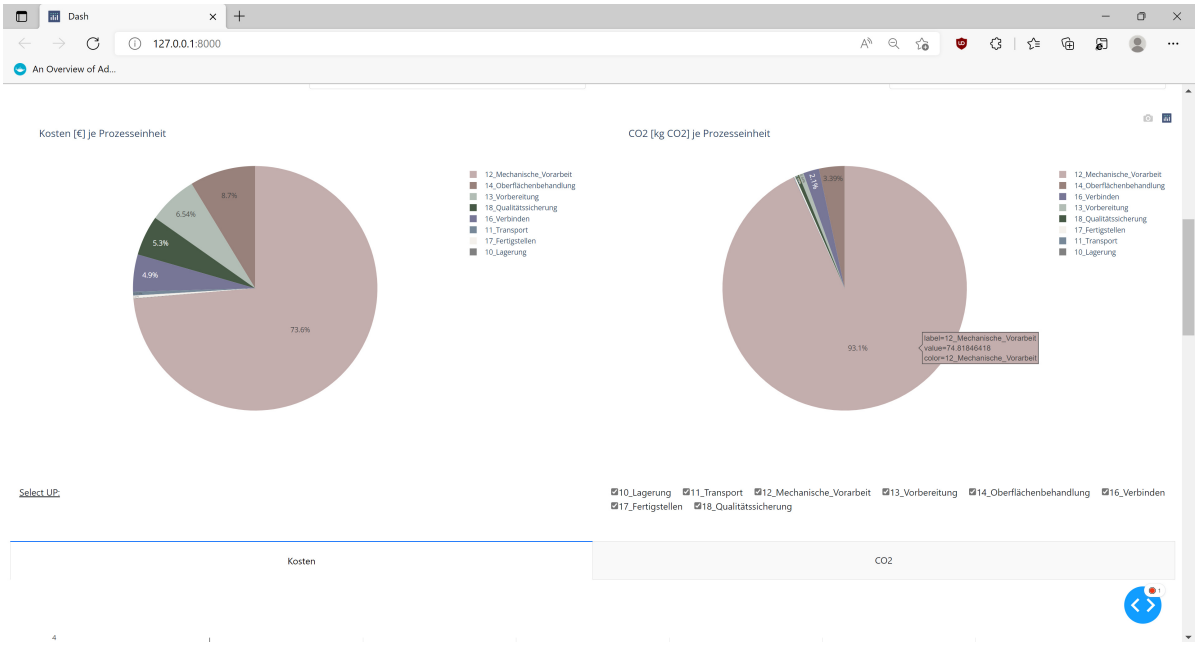


Abbildung A.2: Visualisierung der Ergebnissen der EEAM-Software

B Datenblätter der Prozessmessungen

Project: HAP
Status: on-going
Date: 29.03.2022
Recorded by: Lucas Seifert
Site: BS
Component/Product: HSVK-WKZB-PmP
Unit Process: 13_Preforming
Comments: Measurement

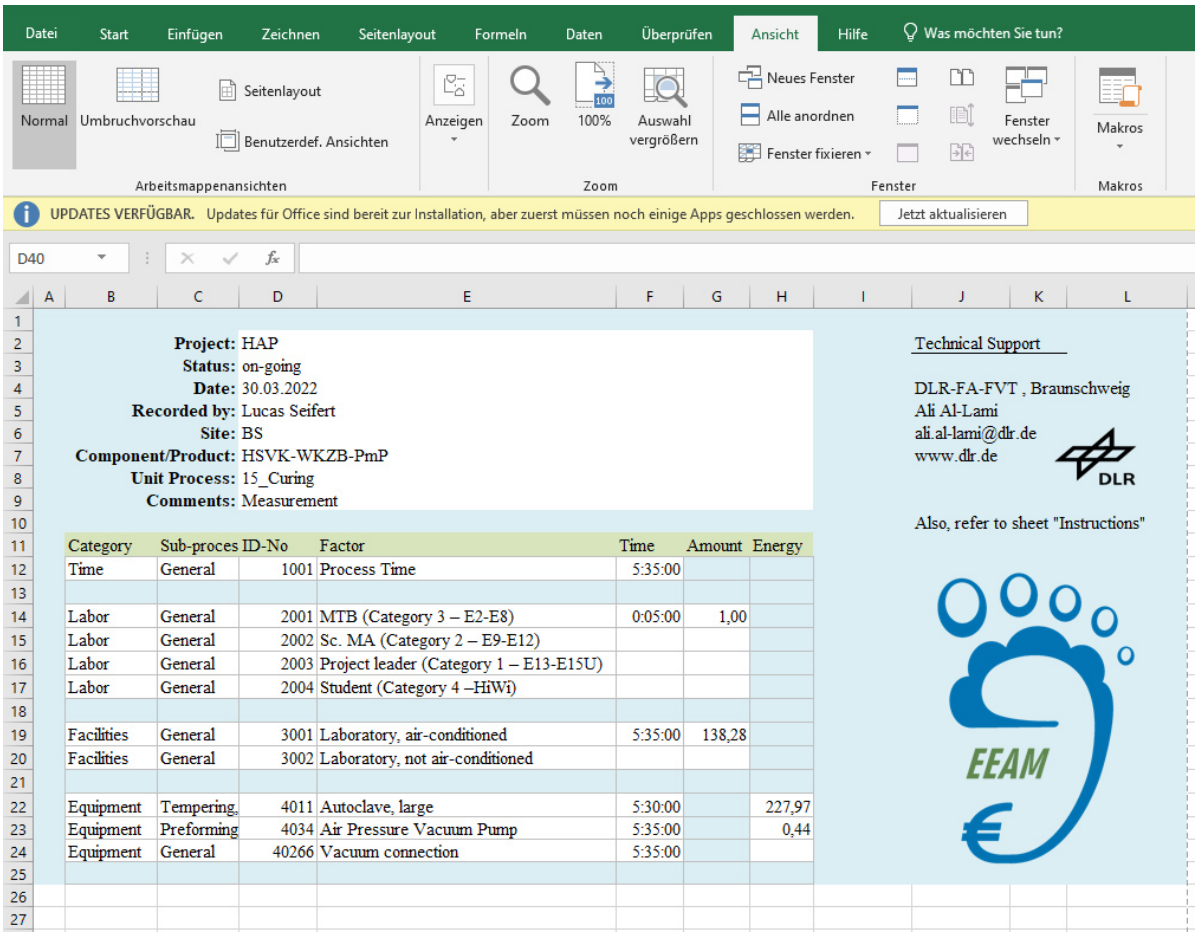
Category	Sub-process	ID-No	Factor	Time	Amount	Energy
Time	General	1001	Process Time	3:18:00		
Labor	General	2001	MTB (Category 3 – E2-E8)	3:18:00	1,00	
Labor	General	2002	Sc. MA (Category 2 – E9-E12)			
Labor	General	2003	Project leader (Category 1 – E13-E15U)			
Labor	General	2004	Student (Category 4 –HiWi)	3:18:00	1,00	
Facilities	General	3001	Laboratory, air-conditioned	3:18:00	172,70	
Facilities	General	3002	Laboratory, not air-conditioned			
Equipment	Preparing, Pre	4014	Tool trolley incl. Standard tools	0:09:00		
Equipment	Preforming	4022	Filament Winding System	3:18:00		5,45
Equipment	General	40143	Scissor	0:04:00		
Equipment	Preparing, Pre	40232	Motor for Prepreg plastics during Winding	3:18:00		0,16
Molds	Preparing, Pre	5070	HAP mold		1	30
Core_Material	Preforming	10057	PVDF (m²)		0,0182	
Supplies	General	9012	Gloves (Pair)		8	
Supplies	Preparing, Pre	9015	Peel ply (m²)		2,915	

Technical Support

DLR-FA-FVT , Braunschweig
Ali Al-Lami
ali.al-lami@dlr.de
www.dlr.de

Also, refer to sheet "Instructions"

Abbildung B.1: Prozessdaten des Teilschritts Vorformen im Fertigungsprozess



Project: HAP
Status: on-going
Date: 30.03.2022
Recorded by: Lucas Seifert
Site: BS
Component/Product: HSVK-WKZB-PmP
Unit Process: 15_Curing
Comments: Measurement

Category	Sub-proces	ID-No	Factor	Time	Amount	Energy
Time	General	1001	Process Time	5:35:00		
Labor	General	2001	MTB (Category 3 – E2-E8)	0:05:00	1,00	
Labor	General	2002	Sc. MA (Category 2 – E9-E12)			
Labor	General	2003	Project leader (Category 1 – E13-E15U)			
Labor	General	2004	Student (Category 4 –HiWi)			
Facilities	General	3001	Laboratory, air-conditioned	5:35:00	138,28	
Facilities	General	3002	Laboratory, not air-conditioned			
Equipment	Tempering	4011	Autoclave, large	5:30:00		227,97
Equipment	Preforming	4034	Air Pressure Vacuum Pump	5:35:00		0,44
Equipment	General	40266	Vacuum connection	5:35:00		

Technical Support

DLR-FA-FVT , Braunschweig
Ali Al-Lami
ali.al-lami@dlr.de
www.dlr.de

Also, refer to sheet "Instructions"

Abbildung B.2: Prozessdaten des Teilschritts Aushärten im Fertigungsprozess

Project: HAP
Status: on-going
Date: 03.05.2022
Recorded by: Lucas Seifert
Site: BS
Component/Product: PmP-06
Unit Process: 12_Mechanische_Vorarbeit
Comments: Measurements + Estimation

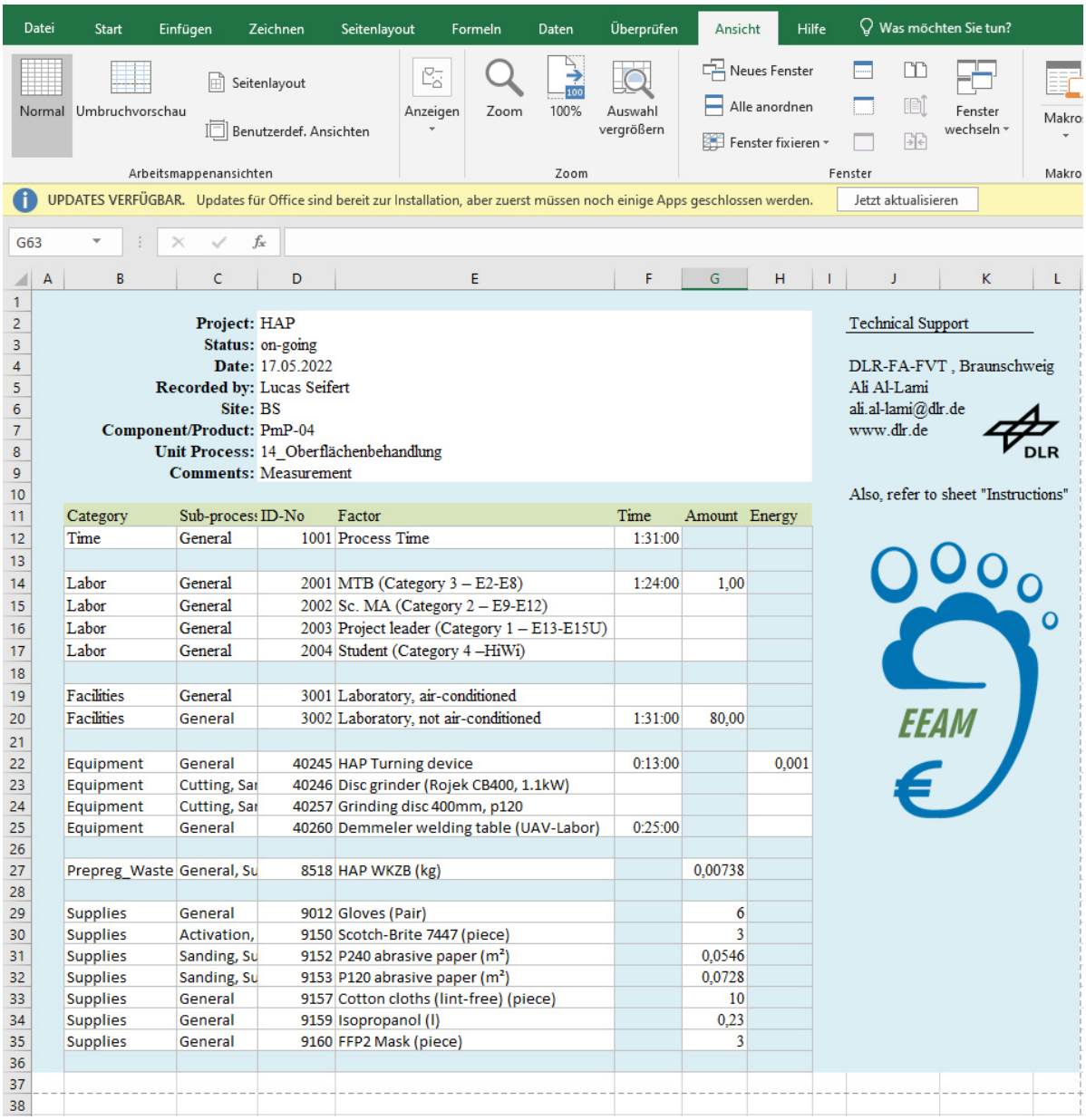
Technical Support

DLR-FA-FVT , Braunschweig
Ali Al-Lami
ali.al-lami@dlr.de
www.dlr.de

Also, refer to sheet "Instructions"

Category	Sub-process	ID-No	Factor	Time	Amount	Energy
Time	General	1001	Process Time	1:19:00		
Labor	General	2001	MTB (Category 3 – E2-E8)	1:19:00	1,00	
Labor	General	2002	Sc. MA (Category 2 – E9-E12)			
Labor	General	2003	Project leader (Category 1 – E13-E15U)			
Labor	General	2004	Student (Category 4 –HiWi)			
Facilities	General	3001	Laboratory, air-conditioned	0:06:00	42,00	
Facilities	General	3002	Laboratory, not air-conditioned	1:13:00	80,00	
Equipment	Preparing, P	4014	Tool trolley incl. Standard tools	0:12:00		
Equipment	General	40237	Edding (white, acryl)	0:00:12		
Equipment	Cutting, Me	40243	Milling spindle (Jäger Z42-M1620 S5)	0:40:00		0,042
Equipment	Cutting, Me	40244	Milling cutter (piece)	0:40:00		
Equipment	General	40245	HAP Turning device	0:59:00		0,001
Equipment	Cutting, San	40246	Disc grinder (Rojek CB400, 1.1kW)	0:04:00		0,073
Equipment	Cutting, Me	40247	Diamond saw band	0:04:00		
Equipment	Cutting, Me	40248	Band saw (RECORD POWER BS300E, 750W)	0:04:00		0,050
Equipment	Cutting, Me	40250	Saw Altendorf F45	0:04:00		0,366
Equipment	General	40251	Suction system (Alsident Sagitta)	0:59:00		0,360
Equipment	Cutting, Me	40252	Diamond Cutting Disc (F45)	0:04:00		
Equipment	General	40254	Vacuum cleaner (kärcher nt65, 2760W)	0:47:00		2,162
Equipment	General	40255	Aluminium ruler	0:51:00		
Equipment	Cutting	40256	Wooden Form (disc grinder)	0:10:00		
Equipment	Cutting, San	40257	Grinding disc 400mm, p120	0:04:00		
Equipment	General	40260	Demmeler welding table (UAV-Labor)	0:59:00		
Prepreg	Cutting	8017	HAP WKZB (kg)		0,4866	
Resin_Waste	Joining, Cut	7554	Resin, L385 (kg)		0,0010	
Resin_Waste	Joining, Cut	7555	Hardener, H385 (kg)		0,0004	
Prepreg_Waste	General, Su	8518	HAP WKZB (kg)		0,4146	
Core_Material_Waste	Joining, Cut	10556	Adhesive: Loctite EA 9394 AERO (l)		0,00607	
Supplies	Preparing, C	9007	Cleaning tissue (Piece)		1	
Supplies	Preparing, C	9027	Water (L)		0,3	
Supplies	General	9155	Cable Tie		6	

Abbildung B.3: Prozessdaten des Teilschritts mechanische Vorarbeit im Montageprozess



Project: HAP
Status: on-going
Date: 17.05.2022
Recorded by: Lucas Seifert
Site: BS
Component/Product: PmP-04
Unit Process: 14_Oberflächenbehandlung
Comments: Measurement

Category	Sub-process	ID-No	Factor	Time	Amount	Energy
Time	General	1001	Process Time	1:31:00		
Labor	General	2001	MTB (Category 3 – E2-E8)	1:24:00	1,00	
Labor	General	2002	Sc. MA (Category 2 – E9-E12)			
Labor	General	2003	Project leader (Category 1 – E13-E15U)			
Labor	General	2004	Student (Category 4 –HiWi)			
Facilities	General	3001	Laboratory, air-conditioned			
Facilities	General	3002	Laboratory, not air-conditioned	1:31:00	80,00	
Equipment	General	40245	HAP Turning device	0:13:00		0,001
Equipment	Cutting, Sa	40246	Disc grinder (Rojek CB400, 1.1kW)			
Equipment	Cutting, Sa	40257	Grinding disc 400mm, p120			
Equipment	General	40260	Demmeler welding table (UAV-Labor)	0:25:00		
Prepreg_Waste	General, Su	8518	HAP WKZB (kg)		0,00738	
Supplies	General	9012	Gloves (Pair)		6	
Supplies	Activation,	9150	Scotch-Brite 7447 (piece)		3	
Supplies	Sanding, Su	9152	P240 abrasive paper (m²)		0,0546	
Supplies	Sanding, Su	9153	P120 abrasive paper (m²)		0,0728	
Supplies	General	9157	Cotton cloths (lint-free) (piece)		10	
Supplies	General	9159	Isopropanol (l)		0,23	
Supplies	General	9160	FFP2 Mask (piece)		3	

Technical Support

DLR-FA-FVT , Braunschweig
Ali Al-Lami
ali.al-lami@dlr.de
www.dlr.de

Also, refer to sheet "Instructions"

Abbildung B.4: Prozessdaten des Teilschritts Oberflächenbehandlung im Montageprozess