

RESSOURCENEFFIZIENZ VON FERTIGUNGSVERFAHREN FÜR
FASERVERBUNDWERKSTOFFE

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von: Dipl.-Ing. Philipp Hilmer

aus: Northeim

eingereicht am: 27.02.2015

mündliche Prüfung am: 24.07.2015

Gutachter:

Prof. Dr.-Ing. Michael Sinapius

Prof. Dr.-Ing. Christoph Herrmann

“Life is like riding a bicycle. To keep your balance, you must keep moving.”

Albert Einstein

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in den Jahren 2007 bis 2015 am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) in Braunschweig.

Prof. Michael Sinapius, als Erstgutachter und Doktorvater gilt mein herzlicher Dank für seine stete Unterstützung und seine Begeisterung für das Thema Nachhaltigkeit und Ressourceneffizienz.

Prof. Christoph Herrmann möchte ich für die anregenden Diskussionen und Ideen sowie die Übernahme der Rolle des Zweitgutachters danken.

Überdies danke ich meinem Abteilungsleiter Dr. Markus Kleineberg, der es mir ermöglichte meine Arbeit frei zu gestalten und mit vielen kontroversen Diskussionen zur jetzigen Form dieser Arbeit beigetragen hat.

Mein Dank gilt zudem den Kolleginnen und Kollegen hier in Braunschweig: Mark Opitz, Dr. Maksim Danilov, Birgit Wieland, Martin Friedrich und Wolfgang Hagedorn für ihre Unterstützung. Zudem geht mein Dank an all jene Kollegen, insbesondere Wibke Exner, Mark Opitz, Christine Arlt und Martin Friedrich, durch die diese gemeinsame Zeit immer auch mit viel Spaß und Freude verbunden war.

Ein ganz elementarer Teil der praktischen Arbeiten wie auch die Erarbeitung theoretischer Hintergründe wurde von Studenten bewerkstelligt. Für all die zahlreichen Prozessaufnahmen, Programmierarbeiten und Unterstützung bei der Modellbildung, die das Identifizieren von Zusammenhängen und Wirkprinzipien erst ermöglichten, möchte ich mich bei Ali Al-Lami, Jan Denkhaus und Alexander Wille bedanken.

Von ganzem Herzen danke ich meinen lieben Eltern. Sie haben mich stets bestärkt und unterstützt und meine häufige „Zurückhaltung“ bei familiären Treffen mit einem Lächeln erduldet. Danke für Euer Verständnis und Eure Liebe. Diese Arbeit möchte ich Ihnen, sowie einem ganz besonderen Menschen, meiner Frau Anja, widmen. Ohne ihre Liebe und Unterstützung wäre diese Arbeit nicht zu dem geworden, was sie ist. Sie hat mich immer wieder gestützt, inspiriert und ermutigt meinen Weg zu gehen. Dafür, liebe Anja, möchte ich Dir aus tiefstem Herzen danken.

Abschließend danke ich allen ungenannt unterstützend wirkenden Freunden und meiner Familie für die aufgebrauchte Geduld und das Vertrauen.

Braunschweig, 2015

Philipp Hilmer

Inhalt

Inhalt	VI
Abkürzungen	IX
1 Einleitung.....	1
2 Etablierte Methoden zur ökologischen Bewertung von Faserverbundwerkstoffen.....	7
2.1 Methoden zur ökologischen Bewertung von Produkten und Prozessen.....	12
2.1.1 Kommerzielle Software-Tools zur Ökobilanzierung	14
2.2 Systemgrenzen	16
2.3 Diskretisierung von Fertigungsprozessen.....	21
2.4 Datenerhebung	23
2.5 Faserverbundwerkstoffe.....	25
2.5.1 Faserverbundfertigungsprozesse	35
2.5.2 Thermische Prozesse in der Faserverbundfertigung / Energiebilanz	39
3 Sind etablierte Methoden auf die Bewertung von Fertigungsprozessen für Faserverbundwerkstoffe anwendbar?	41
3.1 Effizienzbewertung von Fertigungsprozessen.....	41
3.2 Ökoeffizienz von Faserverbundwerkstoffen	43
3.3 Handlungsbedarf.....	46
4 Ein Effizienzkriterium für Faserverbundfertigungsprozesse.....	47
5 Bilanzierung von Faserverbundfertigungsprozessen.....	53
5.1 Prozessdokumentation.....	57
5.1.1 Prozessdokumentation mittels Thermographie.....	61
5.2 Prozessaufnahme der Fertigung von L-Winkeln aus CFK im RTM-Verfahren	63
5.2.1 Prozessaufnahme der L-Winkel-Fertigung im RTM-Verfahren	66
5.3 Modellbildung	82
5.4 Validierung des Modells.....	85
5.4.1 L-Winkel-Fertigung mit RTM-Verfahren und teilautomatisiertem Preform-Prozess.....	85
5.4.2 L-Winkel-Fertigung im DP-RTM-Verfahren	87

5.4.3	L-Winkel-Fertigung im Prepreg-Verfahren.....	88
5.4.4	Fertigung von zwei Flügelrippen.....	89
6	Vergleich der Fertigungsprozesse	92
6.1	Prozessbewertung mit Hilfe des Effizienzkriteriums	95
7	Fazit.....	104
8	Ausblick	108
9	Literaturverzeichnis.....	109

Abkürzungen

CAD	Computer-Aided Design (rechnerunterstütztes Konstruieren)
DfE	Design for Environment
DLR	Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt e.V.
DP-RTM	Differential Pressure Resin Transfer Moulding
EOL	End-of-Life (Lebensende)
FKK	Faserverbundkunststoff
FWZ	Formwerkzeug
ifeu	Institut für Energie- und Umweltforschung Heidelberg GmbH
ifu	Institut für Umweltinformatik Hamburg
IR	Infrarot
KPI	Key Performance Indicator (Leistungskennzahlen)
LCA	Life Cycle Assessment
LCI	Life Cycle Inventory
LOCOMACHS	<u>L</u> ow <u>C</u> ost <u>M</u> anufacturing and <u>A</u> ssembly of <u>C</u> omposite and <u>H</u> ybrid <u>S</u> tructures
P4	Programmable Powdered Preforming Process
RHB	Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe
RTM	Resin Transfer Moulding (Harzinfusionsverfahren)
SLI	Single Line Injection (Injektionsverfahren mit nur einer Zuleitung)
SMC	Sheet-Moulding-Compound (Tiefziehverfahren von faserverstärkten Thermoplastblechen)
TGA	Technische Gebäudeausrüstung
VDMA	Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau
WCED	World Commission on Environment and Development (Weltkommission für Umwelt und Entwicklung)

1 Einleitung

Wohlstand und Aufstieg der führenden Industrienationen des letzten Jahrhunderts, wie Großbritannien, Deutschland, die USA oder zuletzt Japan waren immer unmittelbar mit der industriellen Produktion von Waren verbunden. Dies gilt aktuell im selben Maße für aufsteigende Industrieländer wie China, Indien oder Brasilien. Meist ist solch eine Wandlung nicht nur mit der Transformation von einer Agrarnation in eine Industrienation verbunden, sondern es ändert sich gleichzeitig auch die Lebensweise der dort lebenden Menschen sowie deren Umgang mit der Umwelt (Gutowski, et al., 2013).

Während in den führenden Industrienationen des 20.ten Jahrhunderts (s.o.) die CO₂-Ausstöße bezogen auf den weltweiten Gesamtausstoß einen rückläufigen Trend zeigen, steigen die Emissionen der aufstrebenden Industrienationen relativ stark an (siehe Abbildung 1).

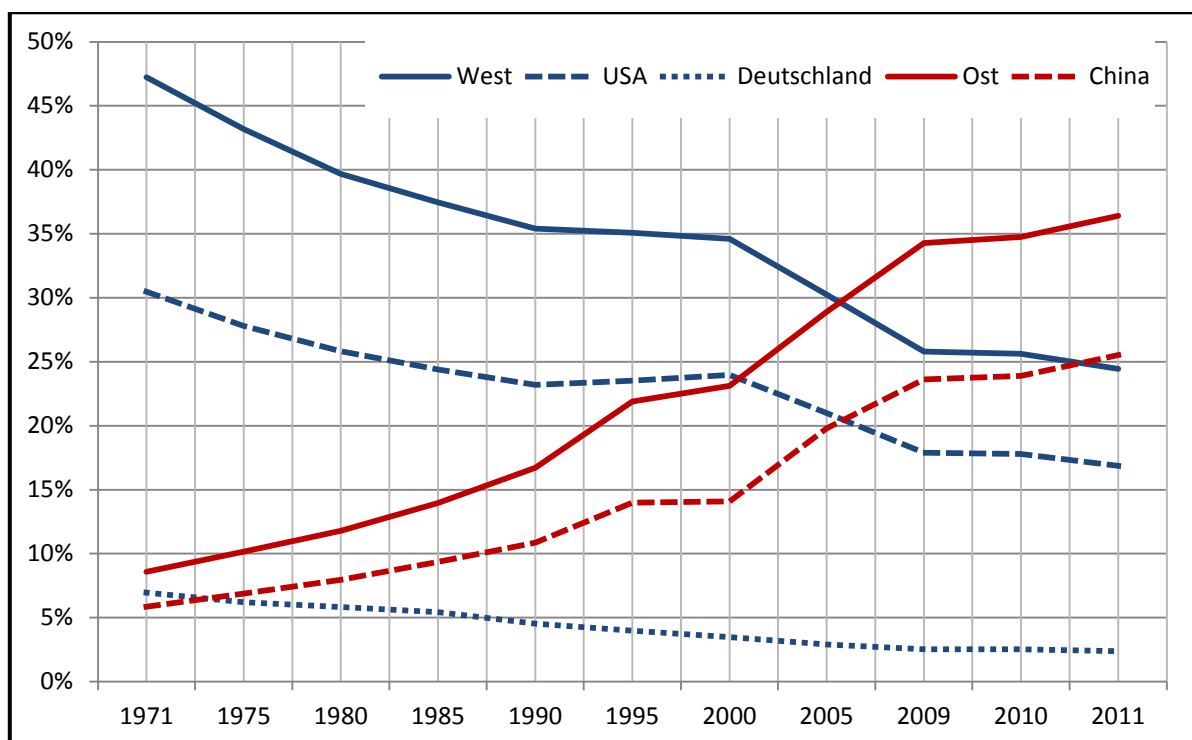


Abbildung 1: CO₂-Emissionen aus der Produktion (inklusive direkter Emissionen und Kontingenten für Wärme, Elektrizität und Anlagennutzung) prozentual zu den weltweiten Gesamt-CO₂-Emissionen für den Westen (Deutschland, Großbritannien, USA, Japan) und den Osten (China, Indien, Indonesien, Thailand, Südkorea, Brasilien), mit China, den USA und Deutschland separat dargestellt. (International Energy Agency, 2013)

Dies ist insbesondere eine Folge des Abbaus von Schwerindustrie, wie Eisen, Stahl, Zement oder Chemie, in den Industrienationen bei gleichzeitigem Aufbau dieser Industrien in den Schwellenländern (Gutowski, et al., 2013).

Die 1992 in Rio abgehaltene Klimarahmenkonvention verankert völkerrechtlich verbindlich das Ziel, „die Stabilisierung der Treibhausgaskonzentrationen in der Atmosphäre auf einem Niveau zu erreichen, auf dem eine gefährliche anthropogene Störung des Klimasystems verhindert wird“ (Vereinte Nationen, 1992). Zusätzlich wurden 1997 durch das Kyoto Protokoll erstmals verbindliche Zielwerte für die Emission von Treibhausgasen in den Industrieländern festgelegt (United Nations, 1998). Industrieller Fortschritt und das Erreichen höherer Lebensstandards haben in den Schwellenländern jedoch Vorrang, die das Erreichen dieser Ziele unter Berücksichtigung ökologischer Einflüsse oftmals in den Hintergrund treten lassen. Als Beispiel für eine solche Nichtbeachtung ökologischer Einflüsse einer wachsenden Industrie kann hier die dramatische Verkürzung der Lebenserwartung der Stadtbevölkerung während der Industrialisierung Großbritanniens aufgeführt werden, die auf die enorme Luftverschmutzung durch die Verbrennung von Kohle zurückgeführt werden kann (Freese, 2003). An dieser Stelle sind wiederum die Industrienationen gefragt, die als Vorreiter in der Technologientwicklung eine nachhaltige Entwicklung in den Schwellenländern durch die Bereitstellung ressourcenschonender Produktionsverfahren vorantreiben können. Den Produktionsverfahren kommt eine besondere Bedeutung zu, da sie zum einen Motor für die volkswirtschaftliche Entwicklung eines Landes darstellen (Dufloy, et al., 2012), zum anderen auch Ressourcen verbrauchen, die es grundsätzlich zu schonen gilt. Dies betrifft sowohl die jeweiligen lokalen Märkte als auch den globalen Markt, der mit den lokalen Märkten über den Austausch von Rohstoffen, Energie und Produkten verknüpft ist. Aufgrund des steigenden Verlangens nach Mobilität und Energie in den aufstrebenden Industrienationen kommt diesen Bereichen besondere Bedeutung zu. Um Mobilität und Energie zukünftig sicherzustellen, ist die Herstellung der dafür notwendigen Produkte, im Wesentlichen Automobile, Bahnen und Flugzeuge, sowie z.B. Windenergieanlagen, mit den zugehörigen Produktionsverfahren notwendig. Deswegen sollte insbesondere im Bereich Mobilität frühzeitig angesetzt werden, um ressourcenintensive Produkte und Produktionsverfahren in den neuen Industrienationen der Erde gar nicht erst zu etablieren. So gibt die Europäische Kommission das Ziel für Europa vor bis zum Jahr 2050 eine Reduktion des CO₂-Verbrauchs um 75% pro Passagierkilometer zu erreichen (European Commission, 2011). Herstellungsprozesse von Produkten sind nach Dufloy et al. für einen wesentlichen Anteil der ökologischen Auswirkungen, eines Produktes verantwortlich und dennoch hinsichtlich ihres ökologischen Fußabdruckes nur mangelhaft dokumentiert (Dufloy, et al., 2011). Leichtbauwerkstoffe und ihre Produktionsprozesse spielen eine besondere Rolle, da Leichtbaukomponenten die Möglichkeit bieten Ressourcen während ihrer Nutzungsphase einzusparen. Die zugehörigen Produktionsprozesse und ihre ökologischen Auswirkungen dürfen jedoch nicht unterschlagen werden.

Die zunehmende Nachfrage nach Leichtbauwerkstoffen in den Bereichen Luftfahrt, Verkehr und Energie erfordert mit steigenden Stückzahlen immer häufiger eine Abschätzung des Umwelteinflusses von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen, die aufzeigt, dass Ressourcen sowohl in der Produktions- als auch in der Nutzungsphase geschont werden. Faserverbundwerkstoffe bieten neben ihrem geringen spezifischen Gewicht und hoher Korrosionsbeständigkeit vor allem die Möglichkeit aus ihnen hochintegrale Bauteile großer Komplexität herzustellen. Dies ermöglicht enorme Gewichtseinsparungen, bedeutet aber im Falle eines Schadens oftmals den Austausch großer Komponenten, die mit hohen ökologischen und ökonomischen Aufwänden verbunden sein können. Die ökologischen Aufwände, die in der Produktion solcher Komponenten anfallen, bzw. die Ressourcen, die in einer solchen Komponente enthalten sind, sind heutzutage noch nicht detailliert dargestellt. Vielmehr wird der Fokus bei der Bewertung von Leichtbauprodukten auf den Zeitraum der Produktnutzung gelegt, da z.B. im Flugzeugbau ein eingespartes Kilogramm bei einer Betriebsdauer von 60.000 Stunden eine Reduktion des Kerosinverbrauchs von etwa 3 Tonnen ermöglicht (Lässig, et al., 2012), bzw. im Automobilbau 0,005 l/100 km (Kulekci, 2008). Für ein Automobil bedeutet dies eine Reduktion des Treibstoffverbrauchs um bis zu 0,01 l/km in der Nutzungsphase (Helms, et al., 2006).

Wie in Abbildung 2 dargestellt lässt sich der Lebenszyklus eines Produktes allgemein in vier Phasen einteilen.

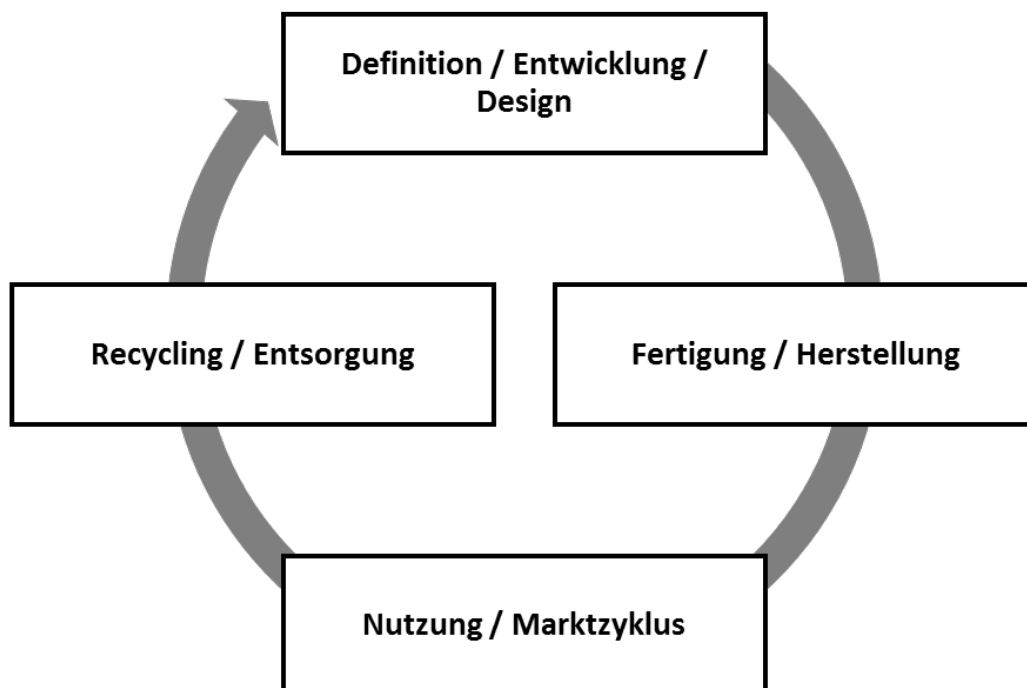


Abbildung 2: Komponenten des relevanten Betrachtungszeitraums in Produktlebenszykluskonzepten, nach (Kemminer, 1999)

Die Entwicklungsphase korreliert bei Strukturbauteilen unmittelbar mit der Nutzungsphase. Design und strukturelle Auslegung definieren das Produktgewicht und damit das Potential des Produktes Energie, z.B. Brennstoff, während seiner Nutzungsphase einzusparen.

Die Recycling-/Entsorgungsphase von Faserverbundkomponenten, auch Lebensende (engl. End-of-Life (EOL)) genannt, ist ein Bereich, der bislang keine zufriedenstellende Lösung bietet. Der Verbund von Fasern und Matrixwerkstoff kann nicht getrennt werden ohne eine Beeinflussung der Materialeigenschaften hervorzurufen. Beispielsweise können aktuell aus sogenannten endlosfaserverstärkten Kunststoffen lediglich Kurzfasern zurückgewonnen werden, deren mechanische Eigenschaften nicht an jene des Ausgangsmaterials heranreichen. Dieses Feld bietet heute noch vielfältige Möglichkeiten für Innovationen, da die Möglichkeiten der Entsorgung, oder gar des Recyclings, bei diesen Werkstoffen noch lange nicht ausgeschöpft sind (Adams, et al., 2014 S. 263-284).

Wenig beachtet bleibt bisher der Abschnitt der Herstellung von Bauteilen aus Faserverbundkunststoff (FVK). Diese Phase des Produktlebenszyklus wird im Hinblick auf den effizienten Umgang mit den eingesetzten Ressourcen bislang kaum betrachtet, da die offensichtlichen Vorteile in der Nutzungsphase durch den Gewichtsvorteil der Produkte als Argument für Faserverbundwerkstoffe vollkommen ausreichend scheinen. Effizienzbetrachtungen von Fertigungsprozessen bei Faserverbundwerkstoffen beschränken sich, wenn überhaupt vorhanden, meist auf die Nutzung nachhaltig produzierter Energien für die eingesetzten thermische Prozesse, oder die Rückgewinnung im Prozess freiwerdender Energien. Die Betrachtung der Ressourcenflüsse in der Faserverbundfertigung ist meist auf einzelne Arten von Ressourcen (Stoffe, Energie) begrenzt.

Diese Arbeit setzt an diesem Punkt an und zeigt auf, welche der vielfältigen Ressourcen, die zur Bauteilherstellung aus Faserverbundwerkstoff benötigt werden, am Ende tatsächlich im Bauteil verbleiben, und welche an der Wertschöpfung zwar teilhaben, aber im Hinblick auf einen effizienten Umgang mit den verfügbaren Ressourcen minimiert werden können. Es wird ein Werkzeug vorgeschlagen, in Form einer Systematik für die Prozessaufnahme und -analyse, sowie eines Software-Tools für die anschließende Berechnung, mit dem die Effizienz von Faserverbundfertigungsprozessen ermittelt werden kann. Das Ergebnis ist ein Effizienzkriterium. Es kann beispielsweise für einen Fertigungsplaner als Entscheidungshilfe dienen die ökologisch und ökonomisch effizienteste Prozessvariante für die Herstellung eines bestimmten Bauteils zu ermitteln. Genauso kann es auch als eine Entscheidungshilfe für die Abschätzung des Einflusses neuer Technologien auf die Effizienz von Fertigungsprozessketten dienen. So kann frühzeitig eingeschätzt werden, ob eine Innovation die Bilanz, ökologisch und ökonomisch, positiv beeinflussen kann oder nicht.

Kapitel 1: Einleitung

Kapitel 2: Stand der Technik: Etablierte Methoden zur ökologischen Bewertung von Faserverbundwerkstoffen

Kapitel 3: Stand der Forschung: Sind etablierte Methoden auf die Bewertung von Fertigungsprozessen für Faserverbundwerkstoffe anwendbar? → Ableitung eines Handlungsbedarfes

Kapitel 4: Hypothese: Ein Effizienzkriterium für Faserverbundfertigungsprozesse

Kapitel 5: Bilanzierung von Faserverbundfertigungsprozessen

- **Prozessdokumentation**
- **Prozessaufnahme der Fertigung von L-Winkeln aus CFK im RTM-Verfahren**
- **Modellbildung**

Kapitel 6: Vergleich der Fertigungsprozesse

Kapitel 7: Fazit

Kapitel 8: Ausblick

Abbildung 3: Struktogramm der Arbeit

Wie in Abbildung 3 dargestellt, gliedert sich die vorliegende Arbeit in 8 Kapitel.

Kapitel 1 leitet zum Thema hin und erläutert die Motivation sich mit der Untersuchung und Bewertung von Faserverbundfertigungsprozessen hinsichtlich ihrer ökologischen Eigenschaften zu widmen.

Kapitel 2 stellt den Stand der Forschung dar. Es werden etablierte Methoden zur ökologischen Bewertung im Allgemeinen und im Speziellen von Prozessketten erläutert. Darüber hinaus beschäftigt sich dieses Kapitel mit den Systemgrenzen der zu untersuchenden Prozesse und gibt eine Übersicht über Faserverbundwerkstoffe und ihre Herstellungsprozesse.

Kapitel 3 zeigt den Stand der Forschung, insbesondere die Effizienzbewertung von Fertigungsprozessen und bisherige Arbeiten zur ökologischen Bewertung von Faserverbundstrukturen und ihren Produktionsprozessen. Auf Basis dieser Untersuchung wird ein Handlungsbedarf abgeleitet.

Kapitel 4 schlägt ein Kriterium vor, dass die Bewertung von Fertigungsprozessen für Faserverbundwerkstoffe untereinander hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz ermöglichen soll.

Kapitel 5 stellt eine neuartige Methode zur Dokumentation von Fertigungsprozessen vor und wendet diese anschließend an, um verschiedene Prozesse aufzuzeichnen. Ein Modellierungsansatz zur Abbildung von Faserverbundfertigungsprozessen wird aufgezeigt, der in dieser Arbeit für die Modellierung der Prozesse und für die Verarbeitung der dokumentierten Prozessdaten verwendet wurde.

Kapitel 6 vergleicht die untersuchten Fertigungsprozesse und bietet Erklärungsansätze für die unterschiedlichen Ergebnisse.

Kapitel 7 zieht ein Fazit hinsichtlich der verwendeten Verfahren und Methoden bezüglich ihrer Anwendbarkeit und der Qualität der erzeugten Ergebnisse, sowie der Eignung des eingeführten Kriteriums zur Bewertung von Faserverbundfertigungsprozessen.

Kapitel 8 gibt schließlich einen Ausblick in Hinblick auf Potentiale zur Weiterentwicklung der gezeigten Methoden und Verfahren.

2 Etablierte Methoden zur ökologischen Bewertung von Faserverbundwerkstoffen

Der Begriff Nachhaltigkeit, oder Nachhaltige Entwicklung, erlangte durch einen Report der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung (WCED) im Jahre 1987 Aufmerksamkeit, der als „Brundtland-Bericht“ bekannt wurde. Die WCED veröffentlichte den Bericht „Our Common Future“, in dem erstmals umfassend das Konzept der nachhaltigen Entwicklung formuliert und definiert wurde und damit den Anstoß für einen weltweiten Diskurs und öffentliche Aufmerksamkeit für das Thema Nachhaltigkeit gab. Die deutsche Version, „Unsere gemeinsame Zukunft“, wurde vom damaligen deutschen Forschungsminister Volker Hauff herausgegeben, der Mitglied der Kommission war.

Von der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung wurde nachhaltige Entwicklung wie folgt definiert:

„Sustainable development meets the needs of the present without compromising the ability of future generations to meet their own needs“ (Brundtland, et al., 1987).

Nachhaltig ist eine Entwicklung, die den Bedürfnissen der heutigen Generation entspricht, ohne die Möglichkeiten künftiger Generationen zu gefährden, ihre eigenen Bedürfnisse zu befriedigen und ihren Lebensstil zu wählen (Hauff, 1987).

Im ökologischen Gebrauch bedeutet Nachhaltigkeit, natürliche Ressourcen nur in dem Ausmaß zu nutzen wie ein Nachwachsen möglich ist. Demzufolge kann nur nachhaltig genutzt werden was nachwächst (Brickwedde, 2010). Dies knüpft eine direkte Verbindung des Nachhaltigkeitsbegriffes zur Produktion, da die Herstellung von Produkten Ressourcen verbraucht. Dieser Verbrauch von Ressourcen darf dem Prinzip der ökologischen Nachhaltigkeit entsprechend niemals größer sein als ihr Nachwachsen möglich ist. Alternativ zum Nachwachsen können auch die in Produkten gebundenen Ressourcen nach dem Ende der Produktnutzungsphase dem Produktlebenszyklus wieder zur Verfügung gestellt werden. Das Recycling von Produkten schließt den Kreislauf der Ressourcen.

Unternehmerisch unterscheidet man drei Nachhaltigkeitsstrategien: Effizienz, Konsistenz und Suffizienz (Schaltegger, et al., 2003) (Huber, 1995).

Die **Effizienzstrategie** ist am weitesten verbreitet. Die Entkoppelung von Wirtschaftsleistung und Umweltverbrauch steht hierbei im Vordergrund. Die Rationalisierung der Stoffumsätze führt zu einer Steigerung der Ressourcenproduktivität, die in ökologischer und ökonomischer Hinsicht

vorteilhaft ist (Huber, 2000). Es ist die dominierende Strategie, die vor allem auf technischen Fortschritt setzt. Die Reduzierung des Energie- und Materialverbrauchs in der Fertigung ist nur ein Beispiel hierfür. Die Grenzen dieser Strategie liegen im sogenannten Rebound-Effekt der auch als Jevons' Paradoxon (Jevons, 1905) bekannt ist.

Die **Konsistenzstrategie** ist auf die Kreislaufführung von Stoffen und Energie fokussiert und hat somit das Schließen des materiellen und energetischen Durchflusses der Wirtschaftsprozesse zum Ziel. Konsistenz meint hier die Konsistenz mit natürlichen Stoffkreisläufen. Die Nutzung von Abwärme und die Wiederverwendung von Brauchwasser sind prominente Beispiele aus dem Bereich der Produktion. Die Einrichtung kompletter Stoffkreisläufe bis hin zu dem, was als industrielle Symbiose bezeichnet wird, geht dabei deutlich weiter. Eine Konsistenzstrategie macht nicht nur technische Veränderungen notwendig, sondern erfordert große organisatorische Änderungen bei Design, Produktion, Distribution und Redistribution von Produkten (Huber, 1995).

Schließlich ist die **Suffizienzstrategie** zu nennen, die vielleicht unbequemste Strategie von allen. Eine Suffizienzstrategie zielt auf ein verändertes Nutzungsverhalten und auf eine Änderung der Bedürfnisse von Nutzern ab, seien es nun Endkunden oder Unternehmenskunden. So gibt es aktuell Bewegungen, bei denen Menschen bewusst auf den Besitz großer Mengen von Produkten verzichten und sich selbst den Besitz von z.B. maximal 100 Gegenständen erlauben (Bruno, 2010). Besitz wird dabei oft als Bürde oder Belastung empfunden. Einen ähnlichen Hintergrund haben Plattformen, mit deren Hilfe Menschen Güter teilen. „Car-Sharing“ ist sicher eines der prominentesten und am stärksten professionalisierten Beispiele hierfür. Internet-Plattformen, wie „Why-Own-It?“ zielen in dieselbe Richtung, wenn man sich die Bohrmaschine des Nachbarn ausleiht und dieser im Gegenzug beispielsweise das eigene Fahrrad nutzen kann (Gloeckler, 2012). Jedoch wird auch der Suffizienzstrategie angelastet, ähnlich der Effizienzstrategie, einen Rebound-Effekt zu haben. Durch den bewussten Verzicht reicher Länder auf gewisse Konsumgüter, würden deren Preise fallen, was zu einem Anstieg der Nachfrage durch andere führen kann (Alcott, 2008).

Diese Arbeit fokussiert trotz des möglichen genannten Rebound-Effektes auf die Effizienz, genauer die Ressourceneffizienz, von Fertigungsprozessen für Bauteile aus Faserverbundwerkstoffen. Die betrachteten Werkstoffe lassen sich den Kunststoffen zuordnen, die nach Gutowski et al. neben Stahl und Eisen einen wesentlichen Anteil am weltweiten Energieverbrauch und den CO₂-Emissionen haben (Gutowski, et al., 2013). Deswegen ist es erstrebenswert, durch die Bewertung der Effizienz von Fertigungsprozessen, Potentiale zur Steigerung des Ausnutzungsgrades der zugeführten Ressourcen, wie Materialien und Energie aufzudecken. Hinter dem Ansatz der Effizienz steht die Verringerung des Aufwandes pro

Nutzeneinheit, bzw. Produkt (Schmidt, et al., 2010). Durch den effizienten Einsatz von Ressourcen bei der Herstellung eines Produktes, kann das Produkt mit einem geringeren Einsatz dieser Ressourcen produziert werden.

Effizienz muss von Effektivität unterschieden werden. Während Effektivität meint die richtigen Dinge zur Erreichung eines Ziels zu tun, bedeutet Effizienz im ökologischen Sinne mit welchem Ressourcenaufwand diese Dinge getan werden. Nach Hilgers ist Effektivität ein qualitatives Maß, welches bewertet, ob Aktivitäten zu einem definierten Ziel beitragen (Hilgers, 2008). Effizienz hingegen kann quantitativ messen mit welchem Ressourcenaufwand ein angestrebtes Ziel erreicht wird (Braz, et al., 2011).

Man kann mit einem Fertigungsprozess sehr effizient, das heißt mit geringem Ressourceneinsatz, ein Produkt herstellen, gleichzeitig jedoch nicht effektiv sein, wenn dieses Produkt nicht die zuvor definierten Anforderungen erfüllt (Abbildung 4). Indikatoren zur Effizienzbewertung setzen beispielsweise den erwarteten Ressourcenverbrauch mit den tatsächlich verbrauchten Ressourcen ins Verhältnis (Bellgran, et al., 2009). Diese Arbeit will nicht die Effektivität der Fertigungsprozesse von Faserverbundkomponenten beleuchten, und deren Sinnhaftigkeit beurteilen, sondern zielt ausschließlich auf die Bewertung ihrer Ökoeffizienz ab. In diesem Zusammenhang kann eine hohe Effizienz eines Faserverbundfertigungsprozesses letztlich zu Effektivität führen, indem ein umweltverträgliches Produkt, inklusive seiner ressourcenschonenden Herstellung, zu einem ökologisch verträglichen Produktes führt.

Effizienz	Effektivität
Die Dinge richtig tun	Die richtigen Dinge tun

Abbildung 4: Effizienz und Effektivität

Ökoeffizienz wurde bereits in verschiedenster Weise definiert und von vielen analytisch implementiert. Zumeist meint Ökoeffizienz eine ökologische Optimierung bei gleichzeitiger Berücksichtigung wirtschaftlicher Faktoren (von Weizäcker, et al., 1999). Ökoeffizienz drückt das Verhältnis ökonomischer Wertschöpfung gegenüber ökologischer Zerstörung aus (Hungerbühler, et al., 2013). Darüber hinaus wird oftmals auch die alleinige Verbesserung ökologischer Faktoren, z.B. die bessere Nutzung von Ressourcen durch effiziente Prozesse als verbesserte Ökoeffizienz bezeichnet, wenn gleichzeitig die Kosten konstant bleiben. Im Bereich des Produktdesigns bedeutet Ökoeffektivität, dass z.B. die Funktion eines Produktes mit geringerem ökologischem Aufwand erfüllt werden kann, als bei einer alternativen Gewährleistung dieser Funktionalität. Das Produkt steht hier im Hintergrund, während es auf die Bereitstellung der Funktion selbst ankommt. Ökoeffizienz hingegen betrachtet das Produkt,

dessen Ökoeffizienz durch den Einsatz umweltschonender Materialien, die Minimierung des Materialeinsatzes, reduzierten Energieverbrauch sowie minimierten Abfall verbessert werden kann. Entsprechend kann Ökoeffektivität als „die richtigen Dinge tun“ als Langzeitansatz gesehen werden, während Ökoeffizienz als „die Dinge richtig tun“ eher eine Kurzzeitperspektive darstellt. Beide Ansätze sollten simultan betrachtet werden (Jakobsen, 1999).

Der Begriff Ressourceneffizienz wird von Reinhardt anhand von drei Literaturquellen untersucht (Reinhardt, 2014). Die Europäische Kommission verwendet die Begriffe Ressourceneffizienz und Ressourcenproduktivität synonym und definiert sie als die Effizienz mit der Energie und Materialien in der Wirtschaft genutzt werden (Europäische Kommission, 2003). Es wird nur die Effizienz der Nutzung der Ressourcen berücksichtigt, ohne die Gewinnung der Ressourcen selbst zu betrachten. Rogall setzt ebenfalls Ressourceneffizienz und –Produktivität gleich (Rogall, 2008). Schütz & Bringezu hingegen unterscheiden beide Begriffe (Schütz, et al., 2008). Ressourceneffizienz wird allgemein auf das Verhältnis eines erwünschten Outputs eines Prozesses zu den damit verbunden Ressourcenaufwänden bezogen. Wenn der Output eine ökonomische Größe ist, z.B. Wertschöpfung, dann wird von Ressourcenproduktivität gesprochen.

Während früher die Maximierung des Gewinns bei gleichzeitiger Minimierung des eingesetzten Kapitals das oberste Ziel bei der Herstellung von Produkten war, gilt heutzutage eine neue Maxime. Der Output soll maximiert werden während simultan eine Minimierung des Ressourceneinsatzes angestrebt wird (Bogdanski, et al., 2012). Alternativ ist gleicher Output bei minimalem Input anzustreben.

Es ist wichtig wirtschaftliche Größen mit ökologischen Effizienzgrößen in Beziehung zu setzen. Bogdanski et al. erläutert, dass die Verbindung von energetischen Größen mit deren wirtschaftlichem Einfluss die Empfänger von Feedback-Informationen aus der Produktion in die Lage versetzt Kosten-Nutzen-Analysen durchzuführen, die zu einer Änderung des rational-ökologischen Verhaltens führen (Bogdanski, et al., 2012).

Eine Möglichkeit der integrierten Bewertung von ökonomischen und ökologischen Einflussfaktoren ist die Materialflusskostenrechnung (MFKR) als zentraler Bestandteil der Umweltkostenrechnung (UKR) (Loew, et al., 2003). Die MFKR ist nach DIN EN ISO 14051 als „Instrument für die mengenmäßige Erfassung der Materialflüsse und -Bestände in Prozessen oder Fertigungslinien sowohl in physikalischen als auch in monetären Einheiten“ definiert (DIN e.V., 2011). Nach Loew weisen insbesondere die Ansätze der Flusskostenrechnung, sowie deren vereinfachte Variante der Reststoffkostenrechnung, ein hohes Nutzenniveau auf (Loew, et al.,

2003). Beide Ansätze schaffen eine hohe Transparenz der Material- und Wertflüsse in der Produktion. Die Materialflusskostenrechnung hat damit als betriebliches Instrument hohe Bedeutung bezüglich der Identifikation von materialflussbezogenen Effizienzpotentialen. Die Senkung der betrieblichen Material- und Energieverbräuche und damit die Erhöhung der betrieblichen Materialeffizienz stellt dabei eine Strategie dar, um Ressourcen zu schonen und gleichzeitig Kosten sowie Abfälle und Emissionen zu reduzieren (Schrack, 2015). Schrack stellt in Ihrer Arbeit eine ökologische Erweiterung der Materialflusskostenrechnung durch deren Verknüpfung mit der Ökobilanz vor. Hauptmerkmale sind dabei zum einen der Schritt von einer Stoffdurchflusswirtschaft hin zu einer Stoffkreislaufwirtschaft, zum anderen die Integration von Umweltwirkungen in die MFKR (Schrack, 2015).

Keine Berücksichtigung findet in diesen Ansätzen die Anlagentechnik, es werden ausschließlich wiederkehrende Kosten, Material und Energie, betrachtet. Sowohl die Anlagentechnik, die für Reife und Wiederholgenauigkeit eines Faserverbundfertigungsprozesses steht, als auch die Personalkosten, die in vielen Branchen maßgeblicher Kostentreiber sind, werden nicht betrachtet.

Es wird angenommen, dass 80% des ökologischen Schadens bereits nach 20% der Design-Phase festgelegt sind (Otto, 200)(siehe auch Abbildung 5).

Eine der am häufigsten verwendeten Methoden, um die ökologischen Auswirkungen eines Produktes gering zu halten, ist das „Design for Environment“ (DfE), das die Auswirkungen von Entscheidungen in der Entwurfs- und Entwicklungsphase auf den Produktlebenszyklus betrachtet, und dabei Rohstoffgewinnung, Herstellung, Nutzungsphase und die Handhabung des Lebensendes eines Produktes berücksichtigt (Hauschild, 2004).

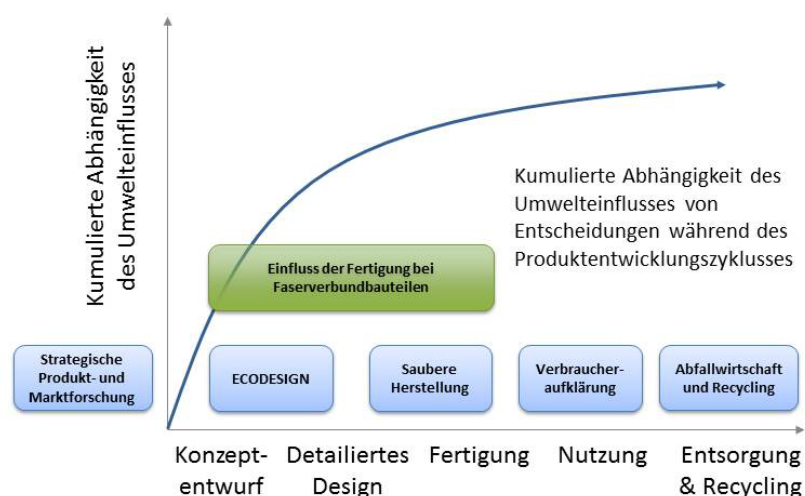


Abbildung 5: Konzeptuelle Darstellung der Abhängigkeit des ökologischen Einflusses von einzelnen Produktentwicklungsphasen nach Lewis (Lewis, et al., 2001)

Nach Abbildung 5 sind Fertigungsprozesse von Faserverbundkomponenten in die Phase „Saubere Herstellung“ eingeordnet. Dies bedeutet, dass eine Bewertung und Optimierung der Produktion nur einen verhältnismäßig geringen Einfluss auf die kumulierte Abhängigkeit des Umwelteinflusses von Entscheidungen während des Produktentwicklungszyklus hat. Jedoch muss an dieser Stelle die Besonderheit der Faserverbundwerkstoffe in Betracht gezogen werden, im Gegensatz zu metallischen Konstruktionsmaterialien sind Design und Herstellung unmittelbar verbunden. Werden in der Design-Phase gewisse mechanische oder geometrische Eigenschaften festgelegt hat das direkten Einfluss auf die Auswahl der für die Fertigung verfügbaren Produktionsverfahren. Die Vorteile der Faserverbundwerkstoffe sind in Produkten nur dann voll ausschöpfbar, wenn die Möglichkeiten und Grenzen der Fertigungsprozesse bereits im Design berücksichtigt werden (siehe Abbildung 5). Ein Beispiel dafür sind z.B. scharfe Bauteilkanten oder sehr enge Radien, die bei der Metallbearbeitung leicht durch Fräsen hergestellt werden können. Prinzipiell ist dies auch bei FVK möglich, aber die Zerstörung der lasttragenden Fasern durch spanende Bearbeitung steht im Widerspruch zu einem fasergerechten bzw. kraftflussgerechten Design von Faserverbundwerkstoffen. Daher wirkt die Fertigung von FVK zurück auf die Designphase, was die Bedeutung der Herstellphase für die Gesamtbilanz deutlich erhöht.

2.1 Methoden zur ökologischen Bewertung von Produkten und Prozessen

Methoden zur ökologischen Bewertung von Produkten und Prozessen wurden bereits in den 1980er Jahren entwickelt. Dazu gehört eine auf Immissions-schwellwerten basierende Methode (genannt „critical volumes approach“), die zuerst in der Schweiz entwickelt wurde. Weiterhin sind die Methode der kritischen Flüsse („critical flow method“) (Bern/Schweiz 1990), und die auswirkungsorientierte Bewertungsmethode (Leiden/NL 1992) zu nennen. Darüber hinaus die Umweltbilanzierungsmethode („EPS enviro-accounting method“). Außerdem wurden zwei qualitative Ansätze diskutiert: das ABC-Ranking (Deutschland 1992) und ein Ansatz mit dem Namen „handlungsorientierte Ökobilanz“ (Schweiz 1992), welche beide einen leicht unterschiedlichen Rahmen haben, aber oft als Alternativen zitiert werden (Hofstetter, et al., 1994).

Eine feste Definition des Vorgehens bei einer Ökobilanzierung (engl. LCA - Life Cycle Assessment) wurde erstmals 1997 in der DIN EN ISO 14040ff festgelegt, die die Vorgehensweise einer Ökobilanzierung bei Produkten und Prozessen festlegt.

Die Ökobilanz ist die systematische Analyse der Umweltwirkungen von Produkten, Verfahren oder Dienstleistungen während des gesamten Lebensweges („von der Wiege bis zur Bahre“). Dazu gehören sämtliche Umweltwirkungen während der Produktion, der Nutzungsphase und

der Entsorgung, sowie alle damit verbundenen vor- und nachgeschalteten Prozesse (wie z. B. die Herstellung der Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe (RHB)).

Das prinzipielle Vorgehen bei der Durchführung einer Ökobilanz kann wie folgt beschrieben werden:

- Die Stoff- und Energieströme eines Produktes werden entlang seines Lebensweges, also aller beteiligten Prozesse des Produktsystems, analysiert.
- Emissionen in Luft, Wasser und Boden sowie der Natur entnommene Ressourcen werden in der so genannten „Sachbilanz“ systematisch erfasst und abgelegt.
- Potenzielle Auswirkungen auf die Umwelt wie Treibhauseffekt, Luftverschmutzung, Ausstoß anderer umweltgefährlicher Stoffe etc. werden anschließend im Rahmen der „Wirkungsabschätzung“ ausgewertet (Deutsches Institut für Normung e.V., 2009).

Konkreter gliedert die DIN EN ISO 14040 eine Ökobilanz in vier Schritte:

1. Festlegung des Ziels und Untersuchungsrahmens

Im ersten Schritt der Ökobilanz werden das Ziel und der Untersuchungsrahmen festgelegt. Es werden z.B. die Systemgrenzen, die Funktion des Systems und die Anforderungen an die Datenqualität definiert.

2. Sachbilanz (engl. LCI – Life Cycle Inventory)

Ein großer Teil der praktischen Arbeit steckt in der Sachbilanz, die sowohl die Datensammlung der benötigten Inputs (Ressourcen, Vorprodukte) und Outputs (Emissionen, Abfälle) beinhaltet, als auch die Aufstellung einer Bilanz.

3. Wirkungsabschätzung (engl. Life Cycle Impact Assessment)

Mit Hilfe der Ergebnisse der Sachbilanz werden potenzielle Umweltwirkungen, Einflüsse auf die menschliche Gesundheit und die Ressourcenverfügbarkeit abgeschätzt, bzw. berechnet.

4. Auswertung

Die Ergebnisse der Sachbilanz und Wirkungsabschätzungen werden mit dem eingangs definierten Ziel der Ökobilanzstudie abgeglichen und interpretiert. (Deutsches Institut für Normung e.V., 2009)

Darüber hinaus beschreibt diese internationale Norm die Grundsätze und Rahmenbedingungen der Ökobilanz, einschließlich

- des Berichtes über die Ökobilanz und dessen kritische Prüfung;
- die Grenzen der Ökobilanz;
- die Beziehungen zwischen den Phasen einer Ökobilanz und
- die Bedingungen der Anwendung von Werthaltungen und optionalen Bestandteilen (Deutsches Institut für Normung e.V., 2009).

Diese Arbeit fokussiert auf die beiden ersten Schritte der DIN EN ISO 14040 und führt anschließend eine vereinfachte Wirkungsabschätzung durch. Zunächst wird ein Untersuchungsrahmen festgelegt, die Systemgrenzen werden definiert. Im Anschluss daran wird eine Sachbilanz (engl.: Life Cycle Inventory Analysis (LCI)) ausgewählter Faserverbundfertigungsprozesse aufgestellt, die miteinander verglichen werden sollen. Die Sachbilanz umfasst die Bestandsaufnahme von Input-/Outputdaten in Bezug auf das zu untersuchende System. Sie umfasst die Sammlung der Daten, die zum Erreichen der Ziele der festgelegten Studie notwendig sind (Deutsches Institut für Normung e.V., 2009).

Um die verschiedenen Herstellungsprozesse miteinander vergleichbar zu machen, werden die zuvor in der Sachbilanz wertfrei erhobenen Daten bezüglich ihrer Auswirkungen auf die Umwelt untersucht und bewertet (Herrmann, 2010 S. 154) (Dyckhoff, et al., 2008 S. 168). Zur Bewertung wird der Wirkungsindikator „Global Warming Potential“ aus der Wirkungskategorie Klimawandel verwendet, der die Sachbilanzdaten basierend auf Indikatormodellen und Gewichtungsfaktoren in CO₂-Äquivalenten darstellt (Walther, 2010).

2.1.1 Kommerzielle Software-Tools zur Ökobilanzierung

Für die Erstellung von Ökobilanzen sind weltweit diverse kommerzielle Softwarelösungen verfügbar. Die in Deutschland und Europa meistverwendeten werden im Folgenden kurz erläutert.

GaBi

Das Akronym „GaBi“ steht für „Ganzheitliche Bilanz“ und beschreibt ein Programm der Uni Stuttgart. Es ist das Ergebnis grundlegender Arbeiten zur Ökobilanzierung und berücksichtigt insbesondere die Anforderungen der Automobilindustrie, deren Zulieferer und Rohstoffproduzenten. Das Programm vereint Datenbank und Bilanzierungssoftware in sich (Klöpffer, 2009). Die Modellierung in der GaBi-Software basiert auf Prozessflüssen.

Umberto

Umberto ist eine Software, die vom Institut für Umweltinformatik in Hamburg (ifu) und dem Institut für Energie- und Umweltforschung in Heidelberg (ifeu) zusammen entwickelt wurde. Sie ist für Material-, Energie- und Stoffstromanalysen sowie Kostenrechnungen geeignet. Die verschiedenen Module ermöglichen von der einfach Berechnung von CO₂-Fußabdrücken, über eine vollständige Ökobilanzierung, bis hin zur Kombination von Ökobilanz und Kostenbetrachtung verschiedene Analysemethoden. Umberto nutzt standardmäßig die ecoinvent-Datenbank (siehe unten), kann aber auch andere Datenbanken integrieren (z.B. die GaBi-Datenbank) (Klöpffer, 2009).

Umberto basiert auf dem Konzept der sogenannten Stoffstromnetze, das sich aus der Petri-Netz-Theorie entwickelt hat. Der Vorteil der Stoffstromnetze besteht im Wesentlichen darin, dass sowohl Produktökobilanzen als auch betriebliche Ökobilanzen erstellt werden können (Möller, 1993). Sie basieren auf den sogenannten Petrinetzen, einem speziellen Netztyp aus der theoretischen Informatik, der mit einer strengen Systematik nicht nur den Aufbau komplexer Systeme, sondern auch die kombinierte Strom- und Bestandsrechnung ermöglicht (Schmidt, 1997). In diesen Stoffstromnetzen werden drei Elementklassen verwendet.

Transitionen stehen stellvertretend für Prozesse: Aus verschiedenen Energie und/oder Stoffströmen auf der Inputseite entstehen nach vordefinierten Regeln oder Rezepturen neue Energien und/oder Stoffe auf der Outputseite. In Transitionen findet also die Energie- und Stoffumwandlung eines Stoffstromnetzes statt.

Stellen sind dagegen Lager, in denen keine Materialumwandlung, sondern nur das Halten von Energie- und Stoffbeständen und die Verteilung derselben erfolgen. Es gibt Sondertypen von Stellen, die *Input-* und *Outputstellen*, die die Übergabepunkte der Bilanz zur Außenwelt darstellen, sowie die *Verbindungsstellen* (in Umberto: „Connection Places“), die Ströme nur verteilen können, aber nicht als Lager wirken, d. h. deren Bestände immer Null oder konstant sind.

Verbindungen zeigen an, wie die Energien und Stoffe im Netz fließen, welche Prozesse über die Energie- und Stoffströme miteinander verknüpft sind. Die Methodik und die Arbeitsweise des Programms sind inzwischen in zahlreichen Veröffentlichungen gut dokumentiert. Dem Anwender eröffnet dieser Ansatz eine benutzerfreundliche Oberfläche sowie eine Vielzahl an leistungsstarken Features (Schmidt, 1997).

SimaPro

SimaPro ist die weltweit am weitesten verbreitete Ökobilanz-Software. Sie wird von der Firma „Pré Consultants“ vertrieben und enthält eine umfangreiche Datenbank. Die Software ist in der Industrie sehr bekannt für die Implementierung einer Wirkungsabschätzung, den „eco-indicator“. Wenn es um vergleichende Aussagen geht, ist ihre Anwendung nach ISO 14040 auf den internen Gebrauch beschränkt (Klöpffer, 2009).

Alle genannten Software-Tools zur Erstellung von Ökobilanzen benötigen zur Berechnung Daten. Diese Daten können prinzipiell vom Nutzer selbst ermittelt werden, was allerdings jenseits seiner Kernprozesse häufig Schwierigkeiten auf Grund der Verfügbarkeit darstellt. Deswegen sind Basisdaten in sogenannten „Life-Cycle-Inventory“-Datenbanken hinterlegt. In diesen Datenbanken sind Energiebedarfe, Emissionen und Abfälle von Rohstoffen, Energieproduktion, und zum Teil gesamte Produktionsvorketten, gesammelt. Sie ermöglichen dem Anwender die Vervollständigung seiner Ökobilanz, ohne sämtliche Daten von Vorprodukten oder Entsorgungsprozessen selbst verfügbar zu haben. Die umfangreichste Datenbank ist aktuell die ecoinvent-Datenbank. Ecoinvent ist ein gemeinnütziger Zusammenschluss mehrerer schweizerische Forschungseinrichtungen (u.a. ETH Zürich). Ecoinvent bietet mit den Datenbanken ecoinvent v2.2 und v3.1 die derzeit größte konsistente und nachvollziehbare Sammlung von Sachbilanzdaten, die in verschiedenen Ökobilanzierungsprogrammen (umberto, GaBi, SimaPro) verwendet werden können (ecoinvent, 2014). Neben der ecoinvent-Datenbank gibt es noch zahlreiche weitere Datenbanken, die Sachbilanzdaten zur Verfügung stellen, z.B. die ProBas-Datenbank (Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme) des deutschen Umwelt Bundesamtes (Umweltbundesamt, 2015) oder die amerikanische NREL (National Renewable Energy Laboratory) LCI-Datenbank (Torcellini, et al., 2004).

2.2 Systemgrenzen

„Ein System ist mehr als die Summe seiner Einzelteile“ (Christian von Ehrenfels).

Ein System besteht aus einer Anzahl von Objekten, die je nach Frage- oder Aufgabenstellung zu einem solchen zusammengefasst werden. Zur Definition des Systems gehört auch die Definition der Systemgrenze. Sie grenzt das System in der Systemtheorie von der Umwelt ab. Das heißt aber nicht, dass es zwischen System und Umgebung keine Wechselwirkungen geben darf. In der Systemtheorie wird angenommen, dass diese Einflüsse nur in eine Richtung wirken: So beeinflusst die Umwelt, die im Vergleich zum System als unendlich groß angenommen wird, das System über die Systemgrenze hinweg durch sogenannte äußere Relationen, nicht aber anders herum (Imboden, 2003). Diese Betrachtung mag in der Systemtheorie passend sein. Bei der

Aufstellung von Ökobilanzen geht es allerdings nicht allein um die inneren Zusammenhänge eines Systems, sondern vielmehr um genau jene Wechselwirkungen, bzw. die Einflüsse die das System auf seine Umwelt nehmen kann. Emittiert beispielsweise ein System, welches ein Industrieprodukt herstellt, Stoffe mit Umweltgefährdungspotential (gasförmig, flüssig oder fest), und diese werden nicht innerhalb der Systemgrenzen festgehalten, so gelangen diese Stoffe mit Umweltgefährdungspotential in die Umwelt des Systems und können diese beeinflussen.

Allgemein wird ein System in Teilsysteme heruntergebrochen. Diese Teilsysteme werden meist als „Black-Box“ oder auch Komponenten (siehe Abbildung 6) bezeichnet und beschreiben ein geschlossenes System, dessen innerer Aufbau zunächst vernachlässigt wird (Vogel, 2011). In diesem Bereich ist es unerheblich, wie viele Teilsysteme sich auf darunterliegender hierarchischer Ebene befinden. Wichtig ist allein die Funktion der Teilsysteme, die Eingangsgrößen funktional mit Ausgangsgrößen verknüpfen. Allein die Teilsysteme werden betrachtet und eine mathematische Beschreibung der inneren Vorgänge derart vorgenommen, dass die „Black-Box“/Komponente das Teilsystem hinreichend genau beschreibt (Heinrich, 2004). Es gelten die allgemeinen physikalischen Gesetze wie zum Beispiel der Energieerhaltungssatz und die Massenkonstanz. Das heißt, es wird keine Materie erzeugt und Energie wird lediglich umgewandelt. Letztendlich werden alle Teilsysteme zu einem Gesamtsystem verknüpft. Abbildung 6 zeigt schematisch ein einfaches System mit untereinander vernetzten Teilsystemen.

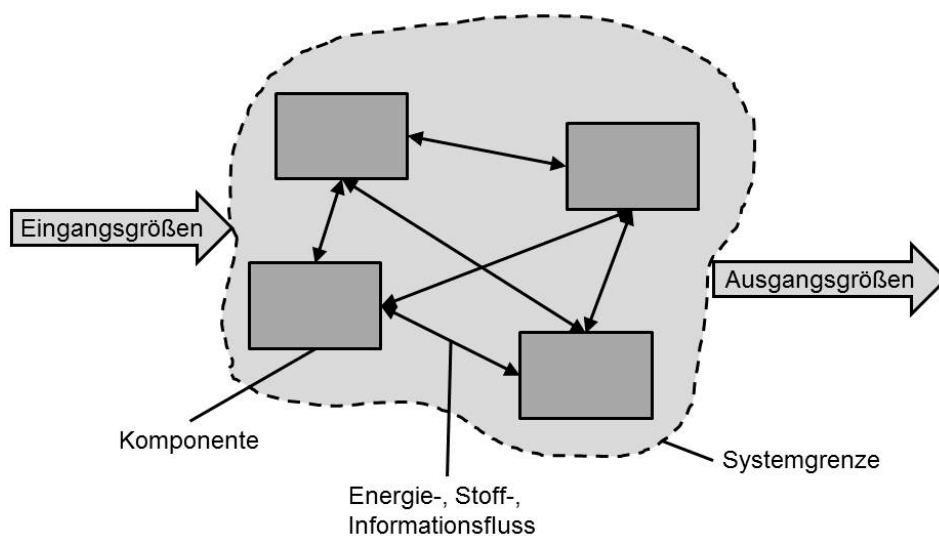


Abbildung 6: Grafische Veranschaulichung des Systembegriffs (Kahlert, 2004)

Allgemein ist anzunehmen, dass die Eingangs- und Ausgangsgrößen sowohl in Bezug auf das System, als auch auf die Teilsysteme aus **Stoff**, **Energie** und **Information** bestehen. Diese drei Eingangs- und Ausgangsgrößen sind allgemein gültig und werden in dieser Form z.B. auch in der Konstruktionslehre für die Lösung konstruktiver Fragestellungen genutzt, da alle anfallenden Größen auf diese drei Kategorien heruntergebrochen werden können.

Energie: mechanische, thermische, elektrische, chemische, optische Energie, aber auch Kraft, Strom, Wärme...

Stoff: Gas, Flüssigkeit, feste Körper, Staub, aber auch Rohprodukt, Material, Bauteil, Endprodukt oder Halbzeug...

Information: Daten, Informationen, Steuerimpuls, Messgrößen... (Feldhusen, et al., 2013)

Besondere Bedeutung kommt den Systemgrenzen bei der Ökobilanzierung zu, da die Festlegung der Systemgrenzen das Ergebnis maßgeblich beeinflussen kann. Die Systemgrenze legt fest, welche Prozessmodule in das System einzubeziehen sind. Die Abschneidekriterien sind je nach Zielsetzung der Untersuchung zu definieren (Deutsches Institut für Normung e.V., 2009). Jedoch werden die Systemgrenzen einer Ökobilanz nach Suh et al. meist nicht auf einer wissenschaftlichen Basis, mit klar definierten Abschneidekriterien, definiert. Dies liegt laut Suh et al. daran, dass ausgeklammerte Prozesse oftmals nicht von den Durchführenden bewertet wurden und deren Vernachlässigbarkeit deswegen nicht gewährleistet ist (Suh, et al., 2004).

Ein Produktlebenszyklus besteht aus verschiedenen Phasen, die je nach Anforderung des Untersuchungsrahmens oder Zielsetzung einer Studie in die Betrachtung einbezogen werden können. Die Produktlebensphasen und die Bezeichnung der entsprechenden Betrachtungsrahmen sind in Abbildung 7 dargestellt.

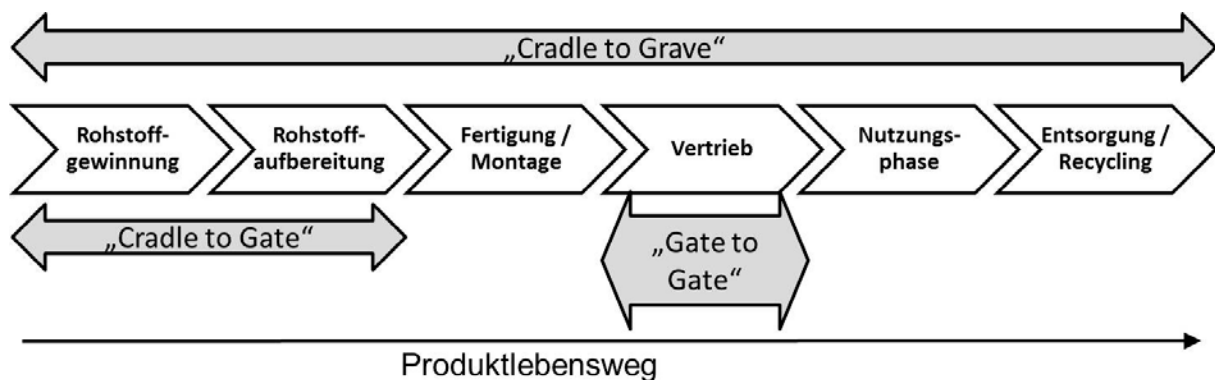


Abbildung 7: Bilanzierungsmethoden

Diese Kategorien sind:

- „Cradle to Grave“: Auf Deutsch bedeutet diese Kategorie: „Von der Wiege bis zur Bahre“, eine zeitlich ganzheitliche Betrachtung des Produktlebens von der Herstellung über die Zeitdauer der Benutzung bis zur Entsorgung oder einer eventuellen Wiederverwertung. Das bedeutet, es werden ausnahmslos alle anfallenden Stoffströme in die Bilanz aufgenommen (U.S. Environmental Protection Agency, 2006).

- „Cradle to Gate“: „Von der Wiege bis zum Tor“ meint eine Bilanzierung beginnend mit der Herstellung bis zum Ausgangstor oder des Verlassens des Betriebsgeländes des betrachteten Produktionsstandortes. Dabei kann die Produktionsstätte auch gleichzeitig der Herstellungsort sein. Ist dies nicht der Fall, müssen vorhergehende Standorte mit bilanziert werden (Klöpffer, 2009).
- „Gate to Gate“: „Von einem Tor bis zum nächsten Tor“ analysiert die Stoffströme innerhalb eines Betriebes. Die Bilanz wird von dem Ausgangstor des vorangehenden Produktionsstandortes bis zu dem Ausgangstor des eigenen Standortes geführt (Klöpffer, 2009).
- „Gate to Grave“ (in Abbildung 7 nicht dargestellt): „Vom Tor bis zur Bahre“ beschreibt eine Bilanzierungsmöglichkeit, die sich beginnend mit dem Ausgangstor und damit des Verlassens des Betriebsgeländes eines Produktionsbetriebes über die Benutzungsdauer bis zur Entsorgung oder der Wiederverwertung eines Produktes befasst (Klöpffer, 2009).
- „Well to wheel“ (in Abbildung 7 nicht dargestellt): „Von der Quelle auf die Straße“ ist eine besondere Form der Bilanzierung für Treibstoffe und wird häufig in der Automobilindustrie benutzt. Sie betrachtet alle anfallenden Stoffströme von der Förderung des Rohöls bis zur Umwandlung des Treibstoffes in kinetische Energie in einem Kraftfahrzeug. (Deutsches Institut für Normung e.V., 2009)

Eine Produktökobilanz ist immer eine „Cradle-to-Grave“-Analyse, die jedoch aus den oben genannten Möglichkeiten kombiniert werden kann. So kann zum Beispiel eine Gesamtbilanz aus einer „Cradle to Gate“- , mehreren „Gate to Gate“- und einer „Gate to Grave“-Betrachtung bestehen.

Hingegen sind Ökobilanzen von Prozessen, in diesem Falle Fertigungsprozessketten immer „Gate-to-Gate“-Analysen. Das Festlegen der Systemgrenze, oder auch Betrachtungsgrenze, hat hier einen maßgeblichen Einfluss. Ressourcen, wie Energie und Materialien, werden je nach Fertigungsprozess in unterschiedlichen Teilprozessen wertschöpfend in die Prozesskette eingebracht, oder fallen dort als Abfälle an. Es hat demnach direkten Einfluss auf die Bilanz, wie die Systemgrenzen gesetzt werden. In dieser Arbeit wird eine Analyse der Fertigungsprozesskette durchgeführt, also eine Prozessökobilanz. Eingangsgrößen für die Betrachtung sind die Materialien (Fasern und Matrixwerkstoffe), Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe, sowie elektrische Energie für den Betrieb der Anlagen. Ebenso werden Fertigungshilfsmittel (z.B. Formwerkzeuge) und Anlagen in die Bilanzierung mit einbezogen. Am Ausgang des betrachteten Systems steht das fertig ausgehärtete Faserverbundbauteil nach dem Entformen aus dem Formwerkzeug. Sollte ein nachträgliches Besäumen, spanendes Nachbearbeiten,

aufgrund des Fertigungsverfahrens notwendig sein, wird dies in dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Solche nachgeschalteten Prozesse innerhalb der Bauteilherstellung, wie die Bauteilbesäumung, aber auch der Bauteillebenszyklus und das Bauteilrecycling, die zu einer Ökobilanz dazu gehören, werden in dieser Arbeit nicht betrachtet. Allerdings ist eine Analyse der Schnittstellen zu vor- und nachgeschalteten Prozessen notwendig. Hier soll eine Einschätzung der Einflüsse der Eingangsgrößen auf das System, sowie eine Einschätzung der Einflüsse des Systems auf die nachgeschalteten Prozesse, durchgeführt werden. Im Rahmen der Literaturrecherche konnte beispielsweise festgestellt werden, dass es bislang nur sehr wenig veröffentlichte Daten zum CO₂-Fußabdruck der Kohlenstofffaser gibt, welcher als Eingangsgröße in dieser Arbeit verwendet werden soll (siehe Kapitel 2.5). Abbildung 8 zeigt die Systemgrenze dieser Arbeit. Innerhalb der Systemgrenze (gelb gestrichelt) liegen die wesentlichen Teilprozesse eines Faserverbundherstellungsprozesses. Eingangsgrößen stellen die intrinsischen Eigenschaften der verarbeiteten Materialien dar. Heizprozesse, die potentiell energieintensiv sind, sind gesondert markiert. Die hier dargestellte Prozesskette dient exemplarisch zur Veranschaulichung der Systemgrenzen, da andere Prozessketten völlig anders aussehen könnten. Ausgangsgröße des Systems ist in dieser Arbeit ein CO₂-Äquivalent als Maß zur Bewertung der Prozessketten hinsichtlich ihres Ressourceneinsatzes. Zusätzlich werden die verursachten Kosten ermittelt, um eine ökonomische Bewertung durchführen zu können.

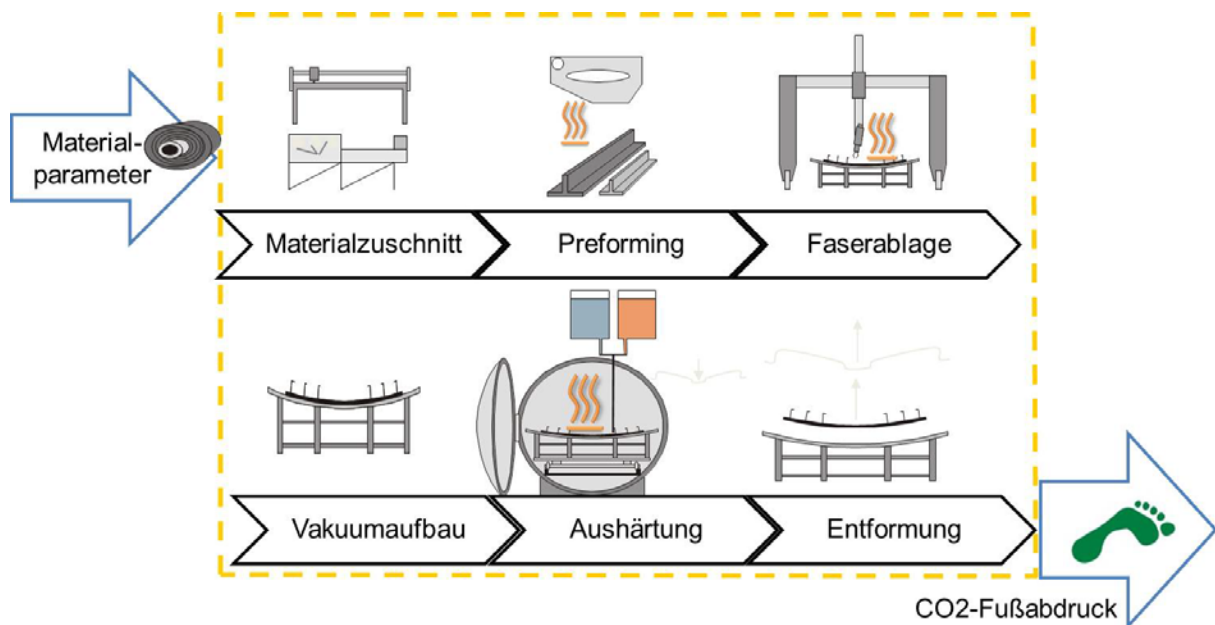


Abbildung 8: Systemgrenzen der Faserverbundfertigung in dieser Arbeit

In der Ökobilanzierung wird der Begriff der funktionellen Einheit genutzt, die festlegt, was zu untersuchen ist. Sie dient als Vergleichseinheit und definiert den quantifizierten Nutzen eines Produktsystems (Deutsches Institut für Normung e.V., 2009). Um die Funktion erfüllen zu

können muss darüber hinaus auch der Referenzfluss definiert werden, der ein Maß für den Output eines Systems ist, welcher gewährleistet sein muss um die geforderte Funktion zu erfüllen (Deutsches Institut für Normung e.V., 2009).

In dieser Arbeit besteht der Nutzen / die Funktion der funktionellen Einheit darin ein FVK Bauteil herzustellen. Das heißt, dass der Herstellungsprozess nicht näher spezifiziert ist, da es nicht auf die Art und Weise der Herstellung, genaue Teilprozesse etc., ankommt, sondern lediglich auf die Funktion eine FVK Komponente herzustellen. Der Referenzfluss ist dementsprechend die Komponente selbst, die als Output vorliegen muss, um die Funktion der funktionellen Einheit zu erfüllen.

2.3 Diskretisierung von Fertigungsprozessen

Es ist das Ziel dieser Arbeit eine Methodik zu etablieren, mit der sowohl einzelne Fertigungsprozessketten für Faserverbundkunststoffe bewertet werden können, als auch Varianten ein und derselben Prozesskette vergleichbar zu machen. Diese Varianten können sich z.B. nur durch einen abgewandelten Teilprozess, der sich einer anderen Technologie bedient, unterscheiden. Auf diese Weise können nicht nur Prozessketten als Ganzes, sondern insbesondere die Einflüsse alternativer Teilprozesse aufgezeigt werden. Außerdem wird die Bewertung konkurrierender Technologien möglich, sowie eine Abschätzung des Einflusses neuer Technologien auf die Gesamtprozesskette (siehe Schema in Abbildung 9).

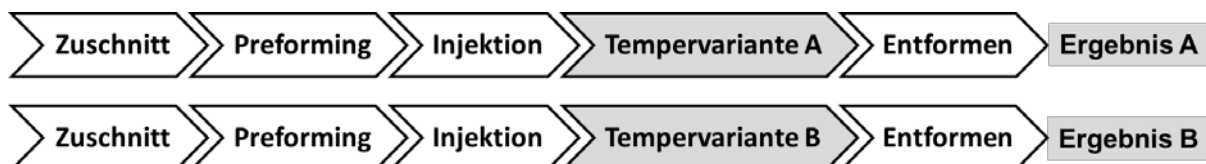


Abbildung 9: Schematischer Vergleich alternativer Prozessvarianten

Wie in Abbildung 9 bereits erkennbar wird das System „Fertigungsprozesskette“ in Teilprozesse zerlegt. Die Zerlegung der Prozesskette kann nach verschiedenen Diskretisierungsansätzen durchgeführt werden, die im Folgenden kurz erläutert werden.

Möglichkeiten der Diskretisierung:

1. Eine Faserverbundfertigungsprozesskette kann in gleich große Zeitintervalle unterteilt werden. Die Definition eines Prozesses aus diesen Zeitintervallen bedarf großer Sorgfalt, damit ein konsistenter Fertigungsprozess entsteht, der in der Realität funktionieren kann.
2. Der Faserverbundfertigungsprozess kann anhand der verwendeten Anlagen und Werkzeuge in Teilsysteme unterteilt werden. Dies ermöglicht die Zusammenstellung

verschiedenster Prozessmodule, die reale Fertigungsprozesse abbilden. Jedoch bietet dieser Ansatz ebenfalls die Möglichkeit Teilprozesse/Teilsysteme so zu einem Gesamtprozess zu kombinieren, dass dieser in der Realität keinen Sinn macht. Beispielsweise wäre dies der Fall, wenn Arbeitsschritte, die ausschließlich bei einem Infusionsprozess anfallen, mit den spezifischen Arbeitsschritten kombiniert würden, die bei der Verarbeitung von vorimprägnierten Faserhalbzeugen (Prepreg) notwendig sind. Ein Prozessverständnis des Anwenders, der eine Prozesskette definiert, ist hier unerlässlich.

3. Entsprechend Variante 2 können Teilprozesse entsprechend dem Ort, an dem sie durchgeführt werden, diskretisiert werden. Dies schränkt Kombinationsmöglichkeiten verschiedener Teilprozesse ein, wenn zeitlich lange Teilprozesse an einem Ort durchgeführt werden und dadurch in einem Modul verbunden sind. Bei automatisierten Linienproduktionen stellt dies ein Problem dar, da Ortsgrenzen häufig schwer zu definieren sind.

Die Diskretisierung nach Variante 2 ermöglicht neben der Modularisierung auch einen parallelen Ablauf zweier Teilprozesse, was für die Modellierung komplexer industrieller Prozessketten mit einer Vielzahl von Teilprozessen unerlässlich ist.

Kellens schlägt eine ökobilanzorientierte Methode zur Datenerfassung und Erstellung einer Sachbilanz vor, die ebenfalls die Zerlegung von Produktionsprozessen in Prozesseinheiten vorsieht (Kellens, et al., 2012). Dabei bestehen auch hier die Prozesseinheiten aus Zellen, die Eingänge und Ausgänge haben. Diese Ein- und Ausgänge gibt es sowohl in der sogenannten Technosphäre als auch in der Ökosphäre (siehe Abbildung 10).

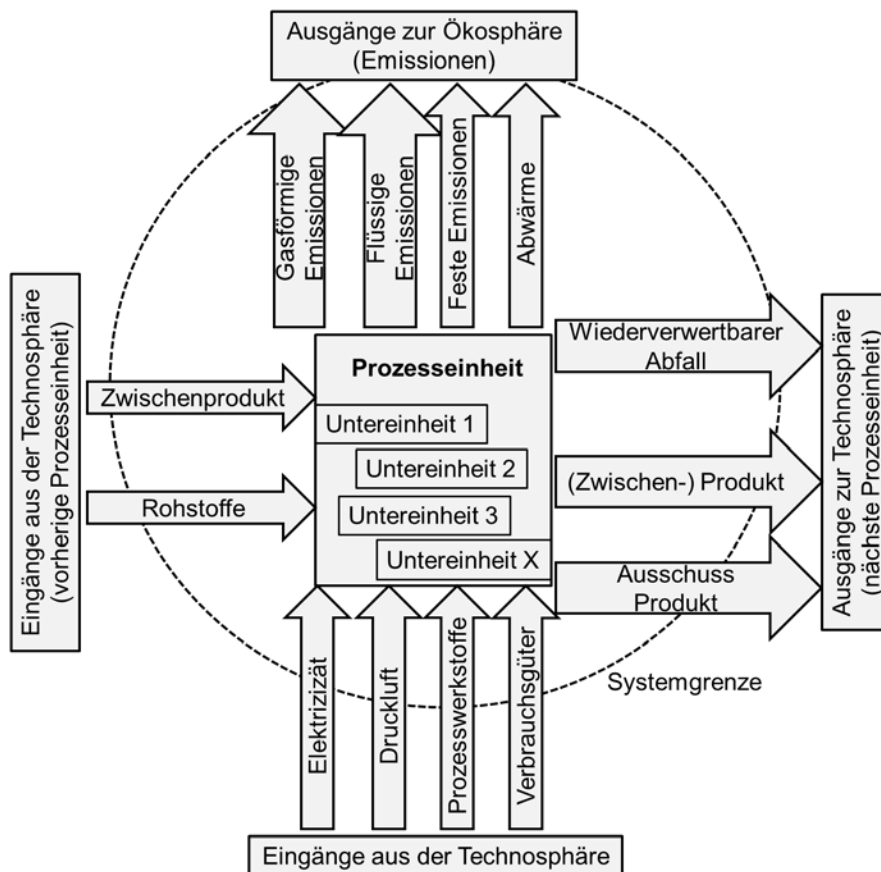


Abbildung 10: Systemgrenzen einer Prozesseinheit (Kellens, et al., 2012 S. 73)

Innerhalb einer Prozesskette können Ein- und Ausgänge einer solchen Prozesseinheit nicht nur Rohstoffe, Energie usw. sein. Ebenso werden zwischen den verschiedenen Prozesseinheiten auch Zwischenprodukte des eigentlichen Bauteils weitergegeben.

2.4 Datenerhebung

In der Ökobilanzierung ist die Datenerhebung Teil der Sachbilanz. Die DIN EN ISO 14040 gliedert die zu sammelnden Daten in:

1. Energie-Inputs, Rohstoff-Inputs, Betriebsstoff-Inputs und andere physikalische Inputs;
2. Produkte, Koppelprodukte und Abfall;
3. Emissionen in die Luft, Einleitungen in Wasser und Verunreinigungen des Bodens;
4. Weitere Umweltaspekte (Deutsches Institut für Normung e.V., 2009).

Die Datenerhebung in der Prozesskette der Faserverbundfertigung ist aufgrund vieler manueller Arbeitsschritte oft sehr anspruchsvoll. Die Feldbeobachtung stellt deshalb eine gute Möglichkeit dar die Ist-Prozesse zu ermitteln. Eine Besonderheit der Faserverbundproduktion ist, dass im Prozess Werkstoff und Geometrie des Werkstückes (Produktes) gleichzeitig entstehen. Dies macht die Faserverbundproduktion zu einem generativen Fertigungsprozess, bei dem Material

theoretisch nur dort eingesetzt werden muss, wo es später zur Gewährleistung der gewünschten Produkteigenschaften benötigt wird (siehe auch Kapitel 2.5).

Um einen Faserverbundfertigungsprozess detailliert abbilden zu können, müssen folgende Merkmale dokumentiert werden:

1. Halbzeuge (Fasermaterialien und Matrixwerkstoffe),
2. Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe (individuell für jede Prozessvariante),
3. Arbeitszeiten von technischem Personal,
4. Anlagen und Anlagennutzungszeiten entsprechend deren Energieverbräuchen, besser sind gemessene Energieverbräuche,
5. Formwerkzeuge (oft mit hohen Investitionen verbunden),
6. Emissionen toxischer Gase, Fluide oder anderen Abfalls.

Videodokumentation, wie sie bereits Engström et al. für Montagearbeiten vorschlägt (Engström, et al., 1997), bietet die Möglichkeit Stoffströme zu identifizieren, sowie Arbeits- bzw. Anlagennutzungszeiten optimal zu erfassen. Darüber hinaus sind Systeme kommerziell verfügbar, die zur Analyse von Rüstprozessen genutzt werden, um bei diesen Verbesserungspotentiale aufzudecken (Bergmann, 2013). Da diese Arbeit ausschließlich die effiziente Nutzung von Ressourcen in der Produktionsprozesskette betrachtet, werden Emissionen und andere Umweltaspekte nicht weiter berücksichtigt. Neben der Erfassung aller physikalischen Inputs, Produkten und Abfällen, können mit Hilfe von Videodokumentation insbesondere auch die manuellen Arbeitsschritte erfasst werden. Manuelle Tätigkeiten machen bei Bauteilen aus Faserverbundkunststoff in vielen Branchen noch immer einen großen zeitlichen und damit kostenintensiven Anteil in der Fertigung aus (Lauter, et al., 2011) (Angerer, et al., 2011) (Brandt, et al., 2001). Da in dieser Arbeit neben der ökologischen Analyse von Faserverbundfertigungsprozessen auch eine ökonomische Betrachtung stattfindet, ist die Dokumentation und Auswertung dieser manuellen Tätigkeiten mittels Videoaufzeichnung optimal möglich. Natürlich können automatisierte Prozesse mit dieser Technik ebenso dokumentiert werden, wobei eine direkte Auswertung der Anlagensteuerung in diesem Falle zielführender und genauer wäre. Da die im Rahmen der vorliegenden Arbeit analysierten Prozesse im Labormaßstab am Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik des Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt e.V. (DLR) durchgeführt wurden, sind Dokumentationsmethoden für automatisierte Prozesse nicht einsetzbar.

Je nach Wahl des Betrachtungsfensters, welches dem Videobild entspricht, kann der gesamte Herstellprozess, oder wahlweise auch nur ein Teilprozess dokumentiert werden. Je nach räumlicher Anordnung der Fertigungsprozesskette muss entschieden werden, ob eine einzelne

Kameraeinstellung ausreicht, um das gesamte System mit allen Eingangs- und Ausgangsgrößen zu erfassen oder nicht. Zusätzlich spielen hierbei die Anforderungen an die Datenqualität eine entscheidende Rolle. Je nach räumlicher Ausdehnung der Fertigung und Bildauflösung der verwendeten Kamera können Prozesse mit höherem bzw. niedrigerem Informationsgehalt dokumentiert werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird der Fertigungsprozess wie in Kapitel 2.3 beschrieben in Teilprozesse zerlegt, um eine lückenlose und detaillierte Dokumentation des gesamten Fertigungsprozesses zu gewährleisten. Die Teilprozesse werden separat aufgenommen, da mit einer Kameraeinstellung nicht der gesamte Fertigungsprozess erfasst werden kann. Dies ist hauptsächlich darin begründet, dass die aufgezeichneten Teilprozesse in unterschiedlichen Räumen durchgeführt werden.

Derzeit liegt eine Grenze videographischer Dokumentation von Fertigungsprozessen bei denen Personal eingesetzt wird dadurch vor, dass solche Videoaufnahmen mit der Aufnahme von Personen einhergehen. Diese könnten mittels der Videotechnik identifiziert werden, was wiederum eine Arbeitsüberwachung der Mitarbeiter grundsätzlich ermöglichen würde. Eine nachträgliche Anonymisierung der Personen im Video ist zwar möglich, aber reversibel und damit nicht relevant. Deshalb kann mit konventioneller Videotechnik nicht gearbeitet werden. Im Rahmen dieser Arbeit wird eine neue Technik zur Dokumentation von Prozessen vorgestellt, die die zuvor genannten Probleme umgeht (siehe Kapitel 5.1.1).

2.5 Faserverbundwerkstoffe

Faserverbundwerkstoffe, als Sonderform der Gruppe der Verbundwerkstoffe, bestehen aus einem oder mehreren Fasermaterialien und einem Matrixsystem. Die Fasern bestimmen maßgeblich die mechanischen Eigenschaften des Bauteils wie dessen Festigkeit und Steifigkeit. Die Hauptaufgabe der Matrix ist es Kräfte in die Fasern einzuleiten, Kräfte zwischen den Fasern zu übertragen und die Bauteilgeometrie darzustellen. Des Weiteren schützt die Matrix die Fasern vor Umwelteinflüssen und ist verantwortlich für nicht strukturell relevante Bauteileigenschaften, z.B. können thermische und elektrische Leitfähigkeit gezielt eingestellt werden (Ehrenstein, 2006).

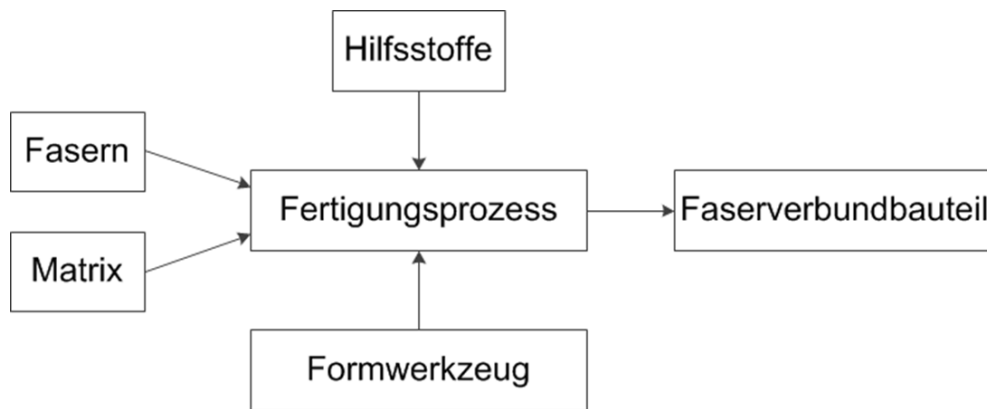


Abbildung 11: Schema der Stoffflüsse in der Faserverbundproduktion

Darüber hinaus spielt bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen die Gruppe der Fertigungshilfsstoffe eine ausschlaggebende Rolle, wenn es um die Ressourceneffizienz der Produktion geht. Alle Fertigungsverfahren benötigen Hilfsstoffe. Dazu gehören Dichtungen, Trennmittel, verschiedene Folien, Abreißgewebe und vieles mehr, abhängig vom Fertigungsverfahren. Zum Beispiel benötigen Prozesse, in denen einseitige Formwerkzeuge verwendet werden, Vakuumfolien, Dichtmasse und Belüftungsvliese, um eine Kompaktierung des Fasermaterials zu erreichen. Die Kompaktierung ist notwendig für das Erreichen der geforderten Faservolumenanteile, und damit der mechanischen Eigenschaften des Zielbauteils. Hilfsstoffe sind in der Regel nicht wiederverwendbar und nach Ende des Fertigungsprozesses Abfall. Bei Rüst- und Reinigungsarbeiten kommen Handschuhe, lösungsmittelbasierte Reinigungs- und Trennmittel, Putztücher, Dichtungen, Schläuche etc. dazu, die nach der Fertigung eines Bauteils in den Abfall wandern.

Die drei Materialgruppen

- Faserhalbzeuge,
- Matrixwerkstoffe und
- Fertigungshilfsstoffe

sollen insbesondere hinsichtlich ihrer generativen Aspekte betrachtet werden, d.h. welche Materialien und Halbzeuge in welcher Art und Weise zur Erfüllung von Bauteilanforderungen beitragen, und welche nach der Fertigstellung des Produktes lediglich Abfälle, bzw. finanzielle Verluste, bedeuten.

Faserhalbzeuge

Die Anforderungen an Produkte aus Faserverbundwerkstoffen sind so unterschiedlich wie die Verstärkungsfasern, die in ihnen zum Einsatz kommen. Am häufigsten finden Kohlenstofffasern, Glasfasern, Aramidfasern und bei Hochtemperaturanwendungen (bis 600 °C) Borfasern

Verwendung (Flemming, et al., 1995). Auch Naturfasern wie Flachs, Hanf, Sisal, Jute, Ramie und Baumwolle sind aufgrund beachtlicher Zugfestigkeiten bis 750 N/mm² gebräuchlich. Jedoch müssen bei der Verwendung von Naturfasern deren Alterungsbeständigkeit und Resistenz gegenüber Umwelteinflüssen berücksichtigt werden (Ehrenstein, 2006).

Als Vorteile von Naturfasern sind zu nennen:

- geringes spezifisches Gewicht
- gute thermische und akustische Isoliereigenschaften
- Entsorgung bei Verwendung biologischer Matrixsysteme durch Verrottung möglich
- geringe Abrasivität bei mechanischer Bearbeitung
- Brennwert bei Entsorgung, z.B. Flachs mit 17-20 MJ/kg im Vergleich zu Öl mit ca. 40 MJ/kg (Koslajeva, et al., 2012). Demgegenüber besitzen Kohlenstoff- und Glasfasern keinen Brennwert, sie zersetzen sich bei hohen Temperaturen, bzw. schmelzen.

Probleme ergeben sich durch

- hohe Streuung der Eigenschaftswerte aufgrund von Wachstumsbedingungen,
- Feuchtigkeitsempfindlichkeit,
- Matrixauswahl begrenzt wegen Zersetzungsgefahr durch hohe Verarbeitungstemperatur (beständig < 200 °C),
- aufwendige Vorbehandlung für Kompatibilität mit Matrix,
- begrenzte Faserlänge,
- biologische Änderungen oder Angriffe auf die Faser (Bos, 2004), (Schürmann, 2007).

Naturfasern können Glasfasern, in nicht lasttragenden Anwendungen ersetzen. Eine Substitution von Kohlenstofffasern durch nachwachsende und kompostierbare Naturfasern ist in langfaserverstärkten FVK für hochbelastete Strukturbauteile bislang nicht möglich (Wambua, 2003). In der Forschung gibt es dagegen Bestrebungen zunehmend hochbelastete Bauteile auf Naturfasern in Kombination mit Biopolymeren als Demonstratoren herzustellen. Zum Beispiel werden Verkleidungsteile für den Rennwagen „Bioconcept-Car“ aus naturfaserverstärkten Biopolymeren hergestellt, um das Potential dieser Werkstoffe zu zeigen (Endres, et al., 2014) (FOUR MOTORS GmbH, 2014).

Eine besondere Bedeutung kommt in der Luft- und Raumfahrt und anderen Hochleistungsanwendungen den Kohlenstofffasern zu, da deren mechanische Eigenschaften mit Festigkeiten bis 5 GPa und Steifigkeiten bis 400 GPa (Ehrenstein, 2006) ein enormes Leichtbaupotential aufweisen. Da Kohlenstofffasern in immer größer werdenden Volumina auch im Automobilbau und in Rotorblättern für Windenergieanlagen verarbeitet werden, muss

besonders dort auf deren ressourcenschonenden Einsatz geachtet werden. Abbildung 12 zeigt eine Voraussage des Bedarfes an Kohlenstofffasern bis 2020 nach Sloan. Demgegenüber wird vom VDI für 2020 bereits ein Bedarf von 130.000 t vorausgesagt (Eickenbusch, et al., 2013).

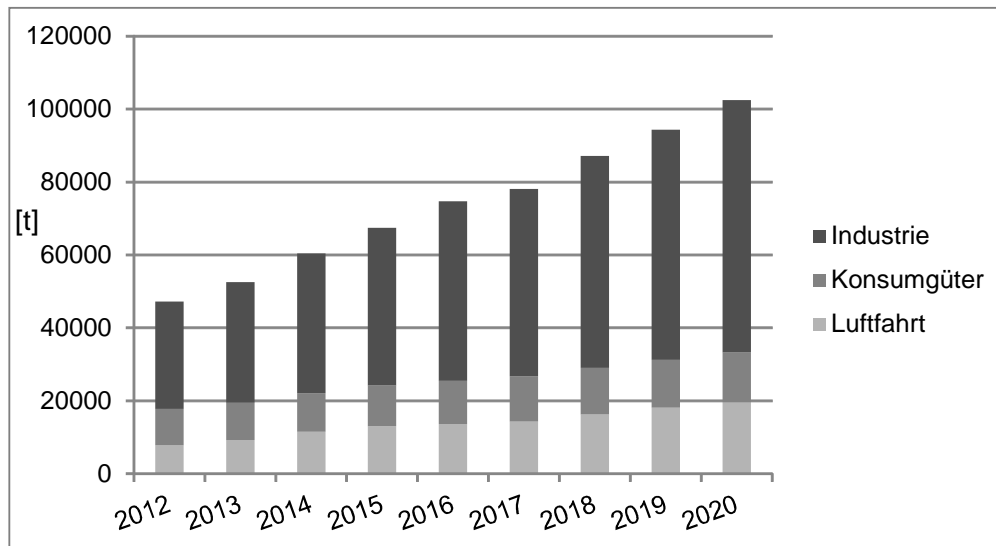


Abbildung 12: Voraussage des globalen Bedarfes an Kohlefasern bis 2020 (Sloan, 2013)

Da im Rahmen dieser Arbeit exemplarisch Prozessketten zur Fertigung von kohlenstofffaserverstärkten Bauteilen untersucht werden und diese Fasern durch ihren energieintensiven Herstellprozess eine besondere Herausforderung bezüglich der Schonung von Ressourcen darstellen, werden diese im Folgenden genauer betrachtet.

Um Kohlenstofffasern herzustellen finden zwei Verfahren großtechnische Anwendung mit Marktrelevanz (Warnecke, et al., 2013). Zum einen wird eine erdölbasierte Polyacrylnitril (PAN) Rohfaser sehr stark gestreckt, um die Moleküle der Faser in Längsrichtung auszurichten. Dies geschieht bei ca. 200 °C – 300 °C und wird Stabilisierung oder Oxidationsstufe genannt. Anschließend findet die Carbonisierung (Pyrolyse) unter Inert-Atmosphäre bei Temperaturen zwischen 600 und 1700 °C statt (Peebles, 1995). Dieser, meist nur wenige Minuten dauernde, Schritt erhöht den Kohlenstoffanteil und lässt eine graphitische Schichtstruktur entstehen (Warnecke, et al., 2013). Die genauen Prozessparameter sind in Tabelle 1 zu finden.

Tabelle 1: Fasereigenschaften und Prozessparameter in der Carbonfaserherstellung (Warnecke, et al., 2012)

PAN-Precursor	Stabilisierung	Stabilisierte Fasern	Carbonisierung	Carbonfasern
$\varnothing \approx 13 \mu\text{m}$	$T = 200 - 300 \text{ }^\circ\text{C}$	$\varnothing \approx 12,5 \mu\text{m}$	$T = 1300 - 1500 \text{ }^\circ\text{C}$	$\varnothing \approx 7 \mu\text{m}$
$\sigma_{\text{max}} \approx 360 \text{ MPa}$	$t \approx 2 \text{ h}$	$\sigma_{\text{max}} \approx 240 \text{ MPa}$	$t \approx 5 - 10 \text{ min}$	$\sigma_{\text{max}} \approx 4 - 4,5 \text{ MPa}$
$\epsilon \approx 11 \%$	Atmosphäre: Luft	$\epsilon \approx 20 - 40 \%$	Atmosphäre: N_2	$\epsilon \approx 1,8 \%$
$\rho \approx 1,2 \text{ g/cm}^3$	-	$\rho \approx 1,4 \text{ g/cm}^3$	-	$\rho \approx 1,8 \text{ g/cm}^3$

In einem optionalen Schritt des Graphitierens wird die Faser bis auf $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ erhitzt. Infolgedessen erhöht sich der E-Modul der Faser, da sich die Graphitschichten enger aneinanderlegen. Im letzten Prozessschritt wird die Faser oberflächenbehandelt und aufgewickelt. Abbildung 13 fasst diese Prozessschritte nochmals grafisch zusammen.

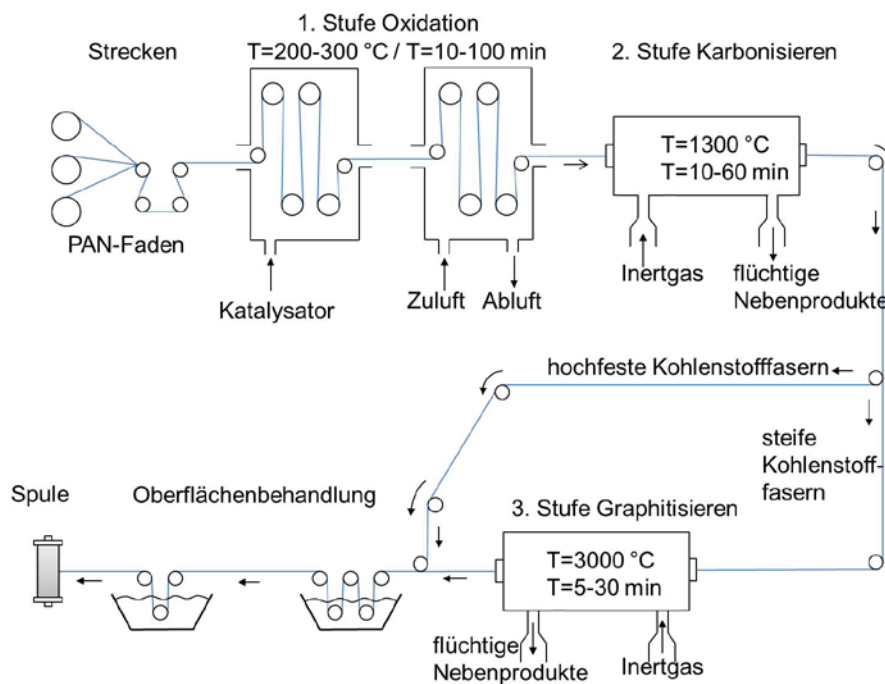


Abbildung 13: Verfahrensstufen bei der Herstellung von PAN-C-Fasern (Flemming, et al., 1995)

In einem anderen Verfahren wird Mesophasenpech als Rohstoff benutzt, welches ebenfalls ein Erdölprodukt ist. Das Pech wird im Schmelzspinnverfahren zu einer Faser gezogen und bei ca. $2000 \text{ }^\circ\text{C}$ verkocht. Während einer Glühbehandlung bei $3000 \text{ }^\circ\text{C}$ entsteht eine rekristallisationsähnliche Umordnung der inneren Struktur der Faser. Für den höheren Preis dieser Fasern, gegenüber den PAN-Kohlenstofffasern, sind die kontinuierlich hohen Temperaturen in den Öfen und die niedrige Ausbeute ausschlaggebend (Flemming, et al., 1995).

Die Nachhaltigkeit eines Produktes oder Bauteiles aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff (CFK) kann an dieser Stelle aus drei Gründen in Frage gestellt werden.

1. Kohlenstofffasern werden aus Erdöl hergestellt, was den Verbrauch einer nicht nachwachsenden Ressource bedeutet.
2. Die Herstellung von Kohlenstofffasern benötigt sehr hohe Temperaturen zur Oxidation, Carbonisierung und ggf. Graphitisierung über lange Zeiträume, was einen enormen Energiebedarf darstellt (siehe Tabelle 1 und Tabelle 2).
3. Bei der Herstellung werden große Mengen Treibhausgase emittiert (Tabelle 2).

Tabelle 2: Energiebedarf und Schadstoffausstoß bei der PAN-Kohlenstofffaserherstellung (Zhang, et al., 2011)

	Energie [MJ/kg-Kohlenstofffaser]	CO ₂ [kg/kg _{Kohlenstofffaser}]	SO _x [kg/kg _{Kohlenstofffaser}]	NO _x [kg/kg _{Kohlenstofffaser}]
Erste Daten aus 1999	478,5	29,7	0,068	2,009
neu kalkulierte Daten 2004	285,9	20,5	0,02	0,146
neu kalkulierte Daten 2009	286	22,4	0,019	0,121

In Tabelle 2 sind der spezifische Energiebedarf, sowie der Schadstoffausstoß bei der Kohlenstofffaserproduktion angegeben. Die Quelle, die Zhang für seine Energiebedarfe und Schadstoffausstöße angibt ist zwar nicht mehr aufrufbar, jedoch korrelieren die Energiebedarfe aus 1999 und 2004 mit denen, die Suzuki 2005 veröffentlichte (Suzuki, et al., 2005). Nach Kermeli et al. liegt die weltweit gemittelte Energieintensität für die Aluminiumherstellung bei 14,6 MJ/kg (Kermeli, et al., 2014), was verglichen mit den aktuellsten Zahlen von Zhang bedeutet, dass die Energieintensität der Kohlenstofffaserherstellung um den Faktor 20 höher ist. Die bei Zhang angegebenen CO₂-Emissionswerte geben einen ersten Anhaltspunkt für ein CO₂-Äquivalent, jedoch wird nicht näher auf den Ursprung der Zahlen eingegangen und ob sie sich ausschließlich auf die Umwandlung der PAN-Faser in Kohlenstofffasern beziehen, oder die PAN-Faserherstellung mit einbeziehen.

Tabelle 3 zeigt die von Das ermittelten Energien und CO₂-Äquivalente für die PAN-Kohlenstofffaser, sowie für eine aus dem alternativen Precursor Lignin gewonnene Kohlenstofffaser im Vergleich. Über den Vergleich der Fasern hinaus, wurden mit den zwei Fasertypen zwei Fertigungsprozesse zur Bauteilherstellung durchlaufen. Zum einen wurde ein „Sheet-Moulding-Compound“-Verfahren (SMC) verwendet, bei dem ein Organoblech in einem Tiefziehprozess umgeformt wird. Der zweite Prozess, der hier als P4-Prozess („Programmable Powdered Preforming Process“) beschrieben wird, verwendet einen durch Kurzfaserspritzen

hergestellten Preform, der anschließend per Harzinjektion in einem beheizten Pressenwerkzeug mit dem Matrixsystem zusammengebracht wird. Auffällig ist bei den Angaben zum Primärenergiebedarf der zwei Fasertypen, dass dieser um Faktor 2-2,5 höher ist, als bei Zhang, wohingegen das Äquivalent CO₂-Emissionen bei Das in derselben Größenordnung liegt wie bei Zhang. Das erstellt für das untersuchte Bauteil, die Bodengruppe eines Automobils, eine Ökobilanz über die gesamte Lebensdauer des Bauteils, wobei sich zeigt, dass die 5 kg Gewichtersparnis durch den Einsatz von Faserverbundkunststoff (Reduktion von 30 kg auf 25 kg) den Gesamt-CO₂-Ausstoß gegenüber dem konventionellen Stahlbauteil senken können. Durch den P4-Prozess kann der Rechnung entsprechend sogar der Primärenergiebedarf reduziert werden.

Tabelle 3: Energiebedarfe und CO₂-Äquivalente der Kohlenstofffaserherstellung (Das, 2011)

Material/Technologie/Einheit	Primärenergie [MJ]	Äquivalent CO ₂ Emissionen [kg]
Pro kg Material		
PAN Kohlenstofffaser	704	31
Lignin Kohlenstofffaser	670	24,2
Pro kg gefertigtes Bauteil (inkl. Material und Herstellung)		
PAN SMC Bauteil	345	16,9
PAN P4 Bauteil	323	14,6
Lignin SMC Bauteil	336	14,9
Lignin P4 Bauteil	312	12,5
Gestanztes Stahlbauteil	56	4,4
Ökobilanz des Bauteils (Material, Herstellung, Nutzung, Lebensende)		
Ökobilanz PAN SMC	18804	1407
Ökobilanz PAN P4	18232	1347
Ökobilanz Lignin SMC	18800	1400
Ökobilanz Lignin P4	18185	1338
Ökobilanz gestanztes Stahlbauteil	18308	1478

Zur Festlegung eines CO₂-Äquivalents, welches in den Berechnungen dieser Arbeit verwendet werden soll, wurden in der Literatur verfügbare Werte zusammengetragen. Diese sind in Tabelle 4 dargestellt. Die großen Unterschiede der verwendeten CO₂-Äquivalente sind offensichtlich und schwanken zwischen 17,5 (der Autor stuft diesen Wert als unsicher ein) und 46,8 kg_{CO2}/kg_{Kohlenstofffaser}. Da der absolute Wert des Kohlenstofffaser CO₂-Äquivalents im Rahmen der vorliegenden Arbeit nicht kritisch ist, da verschiedene Prozessvarianten untereinander verglichen

werden sollen, und das in den Berechnungen verwendete Äquivalent gleich bleibt, wird konservativ ein gerundeter Wert von 50,0 kg_{CO2}/kg_{Kohlenstofffaser} angenommen.

Tabelle 4: Übersicht der CO₂-Äquivalente von Kohlenstofffasern aus der Literatur

Äquivalent CO ₂ Emissionen [kg]	Typ der Kohlenstofffaser	Quelle
29,5	Kohlenstofffaser	(Murphy, 2008)
31	PAN-basierte Kohlenstofffaser	(Das, 2011)
24,2	Lignin-basierte Kohlenstofffaser	(Das, 2011)
45,6	Kohlenstofffaser (Prepreg)	(Witik, et al., 2011)
46,8	Kohlenstofffaser (Infusion)	(Witik, et al., 2011)
17,5	Kohlenstofffaser	(Ehrenberger, et al., 2013)

Eine vielversprechende Quelle als Precursor für die zukünftige Herstellung von Kohlenstofffasern bietet die Zellulosefaser und Lignin, an der bislang jedoch nur wenige Forschergruppen arbeiten (Eickenbusch, et al., 2013). Es gibt jedoch bereits vielversprechende Resultate, die die Nutzung von Lignin als Precursor von Kohlenstofffasern für allgemeine Anwendungen möglich erscheinen lassen (Kadla, 2002) (Thunga, et al., 2014). Neueste Forschungen zeigen zudem, dass lignin-basierte Kohlenstofffasern durch einen entsprechenden Herstellungsprozess außergewöhnlich gute mechanische Kennwerte erreichen können und zudem sehr gute Oberflächencharakteristika aufweisen, was sie in Bezug auf die Faser-Matrix-Haftung im Verbundbauteil besonders interessant macht (Zhang, et al., 2014).

Bei aktuellen Recycling-Verfahren wird davon ausgegangen, dass die Leistungsfähigkeit der Fasern mit jedem Recycling-Zyklus abnimmt, da die Faserlänge immer kürzer wird (Suzuki, et al., 2005). Es gibt verschiedene Verfahren, um sowohl Reste von Prepreg-Material als auch unimprägnierte Faserhalbzeuge und auch ausgehärtete Bauteilabfälle zu recyceln (Pannkoke, et al., 1998) (Nakagawa, et al., 2009) (Pimenta, et al., 2011) (Meyer, et al., 2009). Jedoch kann bei all diesen Verfahren nicht im eigentlichen Sinne von Recycling gesprochen werden, da die Kohlenstofffasern nicht in ihrer ursprünglichen Form zurückgewonnen werden können. Aus Bauteilen mit Endlosfaserverstärkung werden lediglich Kurzfasern bis 120 mm zurückgewonnen (Job, 2014), die zumeist ohne Faserschlichte in lockerer Form geringer Dichte vorliegen. Dies erfordert eine Abwandlung der ursprünglichen Fertigungsprozesse, die in der Regel fabrikneues Fasermaterial verarbeiten (Pimenta, et al., 2011).

Matrixsysteme

Bei Maschinenbauanwendungen werden in Verbindung mit Kohlenstofffasern hauptsächlich polymere Matrixsysteme, welche durch Polymerisation, Polykondensation oder Polyaddition entstehen, eingesetzt. Unterschieden wird zwischen Duroplasten, Thermoplasten und Elastomeren, wobei letztere in Strukturbauteilen jedoch kaum verwendet werden.

Die Verwendung duromerer Matrixsysteme dominiert in der Faserverbundfertigung, da aufgrund ihrer niedrigen Viskosität eine Imprägnierung unterschiedlichster Formen erfolgen kann. Des Weiteren besitzen sie vorteilhafte mechanische und thermische Eigenschaften. So ist ihr Einsatz in Prozessen bei Raumtemperatur und geringen Drücken, bzw. drucklos, möglich. Allerdings entwickelte sich aufgrund von erhöhter Belastbarkeit, Temperaturtoleranz, geringerer Verarbeitungszeit (bestenfalls einige Sekunden im Vergleich zu mehreren Stunden bei Duroplasten) und einer gewissen Recyclingfähigkeit eine verstärkte Nutzung von Thermoplasten, sodass heutzutage Hochleistungsthermoplaste viele vorteilhafte Eigenschaften besitzen, wenn man von der Kostenstruktur absieht (Sheikh-Ahmad, 2009).

Tabelle 5 zeigt eine vergleichende Zusammenfassung unterschiedlicher Matriceigenschaften für Thermoplaste und Duroplaste.

Tabelle 5: Vergleichende Zusammenfassung von Matriceigenschaften (Flemming, 1996)

Eigenschaft / Werkstoff	Thermoplast	Duroplast
Zug/ Druck/ Biegung	sehr hoch	
Schlagzähigkeit	sehr gut	gut
Kriechneigung	gering (polymerabhängig)	gering
Chemische Beständigkeit	gut (teilkristalline Thermoplaste)	gut
Wasseraufnahme	gering	relativ hoch
Brandverhalten	gut	schlecht
Recycling	möglich	eingeschränkt möglich

Diese Matrixsysteme vereint, dass sie bislang meist erdölbasiert sind, und somit aus einer endlichen Ressource gewonnen werden müssen. Der Einsatz von Biopolymeren aus pflanzlichen und tierischen Ölen, sowie anderen nachwachsenden Rohstoffen, ist bislang als eher gering einzuschätzen (Ehrenstein, 2006). Da also nicht nur die Kohlenstofffasern sondern auch die zumeist verwendeten Matrixpolymere aus Erdöl hergestellt werden, ist der ressourcenschonende Einsatz dieser Halbzeuge unbedingt notwendig, wenn er nicht vermeidbar ist.

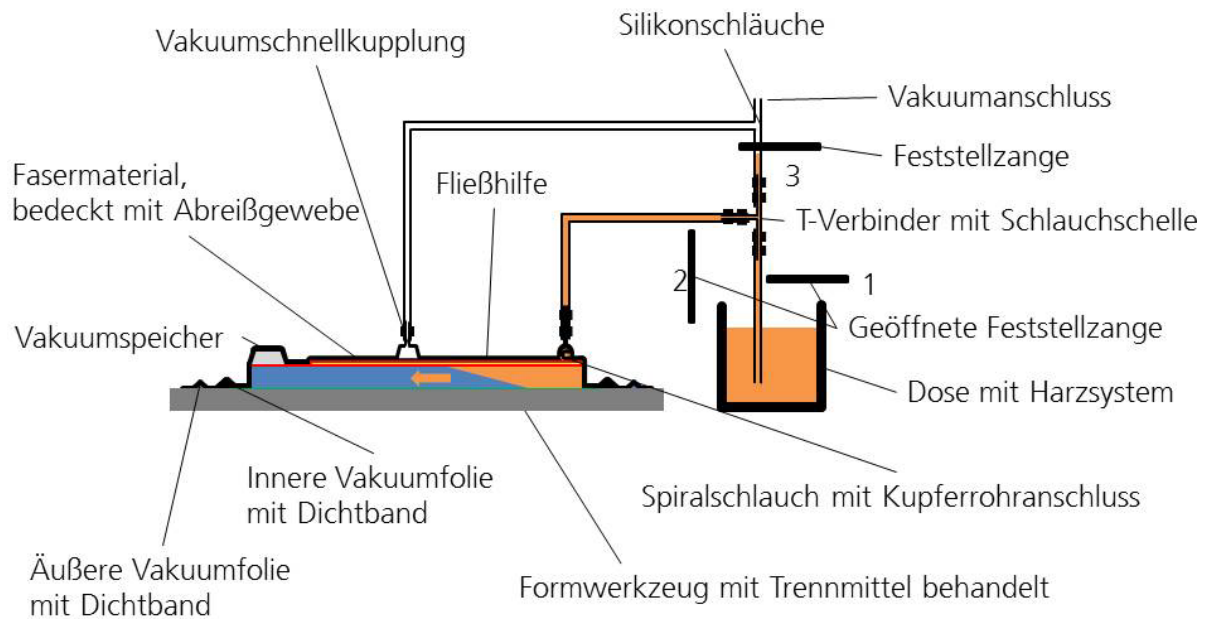
Das Recycling der Matrix bei Faserverbundwerkstoffen spielt bislang keine Rolle, da der Matrixwerkstoff im Vergleich zu den Kohlenstofffasern keine ökonomische Relevanz besitzt. Meist wird die Matrix der zuvor geschredderten Bauteile durch Pyrolyse oder extremes Abkühlen zerstört und anschließend entfernt (McConnell, 2010) (Meyer, et al., 2009) (Pannkoke, et al., 1998).

Als CO₂-Äquivalent von Epoxidharzen werden in der Literatur, welche Ökobilanzierung von Faserverbundstrukturen durchführt, Werte von 2,2 – 2,6 kg_{CO2}/kg_{Matrix} (Witik, et al., 2011) bis zu 4,68 kg_{CO2}/kg_{Matrix} (Patel, 2008) angegeben. Für die Berechnungen in dieser Arbeit wird im Folgenden ein Mittelwert von 3,5 kg_{CO2}/kg_{Matrix} verwendet.

Fertigungshilfsstoffe

Fertigungshilfsstoffe werden für die Herstellung von Faserverbundbauteilen benötigt, verbleiben aber nicht im fertigen Bauteil und tragen maßgeblich zur Entstehung von Abfällen in der Produktion bei. Dazu gehören:

- Folien (Vakuumfolie, Trennfolie, Membranen)
- Abreißgewebe (schafft klebe- und lackierfähige Oberflächen durch Aktivierung beim Entfernen)
- Breathergewebe (Vakuumverteilung, Aufnahme überschüssigen Harzes)
- Angusskanäle (Harzverteilung)
- Schläuche (Harzinfusionsleitungen, Vakuumleitungen, etc.)
- Schlauchschellen (Verbindungselemente)
- T-Stücke (Verbindungselemente) (siehe Abbildung 14)



Abreibgewebe zwischen innerer und äußerer Folie (nicht gezeigt)

Abbildung 14: Schematischer SLI-Aufbau mit allen Hilfsstoffen

In Abbildung 14 ist beispielhaft ein Fertigungsaufbau des Single-Line Injection-Verfahrens (SLI) dargestellt, um den Einsatz von Fertigungshilfsstoffen zu verdeutlichen. Die Ermittlung der CO₂-Äquivalente stellte teilweise eine Herausforderung dar, da entsprechende Daten nicht unmittelbar verfügbar waren. Für die meisten der verwendeten Hilfsstoffe wurde deshalb basierend auf einer Auflistung von CO₂-Äquivalenten von Basismaterialien (ecoinvent Centre, 2015) eine Abschätzung vorgenommen, um die CO₂-Äquivalente in 5.2.1 ff. zu errechnen.

2.5.1 Faserverbundfertigungsprozesse

Die Fertigung von Komponenten aus Faserverbundkunststoffen besitzt einige besondere Merkmale gegenüber Produktionsprozessen von z.B. metallischen Produkten. Im FVK-Fertigungsprozess wird neben den geometrischen Eigenschaften auch der Werkstoff selbst erzeugt, und damit auch die mechanischen Eigenschaften des Produktes.

Neben dieser charakteristischen Eigenschaft gibt es auch Parallelen zu den additiven Fertigungsverfahren („Additive Manufacturing“). Die Besonderheit der additiven Fertigungsverfahren ist, dass aus 3D-CAD-Daten („Computer-Aided-Design“) unmittelbar Produkte generiert werden können, ohne in einem Zwischenschritt eine aufwendige Produktionsplanung durchführen zu müssen. Meist wird das gewünschte Produkt in Schichten aufgebaut (Gibson, et al., 2012). Dies bedeutet auch, dass Material nur dort eingesetzt wird, wo es tatsächlich benötigt wird (Gu, et al., 2012). Diese Verfahren bieten demnach Potential für die

Produktherstellung mit minimaler Abfallproduktion als besonders ressourceneffiziente Herstellprozesse (Kellens, et al., 2010) (Morrow, et al., 2007 S. 932–943).

Eine Abgrenzung zum Kunststoffspritzgießen, welches zu den Urformprozessen gezählt wird, ist im speziellen Fall des Duroplast-Spritzgießens mit verstärkenden Füllstoffen nicht mehr möglich. Die Grenzen der Verfahren sind hier fließend. Dahingegen ist das Thermoplast-Spritzgießen, welches am weitesten verbreitet ist, ein typisches Urformverfahren bei dem der Werkstoff bereits vor dem Prozessieren vorliegt.

Die Faserverbundfertigung ist grundsätzlich ebenfalls ein solch generativer Fertigungsprozess, der theoretisch ein Null-Abfall-Potential bietet. Wenn Design und Herstellprozess optimal aufeinander abgestimmt sind, könnte ein Produkt aus Rohstoffen unter alleiniger Zuhilfenahme von Energie hergestellt werden, ohne dass stoffliche Abfälle entstehen. In der Realität generieren jedoch die meisten Produktionsprozessketten von Faserverbundwerkstoffen Abfälle. Meist sind dies Verschnitte der Rohstoffe/Halbzeuge oder Fertigungshilfsstoffe, die nach Verwendung entsorgt werden müssen. Häufig müssen auch ganze Bauteilbereiche nach der Aushärtung der Faserverbundkomponente durch Zerspanung entfernt werden, um die gewünschte Geometrie zu erhalten.

Um das Potential der Faserverbundwerkstoffe deutlich zu machen, sollten ihre Fertigungsprozesse im Wesentlichen auf ihre generativen Anteile hin betrachtet werden; d.h. welche Anteile an Material und Energie zur Erzeugung der gewünschten Produkteigenschaften hinzugefügt werden. Die Bewertung eines Fertigungsprozesses auf dieser Basis stellt den schonenden Umgang mit Ressourcen in den Vordergrund und begünstigt die Auswahl und Weiterentwicklung von Prozessketten, die so effizient mit den eingesetzten Ressourcen umgehen wie nur irgend möglich. Alle stofflichen und energetischen Anteile, die im Prozess auftauchen aber letztlich nicht im fertigen Bauteil enthalten sind, sind weder wertschöpfend noch effizient in Bezug auf den Einsatz von Ressourcen.

Die in Kapitel 2.4 genannten Merkmale von Faserverbundfertigungsprozessen, die bei einer Prozessaufnahme dokumentiert werden sollen, können unmittelbar auf ihre generativen Aspekte hin betrachtet werden.

Tabelle 6: Generative und nicht generative Anteile der Merkmale von FVK-Herstellungsprozessen

Merkmal	Generativer Anteil	Nicht generativer Anteil
Halbzeuge: - Fasermaterialien - Matrixwerkstoffe	- Menge an Fasern, die im Bauteil verbleibt - Menge an Matrixwerkstoff, die im Bauteil verbleibt	- Verschnitt beim Halbzeugzuschnitt - nach Aushärtung entfernte Bauteilbereiche - Matrix in Angusskanälen - nach Aushärtung entfernte Bauteilbereiche
Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe	-	- Alle Folien, Trennmittel, Schläuche etc.
Arbeitszeiten von technischem Personal	- Arbeitszeiten, die zur Erzeugung der Bauteileigenschaften notwendig sind	- Durch Fehlplanung entstehende Leerlaufzeiten
Anlagen und Anlagennutzungszeiten entsprechend deren Energieverbräuchen, besser gemessene Energieverbräuche	- Direkte Anlagennutzungszeiten - Wartungs- und Instandsetzungszeiten müssen anteilig einbezogen werden	- Unnötige Stillstandszeiten durch mangelnde Auslastung
Formwerkzeuge	- Formen zur Erzeugung der gewünschten Produkteigenschaften	- Hilfs- und Transportmittel
Emissionen toxischer Gase, Fluide oder anderen Abfalls	-	- Alle während der Herstellung entstehenden Abfälle und Emissionen

Der in Abbildung 15 schematisch gezeigte Ablauf der Fertigung eines FVK-Bauteils im Infusionsverfahren zeigt exemplarisch die häufig vorhandenen Kernprozesse. Diese Kernprozesse sind meist durch Transportwege verbunden, die nicht zur Erzeugung des Produktes beitragen. Weiterhin sind alle Haupt- und Zwischenlager dargestellt, die im Sinne des „lean manufacturing“ (Womack, et al., 1990) ebenfalls nicht wertschöpfend sind. Direkt messbare Abfälle und Energieverluste sind durch dunkelgraue Pfeile markiert.

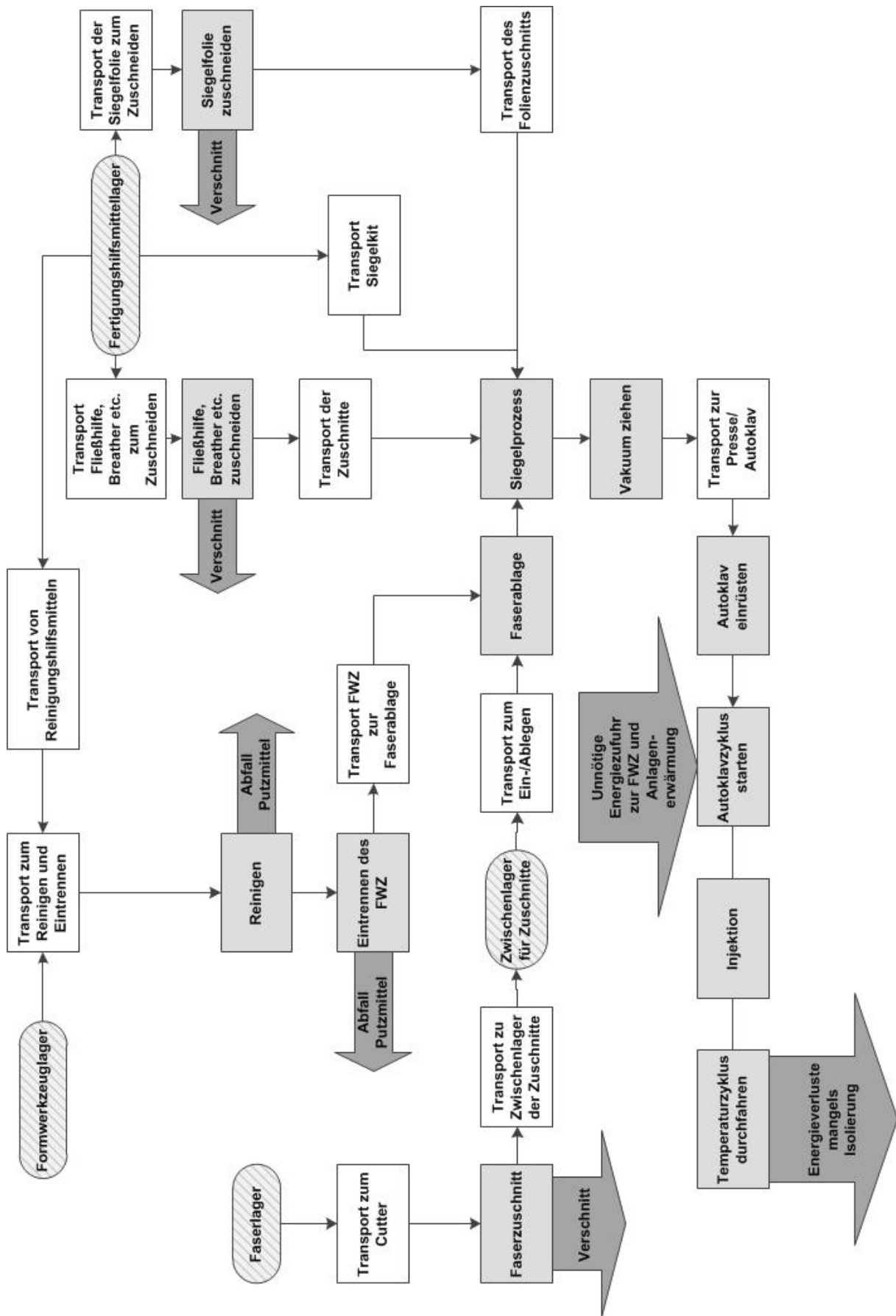


Abbildung 15: Prozessablaufdiagramm im Infusionsprozess

2.5.2 Thermische Prozesse in der Faserverbundfertigung / Energiebilanz

Verschiedene Schritte bei der Herstellung von Faserverbundbauteilen bedienen sich thermischer Prozesse. Mit thermischen Prozessen werden all jene Prozesse bezeichnet, die dem Prozess thermische Energie zuführen. Diese Energie wird entweder direkt in Form von Wärme bereitgestellt oder als elektromagnetische Strahlung, die im Bauteil oder Formwerkzeug wiederum in Wärme umgewandelt wird. Nicht in den thermischen Prozessen enthalten ist z.B. Energie, die in Form von komprimierter Luft zugeführt wird, um ein Faserpaket zu kompaktieren, oder solche, die zur Erzeugung eines Vakuums benötigt wird. Typische thermische Prozesse während der Herstellung von Faserverbundkomponenten sind z.B.:

- Aktivierung des Thermoplastbinders beim Preforming mittels Infrarotstrahlung (IR), Induktion oder Heißluft
- Erwärmung des Matrixsystems für Infiltrationsprozesse (SLI, „Resin Transfer Moulding“ (RTM), etc.) durch Öfen, Mikrowellen usw.
- Aushärtung (Polymerisieren der Kunststoffmatrix) durch Heißluft oder elektromagnetische Felder
- Tempern (Erhöhung der Glasübergangstemperatur) durch Heißluft oder elektromagnetische Felder
- Thermisches Trennen (Besäumen von Preforms mittels Laser und Endbearbeitung von Bauteilen)

Wärme kann in der Fertigung in verschiedener Form zur Verfügung gestellt werden. Dabei wird unterschieden zwischen:

- Konvektion
- Wärmeleitung
- Wärmestrahlung (Infrarot-Strahlung)

Zusätzlich können andere Frequenzbereiche des elektromagnetischen Spektrums verwendet werden, um Wärme zu erzeugen. Anwendung in der Faserverbundfertigung finden dabei bislang Frequenzen im Niederfrequenzbereich (1 Hz - 10 kHz (Ströhlein, 2012)), die mittels der Induktion von Wirbelströmen in elektrisch leitfähigen Fasern Wärme erzeugen (Ströhlein, 2012). Weiterhin wird für einige Anwendungen Mikrowellenstrahlung (300 MHz und 300 GHz (Danilov, 2012)) verwendet, die sich sowohl einer dielektrischen Erwärmung der Matrixkomponente als auch der ohmschen Erwärmung durch Leitungsverluste in den Kohlenstofffasern bedient. In Hinblick auf die Energieeffizienz der Prozesse bieten diese Technologien das Potential Werkstücke direkt zu erwärmen ohne ein Trägermedium zu nutzen,

was den Erwärmungsprozess weniger träge macht. Weiterhin kann auf diese Weise die unnötige Erwärmung von thermisch trägen Massen, wie Anlagentechnik und Formwerkzeugen umgangen werden.

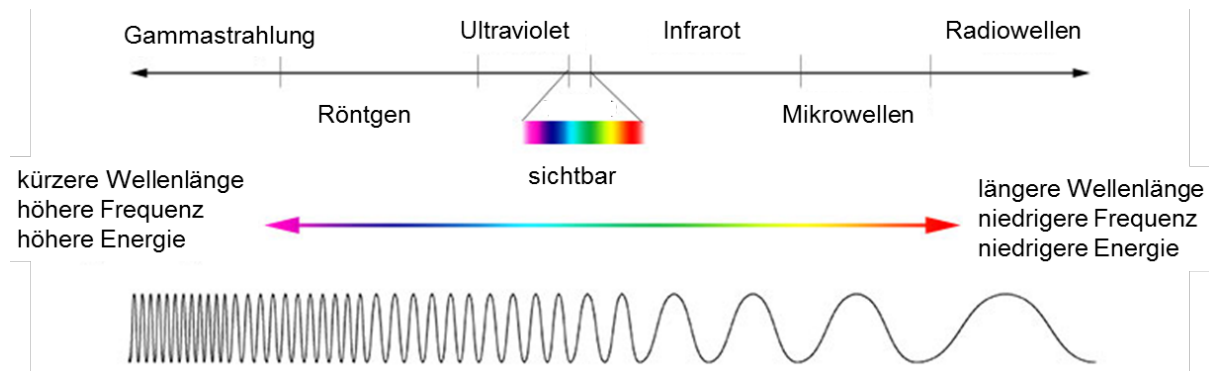


Abbildung 16: Elektromagnetisches Spektrum (NASA, 2013)

Über die Betrachtung der Energieflüsse der verschiedenen Teilprozesse hinaus, müssen auch die thermischen/energetischen Eigenschaften der anderen Prozessteilnehmer betrachtet werden. Besonderen Einfluss auf die Energiebilanz haben hierbei die Formwerkzeuge.

Thermische Eigenschaften der Formwerkzeuge

Neben den Prozessen, die Energie in den Teilprozessen zur Verfügung stellen, gilt den Formwerkzeugen besonderes Augenmerk. Formwerkzeuge, die je nach Fertigungsverfahren und Prozessschritt unterschiedlich ausgeführt sind, können wesentlichen Einfluss auf Energieaufwand und Materialeinsatz (beim FWZ) im Fertigungsprozess haben.

So sind für großflächige aber dünnwandige Bauteile mit niedriger thermischer Masse steife und dadurch meist massive Formwerkzeuge notwendig, damit die Formtreue des Werkzeuges während des thermischen Zyklus gewährleistet ist. Dies geht mit großen thermischen Massen einher, die die Energiebilanz und die Dauer des Fertigungsprozesses nach oben treiben.

Um die großen thermischen Massen zu reduzieren, gibt es Bestrebungen Formwerkzeuge in Ofen- und Autoklavprozessen besonders leicht zu bauen, durch Rippen zu versteifen und gleichzeitig mit Hilfe von Luftleitblechen den konvektiven Wärmeeintrag zu maximieren.

Für strahlungsbasierte Heizverfahren bieten sich Werkstoffe für Formwerkzeuge an, die transparent für den jeweils verwendeten Frequenzbereich sind und auf diese Weise die Energie auch von der Werkzeugseite direkt zum Bauteil vordringen lassen. Gleichzeitig können sie thermisch isolierend wirken, um die Wärmeabgabe des Bauteils durch Wärmestrahlung oder Konvektion zu verringern, um so den Energiebedarf zu minimieren (Danilov, 2012).

3 Sind etablierte Methoden auf die Bewertung von Fertigungsprozessen für Faserverbundwerkstoffe anwendbar?

In diesem Kapitel wird zunächst der Stand der Forschung zur Effizienzbewertung von Fertigungsprozessen im Allgemeinen dargelegt. In Kapitel 3.2 wird anschließend spezifisch auf aktuelle Arbeiten zum Thema Ökobilanzierung, Ökoeffizienz und Ressourceneffizienz von Herstellverfahren für FVK eingegangen. Kapitel 3.2 prüft, ob der Stand der Forschung auf die Bewertung von Fertigungsprozessen für Faserverbundwerkstoffe anwendbar ist

3.1 Effizienzbewertung von Fertigungsprozessen

Eine Möglichkeit Fertigungsprozesse zu bilanzieren stellen die sogenannten Leistungskennzahlen (Key Performance Indicators (KPI)) dar. Als Leistungskennzahlen werden in der Betriebswirtschaftslehre allgemein Kennzahlen bezeichnet, die sich auf den Erfolg, die Leistung oder Auslastung des Betriebs, seiner einzelnen organisatorischen Einheiten oder einer Maschine beziehen. (Wirtschaftslexikon, 2014).

Klassische Leistungskennzahlen für Produktionsprozesse betrachten jedoch meist keine ökologischen Kenngrößen und sind bislang häufig nicht energiebezogen (Bunse, et al., 2011). Neuere Ansätze entwickeln Leistungskennzahlen hingegen unmittelbar zur Steigerung der Energieeffizienz (Maya, et al., 2015). Auch werden vereinfachte Ökobilanzen auf Basis ausgewählter Leistungskennzahlen sowohl für die Zementindustrie (Feiza, et al., 2015) als auch für die Stahlherstellung durchgeführt (Mesa Fernández, et al., 2016 S. 89-102).

Um die Messung des Energieverbrauchs zu standardisieren, muss davon ausgegangen werden, dass die Teilprozesse bei jeder Wiederholung eines Prozesses gleich sind. Die parallele Betrachtung der Zykluszeit und des korrespondierenden Energieverbrauches von Teilprozessen ist hier plausibel. Aus den sich daraus ergebenden Messwerten kann die Energieaufnahme pro Bauteil abgeleitet werden, und darüber hinaus die energetische Relevanz einzelner Prozessabschnitte. Sind Relationen zwischen den spezifischen CO₂-Emissionen der verwendeten Energieträger bekannt, sowie das Gewicht des Produktes, können weitere Leistungskennzahlen wie der CO₂-Fußabdruck bestimmt werden (Bogdanski, et al., 2012). Diese Vorgehensweise kann jedoch nur bei Prozessen mit sehr hoher Wiederholbarkeit angewendet werden. Die Herstellung von Faserverbundbauteilen ist mit der Nutzung vielfältiger Anlagen, Hilfsstoffe und Formwerkzeuge (FWZ) verbunden, die sich bislang nicht unmittelbar aus dem Bauteilgewicht oder seiner Geometrie ableiten lassen.

Bzgl. der Energieeffizienz von Fertigungsprozessen für warmgewalzten Stahl setzt Zein theoretisch berechnete Werte mit theoretisch technisch erreichbaren und gemessenen Energiebedarfswerten ins Verhältnis, um energetische Einsparpotentiale in der Produktion aufzuzeigen (Zein, 2012). So nutzt er analytisch berechnete Energiebedarfe als Optimum, welche es nach Möglichkeit zu erreichen gilt.

Es gibt Ansätze für systematische Methoden, um die Energie- und Ressourceneffizienz in Produktionsunternehmen zu steigern. So stellt Thiede ein dreistufiges Konzept vor, welches im ersten Schritt sogar ohne detailliertes Wissen um die Energieaufnahme einzelner Verbraucher auskommt.

1. Aufstellen einer Maschinenliste und der benötigten technischen Ausstattung eines Produktionssystems inklusive Produktionsmaschinen und verwendeter technischer Gebäudeausrüstung mit deren nominellen Verbrauchswerten (laut Maschinendatenblatt) und jährlichen Betriebszeiten.

Mit Hilfe von (1) kann ein Energieverbrauchswert leicht berechnet werden. Die Sortierung der Maschinen nach diesen Werten kann bereits potentielle Energietreiber aufzeigen.

$$W = P * t \quad (1)$$

mit: W = Arbeit / Energieverbrauch; P = Leistungsaufnahme; t = Zeit / Nutzungsdauer

2. Aufstellen eines Energie-Portfolios, Einteilung der Maschinen in 4 Gruppen
 - a. Hoher Energiebedarf + geringe Laufzeit
 - b. Hoher Energiebedarf + hohe Laufzeit
 - c. Niedriger Energiebedarf + hohe Laufzeit
 - d. Niedriger Energiebedarf + niedrige Laufzeit

Diese Aufstellung impliziert, dass sowohl Maschinen mit hohem Energiebedarf und kurzen Laufzeiten, als auch Maschinen mit niedrigem Energieverbrauchsniveau bei langen Laufzeiten einen großen Hebel besitzen Energie einzusparen. Während bei Maschinen hohen Energieverbrauchs detaillierte Messungen zum Verständnis des Auftretens hoher Energieverbräuche angestrebt werden sollten, sind diese bei Maschinen mit niedrigem Verbrauchsniveau bei hohen Laufzeiten meist nicht sinnvoll. Jedoch lassen sich hier oft mit relativ geringen Investitionen Verbesserungen erzielen, die durch kurze Amortisationszeiten besonders attraktiv sind.

3. Aktualisierung der Maschinenliste, diesmal auch mit gemessenen mittleren Energieverbrauchswerten (evtl. besseren Messmethoden), führt zu einer kontinuierlichen Aktualisierung des Energieportfolios, aus dem wiederum mögliche neue Hotspots

hervorgehen. Nach Verbesserung gibt es nun vielleicht andere relativ kritische Energieverbraucher (Thiede, 2012).

Die bereits erwähnten Anlagen, Hilfsstoffe und Formwerkzeuge, die häufig spezifisch für ein ganz bestimmtes Bauteil aus Faserverbundkunststoff abgestimmt sind, werden in einer solchen Betrachtung nicht berücksichtigt. Die Anwendung der oben genannten Systematik auf Hilfs- und Verbrauchsgüter stellt eine sinnvolle Vorgehensweise dar diese vollständig zu erfassen und zu analysieren.

Reinhardt stellt in ihrer Arbeit eine Methode zur Bewertung der Ressourceneffizienz von Fertigungsprozessen vor, die konform mit der Ökobilanzierung nach DIN 14040 ist und für alle Arten von Fertigungsprozessen anwendbar sein soll (Reinhardt, 2014). Sie verweist darauf, dass bisherige Arbeiten entweder nur spezielle Prozesse betrachten, oder lediglich die Energieeffizienz der Fertigungsprozesse analysiert wird. Reinhardt schlägt ein Bewertungskriterium für die Ressourceneffizienz vor, das sich aus zwei Komponenten, der Materialeffizienz und der Energieeffizienz, zusammensetzt. Dies ermöglicht grundsätzlich die allgemeine Bewertung von Fertigungsprozessen unter ökologischen Aspekten. Sie beschränkt sich hinsichtlich der betrachteten Produktionsfaktoren nach Gutenberg (Gutenberg, 1983) auf die Repetierfaktoren, also Rohstoffe, Hilfsstoffe, Betriebsstoffe und auch Energie, die in die Bewertungskennzahl einfließen. Eine wirtschaftliche Betrachtung findet nicht statt.

In der vorliegenden Arbeit werden zur ökologischen Bewertung der Fertigungsprozesse für Faserverbundkunststoffe ebenfalls die Repetierfaktoren aufgenommen und in ein Bewertungskriterium einfließen gelassen (siehe Kapitel 4). Darüber hinaus werden in der vorliegenden Arbeit, bzw. bei der Datenaufnahme in der Fertigung sowohl die Kosten der Repetierfaktoren dokumentiert, als auch jene der Potentialfaktoren (Anlagen und menschliche Arbeitszeit). Dies ermöglicht neben einer Bewertung der Ressourceneffizienz eine Abschätzung der ökonomischen Relevanz eines Fertigungsverfahrens.

3.2 Ökoeffizienz von Faserverbundwerkstoffen

Durch die hohe Bedeutung von Energie- und Ressourceneffizienz nimmt der Stellenwert von Leichtbau branchenübergreifend immer weiter zu. Daher werden neben traditionellen Konstruktionswerkstoffen wie Aluminium oder hochfesten Stählen zunehmend hochfeste Faserverbundkunststoffe eingesetzt (Lässig, et al., 2012). Diese Aussage von Lässig zeigt sich ebenso im Stand der Forschung von Faserverbundwerkstoffen in punkto Ökoeffizienz, Nachhaltigkeit oder Ökobilanzierung, da auch diese Werkstoffe zunehmend Rechenschaft über ihre ökologischen Vorteile ablegen müssen. Die Übersicht in Tabelle 7 zeigt, dass bisherige Betrachtungen von Faserverbundwerkstoffen hinsichtlich ihrer Ökoeffizienz, Ressourceneffizienz

oder Ökobilanz meist auf die Nutzungsphase von Komponenten oder Produkten aus FVK abzielen. Zwar berücksichtigen Deng, Das, Witik, Ribeiro und auch Suzuki die Fertigungsprozesse von FVK, jedoch werden nur Produktionsprozesse als Ganzes betrachtet. Song bricht den Herstellungsprozess als einziger herunter und schlüsselt ihn nach Materialien, Anlagen und Hilfsstoffen auf. Er rechnet mit Energieäquivalenten und bewertet die Herstellungsprozesse selbst nicht, sondern analysiert potentielle Energieeinsparungen bei der Anwendung in verschiedenen Transportanwendungen.

Tabelle 7: Stand der Forschung zur Ökoeffizienz von Faserverbundwerkstoffen

Quelle	Inhalt	Ergebnisse
(Deng, 2014)	Vor- und Nachteile von Bio-Verbundwerkstoffen. LCA der Flachfaserherstellung, LCA der Biopolymerherstellung. Herstellungsprozess wird auf Erreichen von mechanischen Werkstoffeigenschaften hin betrachtet. Spezifischer Energieverbrauch verschiedener Fertigungsprozesse ist zusammengetragen	Ein Großteil der im Fertigungsprozess aufgewendeten Energie wird zur Aufrechterhaltung von Temperatur und Druck im Prozess benötigt
(Duflou, et al., 2014)	LCA Studie zum Vergleich von Flachfasern versus Glasfasern in FVK bezogen auf Injektionsverfahren und Pressenverfahren - Cradle-to-Grave-Analyse	Vergleich der ökologischen Auswirkung der zwei Faserarten in Bezug auf ihre mechanische Leistungsfähigkeit. Betrachtung von 2 spezifischen Fertigungsprozessen
(Rosa, et al., 2013)	Anwendung von LCA zur Verbesserung der Ökoeffizienz von GFK durch Austausch eines Anteils von Glasfasern durch Hanfmatten	Die Ökoeffizienz von GFK kann durch die Substitution von Glasfasermatten durch Hanfmatten verbessert werden. Dies basiert wesentlich auf der "grünen Herkunft" der Hanfmatten
(Ribeiro, et al., 2013)	Ökoeffizienzanalyse eine Glasfaserpultrusionsprozesses	Lösungsansätze zur Erhöhung der Ökoeffizienz der Glasfaserpultrusion durch Energieeinsparungen bei der Aushärtung und Recycling von GFK-Abfällen
(Liu, 2013)	LCA von A319 und Boing737 unterteilt in Produktion, Nutzung, EOL und Gesamt-LCA	Herstellung wird als "Bereitstellung" von FVK-Komponenten eines Flugzeuges angesehen, die in der Nutzungsphase Spritverbrauchsreduktion ermöglichen.
(Duflou, et al., 2012)	Tabelle mit Vergleich kumulierter Energieaufwand (KEA), Emissionen und Ecopoints verschiedener Faser- und Matrixmaterialien und Fertigungsprozesse, Übersicht verschiedener LCAs für FVK-Bauteile.	Zitat Duflou: „Die Beziehung der ökologischen Auswirkungen zwischen Herstellungs- und Nutzungsphase sind nicht offensichtlich und sollten in Einzelfallstudien untersucht werden.“

(Witik, et al., 2011)	Vergleich von 5 Fertigungsszenarien - Kosten und LCA mit SIMAPro. CFK-Platte 400 x 400 x 4 mm: Prepreg im Autoklav, Prepreg im Ofen, Prepreg im Mikrowellenofen, Harzinfusionsverfahren im Ofen, Harzinfusionsverfahren im Mikrowellenofen.	Kosten und CO ₂ Äquivalente für jede Platte. Energie ist Treiber bei ökologischer Performance, nicht bei ökonomischer. Kohlenstofffasern tragen größten Anteil zu den Emissionen bei.
(Das, 2011)	Vergleich von 5 Szenarien für eine PKW Bodengruppe, Stahl, PAN-basierte und Lignin-basierte Kohlenstofffasern, jeweils mit SMC und P4 Prozess gefertigt - Cradle-to-Gate-Analyse.	Vergleich der 5 Szenarien mit Variation der Fasertypen und Fertigungsprozesse (SMC und P4) aber ohne Aufgliederung der Fertigungsprozesse. Es werden nur Hauptenergieverbraucher der Fertigungsprozesse einbezogen.
(Duflo, et al., 2009)	Vergleichende LCA Studie zwischen kommerziellen VW Lupo und einem Lupo mit CFK Karosserie, Fokus auf Produktion und EOL und Energieverbrauch in der Nutzungsphase	4-mal höhere ökologische Auswirkungen der Produktions- und EOL-Phase der CFK-Karosserie gegenüber einer Stahlkarosserie. Nach einer Nutzungsdauer von 132.000 km werden die Nachteile durch Einsparungen beim Benzinverbrauch kompensiert, so dass die CFK-Struktur für eine angenommene Nutzungsdauer von 200.000 km eine bessere Bilanz hat als die Stahlstruktur. Innovationen bei der Kohlenstofffaserproduktion zur Reduzierung der Energieintensität hätten größten Einfluss auf die Reduzierung der ökologischen Auswirkungen.
(Song, 2009)	Ökobilanz von Glasfaserpultrusionsprofilen. Detaillierte Ausschlüsselung des Fertigungsprozesses in Materialien, Hilfsstoffe und Anlagen. Rechnung mit Energieäquivalenten	Die Fertigung von Glasfaserpultrusionsprofilen ist sehr energieintensiv. Speziell die Nutzungsphase führt jedoch zu Energieeinsparungen von Lastkraftwagen oder Omnibussen in denen Stahl durch Faserverbundkomponenten ersetzt wird.
(Van Acker, et al., 2009)	LCA von PKW Karosserie: Stahl gegenüber CFK	Ökobilanz Cradle-to-Grave. Fertigungsprozesse werden nicht detailliert betrachtet.
(Umair, 2006)	LCA für eine Schiffsstruktur	Cradle-to-Grave-Betrachtung. Fertigung wird berücksichtigt, aber nur in Form der verarbeiteten Materialien. Fertigungsprozesse werden nicht betrachtet. Nutzungsphase und Recycling stehen im Fokus.
(Suzuki, et al., 2005)	Darstellung der Energieintensität verschiedener Fertigungsverfahren (Quelle unklar).	Fertigungsprozesse werden über ihre Energieintensität berücksichtigt aber nicht weiter bewertet oder betrachtet. Herkunft der Daten der Fertigungsprozesse ist nicht erläutert.

3.3 Handlungsbedarf

Die Darstellung des Standes der Forschung macht deutlich, dass sich aktuelle Arbeiten zur Ökoeffizienz und Ökobilanzierung von Faserverbundwerkstoffen hauptsächlich mit den Einsparpotentialen während der Nutzungsphase von Produkten aus diesem Werkstoff beschäftigen. In einigen Fällen wird für ein konkretes Produkt ein spezifischer Fertigungsprozess analysiert, um den Produktionsprozess in der Ökobilanz zu berücksichtigen. Eine umfassende methodische Analyse der Produktionsprozessketten, um diese untereinander bewertbar zu machen gibt es bislang nicht. Die Fertigungsprozesse für Faserverbundwerkstoffe sind sehr vielfältig und meist können Produkthanforderungen durch mehr als eine Produktionsprozesskette erfüllt werden. Um die ökologischen Auswirkungen der verschiedenen Prozessketten für FVK-Komponenten abzuschätzen sind zwar entsprechende Hilfsmittel vorhanden, jedoch wurden diese bisher nicht an die Fertigungsprozesse von Faserverbundwerkstoffen adaptiert. Deswegen schlägt diese Arbeit eine Methodik zur Modellierung und Analyse von Fertigungsprozessketten für Faserverbundkunststoffe vor. Diese Methodik ermöglicht den Vergleich von Prozessketten miteinander. Darüber hinaus wird ein Kriterium vorgeschlagen, welches eine Bewertung von Fertigungsprozessen unabhängig von Bauteilgröße oder –Komplexität und dem Fertigungsszenario, Stückzahlen und Bauteilgröße, ermöglicht. Im Rahmen dieser Arbeit werden außerdem für verschiedene Bauteile und Fertigungsprozesse Daten erhoben, um die Wirksamkeit von Methode und Bewertungskriterium zu prüfen

4 Ein Effizienzkriterium für Faserverbundfertigungsprozesse

Es ist das Ziel dieser Arbeit ein Werkzeug für die Bewertung der Herstellprozesse von Faserverbundwerkstoffen bereitzustellen. Dieses Werkzeug besteht aus zwei Komponenten:

1. Eine Methodik für die Modellierung von Faserverbundfertigungsprozessen
2. Ein Effizienzkriterium für die Bewertung von Faserverbundfertigungsprozessen

Dafür ist zunächst eine detaillierte Analyse der Herstellprozesse notwendig, um aus ihnen ein allgemeingültiges Modell der Fertigungsprozesse abzuleiten. Aufgrund der großen Vielfalt der Herstellungsprozesse von Faserverbundbauteilen ist deren detaillierte Abbildung in einem Modell besonders wichtig. Nur so kann mit Hilfe eines Bewertungswerkzeuges ihre Effizienz bewertet werden, um anschließend die Ressourceneffizienz des Herstellungsprozesses eines Bauteils zu maximieren.

Die detaillierte Modellierung der Fertigungsprozesse kann ein wichtiger Bestandteil für die Aufstellung einer Ökobilanz sein, und in diese integriert werden. Nach Leohold macht der Fertigungsprozess zwar lediglich ca. 5 % des CO₂-Äquivalents eines Bauteils aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff aus (Leohold, 2011), jedoch werden lediglich die Äquivalente von Epoxid-Matrix, PAN-Faser und Stabilisierung/Carbonisierung ins Verhältnis zur Produktion gesetzt. Ähnliche Verhältnisse zeigt auch Suzuki, wobei der Fertigungsprozess je nach Variante 1 – 5 % des kumulierten Energiebedarfs eines Bauteils aus FVK ausmacht (Suzuki, et al., 2005). Bei Duflou beträgt der kumulierte Energieaufwand des Fertigungsprozesses zwischen 0,36 % und 7,6 % der Gesamtsumme (Duflou, et al., 2012). Nur für den Spritzgussprozess kann Duflou Angaben zu CO₂-Äquivalenten machen. Bei dieser Prozessvariante hat der Fertigungsprozess einen Anteil von 1,2 – 2,9 %.

Keine Quelle berücksichtigt, dass ein effizienterer Produktionsprozess die Abfälle der Materialien minimieren kann, und so einen deutlich höheren Einfluss bekommen kann, als es die rund 5 % suggerieren. Deswegen wird die Fertigungsprozesskette aus dem gesamten Produktlebenszyklus als Gate-to-Gate-Analyse (siehe Kapitel 2.2) freigeschnitten.

Ein Kriterium für die Bewertung der Fertigungsprozesse von Bauteilen aus Faserverbundwerkstoffen muss alle Merkmale enthalten, die für die Herstellung eines solchen Bauteils relevant sind (siehe Kapitel 2.4). Nur wenn alle diese Merkmale enthalten sind, ist eine ganzheitliche Betrachtung möglich. In Kapitel 2.2 wird erläutert, dass sich die Eingangs- und Ausgangsgrößen eines Systems allgemein in den drei Kategorien, Stoff, Energie und Information abbilden lassen. Entsprechend lassen sich auch die Merkmale eines Bewertungskriteriums gliedern.

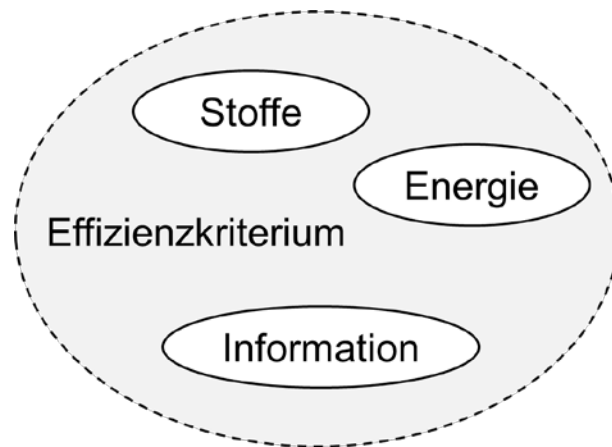


Abbildung 17: Allgemeine Bestandteile eines Effizienzkriteriums

Das Bewertungskriterium sollte deshalb sowohl die **Stoffe** (Halbzeuge wie Fasern, Matrices und Hilfsstoffe), als auch die **Energie** (für die Vernetzung der Polymere bzw. deren Erweichung) beinhalten. Insbesondere die Hilfsstoffe, die oftmals für die Fertigung unerlässlich sind, aber letztendlich nicht Bestandteil des fertigen FVK-Produktes sind, werden häufig außer Acht gelassen. Weiterhin müssen auch Fertigungsräume, die ggf. klimatisiert sind (Energie), Tiefkühl- und andere Lager und dergleichen mit einbezogen werden. Die dritte Kategorie **Information** spiegelt sich beispielsweise in den Prozessparametern der Anlagentechnik (bzw. deren Nutzungsdauer) wieder, die sich wiederum in deren Energieverbrauch niederschlagen. Aus diesem Grund werden Informationen in dieser Arbeit nicht separat betrachtet, sondern ihre physikalisch messbaren Auswirkungen.

Bei allen zu einem Effizienzkriterium beitragenden Merkmalen spielt insbesondere ihr Verhältnis von Anteilen (Materialien, Energie, usw.) eine Rolle, die zur Bauteilentstehung beitragen, gegenüber den Anteilen, die später nicht im Bauteil verbleiben und damit nicht unmittelbar zu dessen Wert oder Funktion beitragen. Ein besonders ressourceneffizienter Fertigungsprozess benötigt minimale stoffliche und energetische Inputs und setzt bestenfalls alle Inputs in die Prozesskette im Endprodukt um, so dass sie zu den gewünschten Produkteigenschaften beitragen. Dies sagt grundsätzlich nichts über die insgesamt benötigte Menge an Ressourcen aus, da diese wiederum vom Produkt abhängig ist.

Beispielsweise benötigt ein Bauteil mit einer Masse m und einer spezifischen Wärmekapazität c_V eine bestimmte Wärmemenge Q um die Vernetzungstemperatur seines Matrixsystems zu erreichen, wobei ΔT die Temperaturdifferenz ist.

$$Q = c_V * m * \Delta T \quad (2)$$

Diese Wärmemenge Q kann durch ein beliebiges Heizsystem bereitgestellt werden, welches z.B. aus elektrischer Energie Wärme generiert, die beispielsweise konvektiv in das Bauteil eingebracht werden kann. Jedoch kommt es bereits bei der Umwandlung elektrischer Energie in Wärme, z.B. durch Heizpatronen, zu Verlusten. Weiterhin ist auch der Energieeintrag von Wärme mittels Konvektion verlustbehaftet. Ist die Energie im Bauteil angekommen, gibt es nun wiederum energetische Verluste vom Bauteil an die Umgebung, die umso höher ausfallen je höher die Bauteiltemperatur ist. Die Verluste setzen sich immer aus Konvektion, Wärmestrahlung und Wärmeleitung zusammen (siehe Abbildung 18).

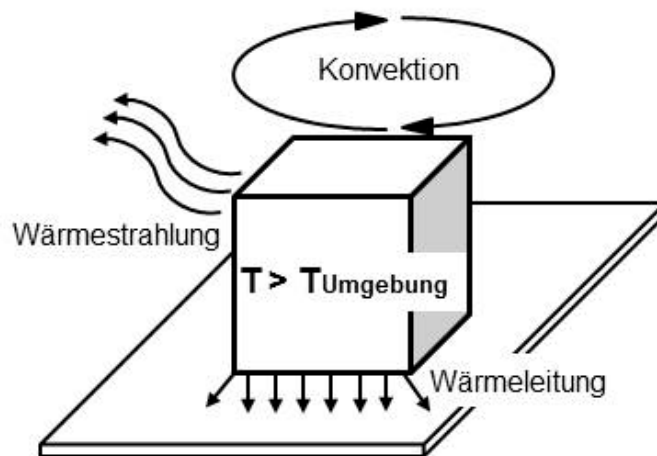


Abbildung 18: Energieverluste an die Umgebung

In dieser Arbeit soll der Begriff des **generativen Anteils** eines Fertigungsprozesses geprägt werden.

Der generative Anteil eines Prozesses entspricht dem Verhältnis der wertschöpfend in einem Prozess umgesetzten Anteile von Energie, Stoff oder Information, die am Ende im Produkt verbleiben, gegen über der Gesamtmenge der in den Prozess eingebrachten Anteile. Bei vollständiger Umsetzung wäre der Quotient entsprechend eins, wenn kein Anteil wertschöpfend zur Bauteilherstellung beiträgt, wird der Quotient null. Die Bildung dieses Verhältnisses hat den Vorteil, dass die Bewertung eines Fertigungsprozesses unabhängig von Bauteilgröße oder Stückzahl ist und damit universell auf alle Produktionsszenarien angewendet werden kann. Der direkte Vergleich von Prozessen oder Varianten von Prozessen ist jedoch nur dann sinnvoll, wenn gleiche Bauteilszenarien, d.h. Stückzahlen und Bauteilgröße und -komplexität miteinander verglichen werden.

Dem generativen Anteil eines Prozesses steht der **nicht generative Anteil** gegenüber, der als das Verhältnis der Abfälle (Energie, Stoff, Information) gegenüber den gesamten dem Prozess zugeführten Inputs definiert wird. Dieser soll in die Definition des Effizienzkriteriums einfließen.

Um als Effizienzkriterium ein Maß zu erhalten mit dem sich Fertigungsprozesse schnell und einfach vergleichen lassen, bietet es sich an, die nicht generativen Anteile der einzelnen Bestandteile der Fertigung zu verwenden, da der nicht generative Anteil kleine Werte für eine geringe Effizienz annimmt. Diese Anteile werden zunächst mit ihrem jeweiligen CO₂-Äquivalent multipliziert, um sie nach ihrer Umweltverträglichkeit zu gewichten. Anschließend werden die Anteile aufsummiert (siehe (3)) und ergeben EK₁. Nimmt das Effizienzkriterium große Werte an, deutet dies auf ein hohes Verhältnis von nicht wertschöpfend eingesetzten Ressourcen, gegenüber den am Eingang des Prozesses eingespeisten Ressourcen, hin. Die Ressourceneffizienz eines solchen Prozesses ist gering. Alternativ ist es auch möglich, dass alle verwendeten Materialien, Anlagen etc. sehr hohe CO₂-Äquivalente besitzen und es trotz effizientem Ressourceneinsatz zu großen Werten für EK₁ kommt. Ein besonders ressourceneffizienter Prozess besäße ein EK₁ von Null, da die Zähler aller Summanden, also die „Abfälle“ gleich Null wären.

$$EK_1 = \frac{Faser_{OUT}}{Faser_{IN}} * CO_{2Faser} + \frac{Matrix_{OUT}}{Matrix_{IN}} * CO_{2Matrix} + \sum_{i=1}^n \frac{Hilfsstoff\ i_{OUT}}{Hilfsstoff\ i_{IN}} * CO_{2Hilfsstoff\ i} + \sum_{i=1}^n \frac{Energie\ i_{OUT}}{Energie\ i_{IN}} * CO_{2Anlage\ i} \quad (3)$$

Faser _{IN} =	Menge der Fasermaterialien, die in den Prozess fließt
Faser _{OUT} =	Menge der Fasermaterialien, die Abfall ist
Matrix _{IN} =	Menge der Matrixwerkstoffe, die in den Prozess fließt
Matrix _{OUT} =	Menge der Matrixwerkstoffe, die Abfall ist
Hilfsstoff _{IN} =	Menge der Hilfsstoffe, die in den Prozess fließt
Hilfsstoff _{OUT} =	Menge der Hilfsstoffe, die Abfall ist
Energie n _{IN} =	gesamter Energieverbrauch einer Anlage i
Energie n _{OUT} =	Energieverbrauch einer Anlage i, der nicht unmittelbar zu den Produkteigenschaften beiträgt

Risikofaktor

Jeder Bestandteil eines Fertigungsprozesses und somit des Effizienzkriteriums stellt potentiell ein Risiko bei der Herstellung eines Produktes dar. Risiko bedeutet in diesem Falle, dass es eine

gewisse Wahrscheinlichkeit gibt, dass ein Bauteil Ausschuss ist. Dieses Risiko kann z.B. durch Imperfektionen im Material, der Sicherheit, mit der dem Prozess Energie bereitgestellt wird oder der Qualität von Hilfsstoffen entstehen. Deshalb wird ein Risikofaktor definiert, welcher in EK_1 (3) noch nicht enthalten ist. Dieser Risikofaktor ist ein Maß für das Risiko eines Bestandteiles des Effizienzkriteriums in einem Teilprozess oder der Prozesskette Ausschuss zu erzeugen. Der Risikofaktor wird jedem Summanden der Gleichung vorangestellt und spiegelt die Prozesssicherheit, bzw. die Ausfallquote, eines Prozesses durch die Verwendung des entsprechenden Materials, der Anlage oder Hilfsstoffe wider (siehe (5)).

Der Risikofaktor kann beispielsweise nach (4) ermittelt werden, was in einer Serienfertigung einfach umsetzbar ist, da Ausschussraten in der Regel ohnehin ermittelt werden.

$$R = 1 + \frac{Bauteile_{Ausschuss}}{Bauteile_{gesamt}} \quad (4)$$

Mit (4) ergibt sich dann aus (3):

$$\begin{aligned} EK_2 = & R_{Faser} * \frac{Faser_{OUT}}{Faser_{IN}} * CO_{2Faser} + R_{Matrix} * \frac{Matrix_{OUT}}{Matrix_{IN}} * CO_{2Matrix} \\ & + \sum_{i=1}^n R_{Hilfsstoff\ i} * \frac{Hilfsstoff\ i_{OUT}}{Hilfsstoff\ i_{IN}} * CO_{2Hilfsstoff\ i} \\ & + \sum_{i=1}^n R_{Anlage\ i} * \frac{Energie\ n_{OUT}}{Energie\ n_{IN}} * CO_{2Anlage\ i} \end{aligned} \quad (5)$$

Der Risikofaktor spielt eine große Rolle, da Ausschussbauteile die zu erzielenden Bauteileigenschaften nicht erfüllen und deswegen den Prozessabfällen zugerechnet werden müssen. Dies bedeutet, dass alle bis zum Zeitpunkt der Definition des Bauteils als Ausschuss im Bauteil verarbeiteten Eingänge (Stoff und Energie) nicht generativ zur Erzeugung der Bauteileigenschaften beitragen. Im Gegenteil erhöhen sie die Menge an notwendigen Materialien, Energie etc. und verschlechtern damit signifikant die Bilanz des Fertigungsprozesses. Der Risikofaktor wird in dieser Arbeit nicht weiter betrachtet, da nur durch die Erfassung zahlreicher Prozesse das Risiko einzelner Prozessteilnehmer ermittelt werden kann. Dies kann im Rahmen dieser Arbeit nicht erfasst werden, da zwar repräsentative Fertigungsprozesse analysiert werden, der Labormaßstab jedoch keine ausreichend großen Serien zulässt, um charakteristische Ausfallquoten zu ermitteln.

Hypothese

Die Minimierung des nicht generativen Anteils im Fertigungsprozess kann die Ressourceneffizienz der Fertigungsprozesse von Faserverbundbauteilen verbessern.

Arbeitshypothesen:

1. Zur Maximierung des generativen Anteils muss der Faserverbundprozess detailliert hinsichtlich aller Stoff- und Energieströme dokumentiert und in Teilprozesse zerlegt werden.
2. Mit Hilfe von Infrarot-Videoaufzeichnung können relevante Daten, wie Prozesszeiten, Materialflüsse und Energien dokumentiert, und gleichzeitig die Gefahr der Mitarbeiterüberwachung minimiert, werden.
3. Es kann ein allgemeingültiges Modell gebildet werden, welches alle möglichen Varianten von Fertigungsprozessen für Faserverbundbauteile abbilden kann.
4. Die Allgemeingültigkeit des Modells für Faserverbundfertigungsprozesse kann mit Hilfe von realen Fertigungsprozessen, die Varianten des Ausgangsprozesses oder völlig neue Prozesse darstellen, validiert werden.

5 Bilanzierung von Faserverbundfertigungsprozessen

Um eine allgemein gültige Basis für die Modellierung von Fertigungsprozessen zu erhalten, ist die Auswahl geeigneter Faserverbundbauteile und ihrer Fertigungsprozesse entscheidend. Die gefertigten Komponenten sollen einen repräsentativen Komplexitätsgrad besitzen und die Fertigungsprozesse eine möglichst hohe Wiederholgenauigkeit. Zudem muss der gewählte Fertigungsprozess die in Kapitel 2.4 definierten Charakteristika besitzen.

Der Prozess muss

- Halbzeuge (Fasermaterialien und Matrixwerkstoffe),
- Roh-, Hilfs- und Betriebsstoffe,
- Arbeitszeit technischen Personals,
- Anlagen,
- Formwerkzeuge und
- Abfälle

verbrauchen, nutzen bzw. produzieren.

Da das zu bildende Modell Allgemeingültigkeit für alle Arten von Faserverbundfertigungsprozessen besitzen soll, müssen in dieser Arbeit dokumentierte Fertigungsprozesse in ihrem Ablauf und ihren Teilprozessen ebenfalls allgemein gültig sein. Das bedeutet, dass die untersuchten Prozesse alle charakteristischen Merkmale eines Herstellungsprozesses für Faserverbundkomponenten besitzen müssen. Dies bedeutet jedoch nicht, dass alle Fertigungsprozesse für Faserverbundwerkstoffe alle diese Merkmale und Teilprozesse besitzen. Ein Prozess, der die genannten Anforderungen erfüllt ist ein Resin-Transfer-Moulding-Prozess (RTM-Prozess) in dem einfache Profile in Form eines L-Winkels gefertigt (Abbildung 19) werden. Weil dieser Prozess allen Anforderungen genügt, wurde er in dieser Arbeit exemplarisch für die Datenerhebung, die als Basis für die Erstellung des Modells und einer Basisprozessdatenbank dient, ausgewählt.

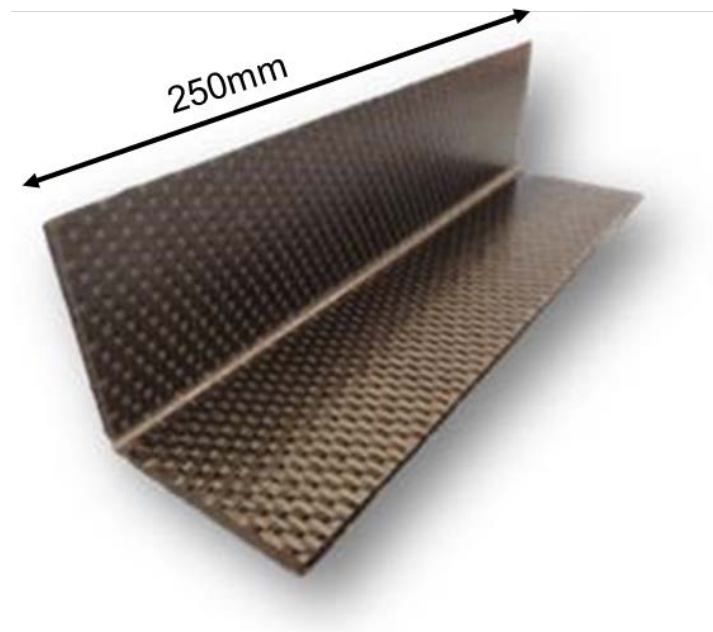


Abbildung 19: Beispielbauteil: L-Winkel für die Modellbildung

Es wird ausschließlich der Herstellprozess des Winkelprofils betrachtet, der den Anforderungen dieser Arbeit an eine hohe Reproduzierbarkeit und Transparenz eines Fertigungsprozesses entspricht. In dieser Arbeit wurde das L-Winkelprofil ausgewählt, weil es einen höheren Komplexitätsgrad als eine ebene Platte aufweist, und dadurch auch den Arbeitsschritt des Drapierens des Fasermaterials erfordert. Dieser Arbeitsschritt ist insbesondere bei größeren und komplexeren Bauteilen nicht zu vernachlässigen, da er oftmals mit erheblichen Aufwänden hinsichtlich Fertigungszeit, Personaleinsatz und ggf. auch Fertigungshilfsmitteln (d.h. Umformeinrichtungen) verbunden ist. Die Abmessungen des Winkelprofils sind gering (250x50x50 mm) und gleichzeitig ist seine Geometrie einfach genug, so dass in Versuchsreihen ausreichend große Stückzahlen gefertigt werden können, um eine solide Datenbasis zu erzeugen, d.h. Lernkurveneffekte auszuschließen. Das heißt, dass nach einem Einfahren der Anlagentechnik zunächst fünf L-Winkelprofile zu Testzwecken hergestellt wurden, bevor mit der Erhebung der Prozessdaten begonnen wurde.

Für die Herstellung der L-Winkel steht umfangreiche Anlagentechnik zur Verfügung, die durch Beheizung des Formwerkzeugs mit Hilfe einer Wassertemperieranlage und einer Vielzahl von Temperatur- und Ultraschallsensoren einen sehr sicheren und wiederholgenauen Fertigungsprozess gewährleistet. Funktion und Auswertung der Messdaten der verwendeten Sensorik sind im Rahmen dieser Arbeit nicht relevant, sie dienen an dieser Stelle ausschließlich der Gewährleistung der Reproduzierbarkeit der Prozesse. Die wesentlichen Komponenten der RTM-Technik sind in Abbildung 20 dargestellt. Nicht dargestellt sind die Wassertemperieranlage zur Heizung des Formwerkzeuges und die Infusionsanlage für die Harzinfusion.

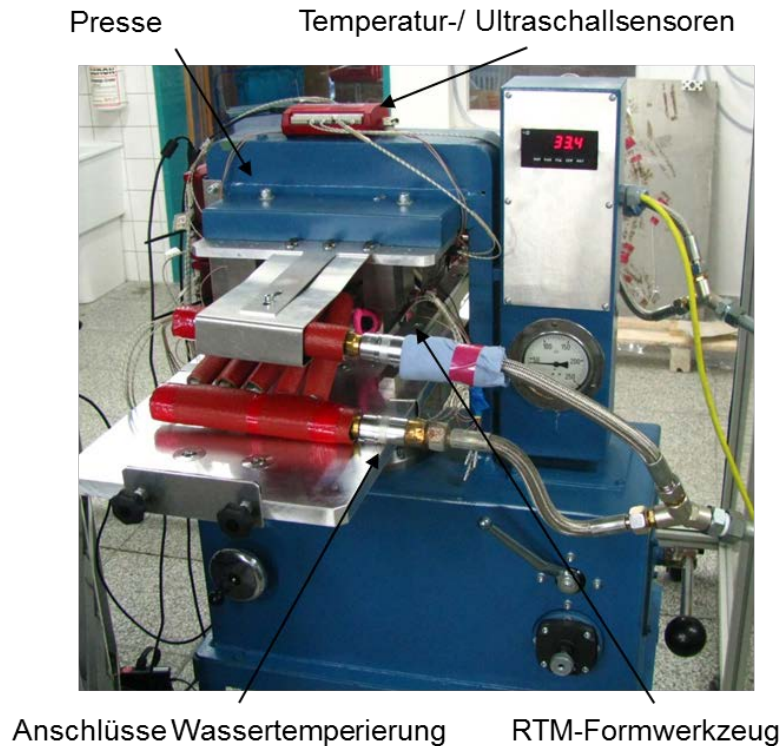


Abbildung 20: RTM-Anlagentechnik im Betrieb

Nach der Dokumentation der L-Winkel-Fertigung, folgt die Bildung des Modells (Kapitel 5.3). Um das erstellte Modell zu validieren, werden weitere Versuche durchgeführt deren Prozessdaten im Modell verarbeitet und anschließend miteinander verglichen werden (Kapitel 6). Für die Validierung wurden drei alternative Fertigungsverfahren zur Herstellung derselben L-Winkel-Geometrie ausgewählt.

- eine Variante des RTM-Verfahrens mit einem alternativen, teilautomatisierten, Preforming-Prozess
- das autoklavunterstützte Vakuuminfusionsverfahren (**D**ifferential-**P**ressure-RTM)
- die Prepreg-Bauweise mit Aushärtung im Autoklaven

Um die Skalierbarkeit des Modells zu überprüfen, werden zuletzt zwei verschiedene Rippen (Rippen 2 und 3 siehe Abbildung 21) für einen Flügelkasten im DP-RTM Verfahren im Autoklaven hergestellt. Diese zwei Rippen sind Bestandteil eines Demonstratorflügelkastens im EU-Projekt LOCOMACHS (**L**ow **C**ost **M**anufacturing and **A**ssembly of **C**omposite and **H**ybrid **S**tructures).

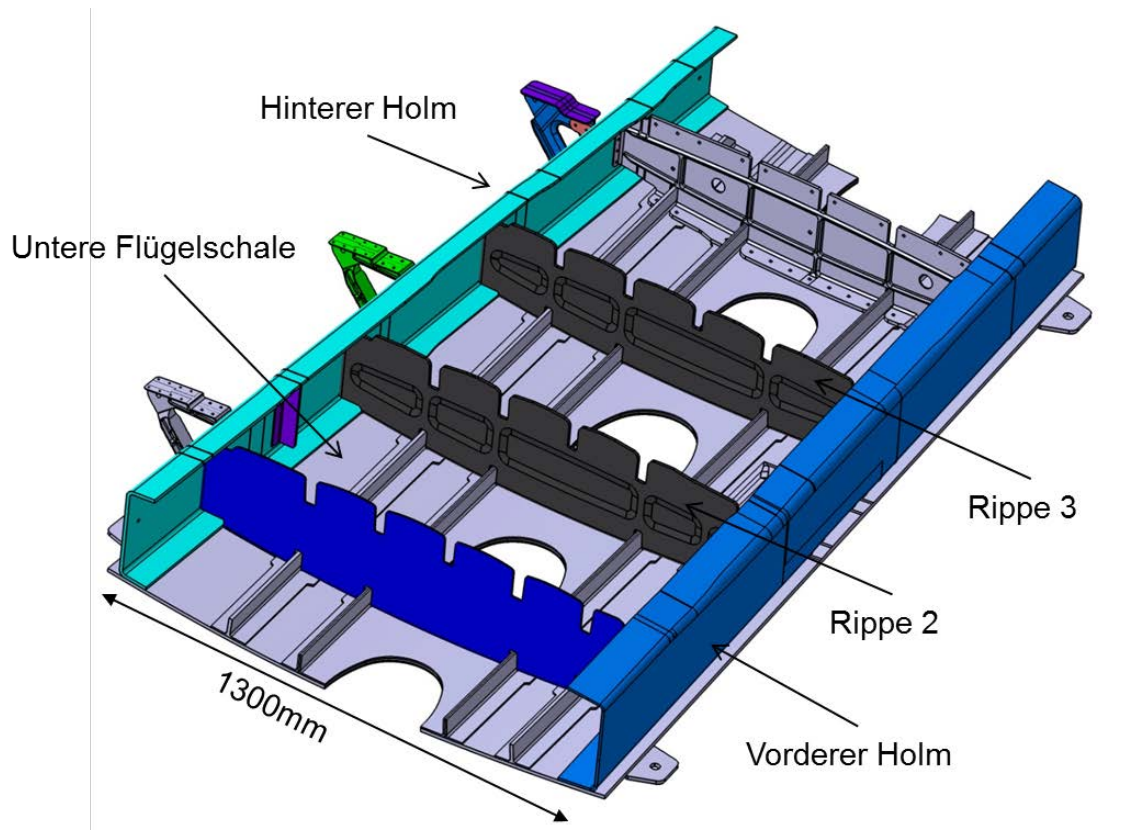


Abbildung 21: Demonstratorflügelkasten (Rippe 2 und 3 werden im DLR Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik gefertigt)

Die Rippen sind nicht skaliert, sondern in Originalgröße und mit 1300 mm Länge, 170 mm Steghöhe und 8 mm Wandstärke (Gewicht ca. 4400 g pro Stück) repräsentativ für viele Strukturbauteile aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff, sowohl in der Luftfahrt als auch im Automobilbau, wo z.B. eine PKW B-Säule ähnliche Abmessungen hat. Die Felder in den Stegen (Abbildung 22) dienen der Gewichtsreduktion durch Querschnittverringern (von 8 mm auf 1 mm) und haben durch die durchgehenden Decklagen große Faserverschiebungen zur Folge. Diese Art der Fertigung bedeutet einen hohen Drapieraufwand. Ein solch hoher Drapieraufwand ist bei dreidimensionalen Strukturbauteilen wie Flugzeugspanten und Flügelrippen, oder automobilen Bodengruppenelementen und Tragstrukturen weit verbreitet. Aus diesem Grund stellen die beiden Flügelrippen, bzw. die zugehörige Fertigungsprozesskette, ein gutes Beispiel für ein Realbauteil dar und eignen sich besonders gut für eine Validierung des erstellten Modells.

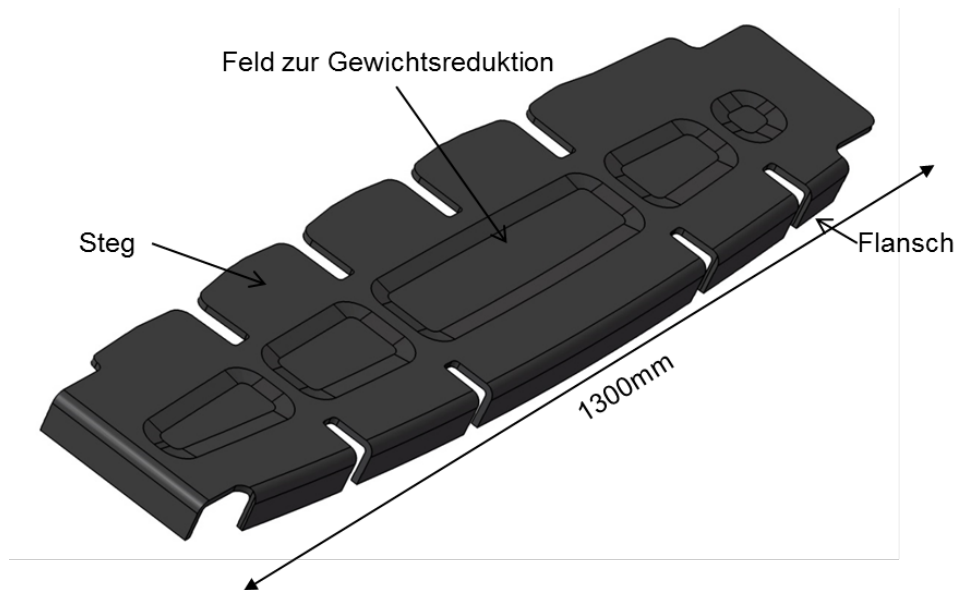


Abbildung 22: Rippe 2 des Demonstratorflügelkastens

5.1 Prozessdokumentation

Bei der Dokumentation der Fertigungsprozesse müssen all jene Faktoren erfasst werden, die in das in Kapitel 4 definierte Effizienzkriterium (3) einfließen sollen. Abbildung 23 fasst diese Faktoren zusammen und stellt Möglichkeiten der messtechnischen Erfassung dieser Faktoren dar, die im Folgenden näher erläutert werden.

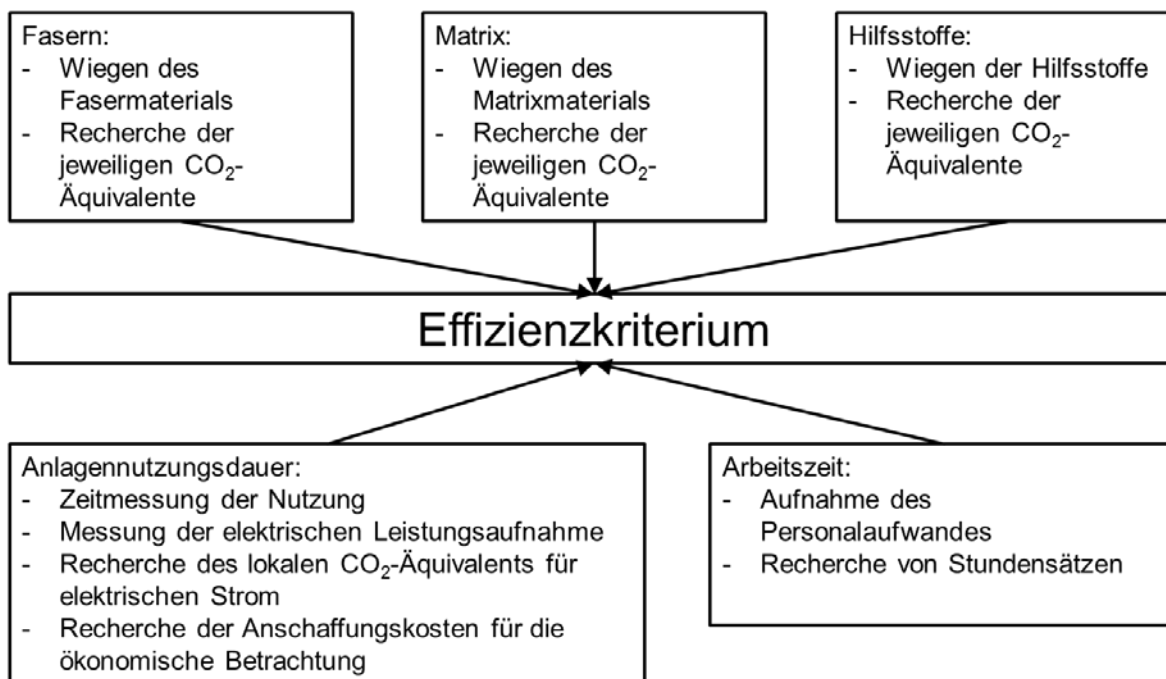


Abbildung 23: Datenerfassung für das Effizienzkriterium

Die zu erfassenden Größen sind:

Faser_{IN} und Faser_{OUT}

Bei den Ein- und Ausgängen hinsichtlich der Fasern muss differenziert werden. Zum einen können alle Arten von Herstellprozessen, in denen trockene Faserhalbzeuge verarbeitet werden, betrachtet werden. Egal in welcher Form (Gewebe, Gelege, Roving, etc.) die Fasern verarbeitet werden, können die Mengen an Fasern gemessen werden. Die einfachste Möglichkeit ist die Fasermaterialien zu wiegen, da auf diese Weise unmittelbar Aussagen des Ausnutzungsgrades / der Effizienz pro Kilogramm getroffen werden können. Genauso kann auch bereits während des automatischen Zuschnittes der Faserhalbzeuge deren Fläche ermittelt werden, um über das vorgegebene Flächengewicht auf die Masse zu schließen. Dies ist an einem automatischen Cutter besonders sinnvoll, da gleichzeitig der Ausnutzungsgrad des Faserhalbzeuges ermittelt werden kann, der bei der Quantifizierung des nicht generativen Anteils der Fasern Verwendung findet.

Zum anderen müssen vorimprägnierte Fasermaterialien, wie Prepregs oder Organobleche für Tiefziehverfahren (Sheet-Moulding-Compound (SMC)) separat betrachtet werden (s.u.). Die getrennte Erfassung von Fasern und Matrix bei diesen Halbzeugen ist praktisch unmöglich.

Matrix_{IN} und Matrix_{OUT}

Die Eingangs- und Ausgangsgrößen der Matrixwerkstoffe sind äquivalent zu den Fasermaterialien. So können bei allen Formen von Infusionsverfahren die Mengen des Harzes durch Wiegen ermittelt werden, entweder manuell oder automatisiert in Infusionsanlagen. Demgegenüber können bei Prozessen mit vorimprägnierten Faserhalbzeugen die Mengen von Fasern und Matrix nur gemeinsam ermittelt werden.

Prepreg-Materialien

Vorimprägnierte Faserhalbzeuge müssen zunächst als Ganzes betrachtet werden. So können beim Zuschnitt Fasern und Matrix nur gemeinsam gewogen werden. Auch während des Ablegeprozesses sind Fasern und Matrix eine Einheit. Sobald das Material den Konsolidierungs- und Aushärteprozess durchläuft, müssen Fasern und Matrix jedoch getrennt voneinander betrachtet werden. Durch das Erweichen der Matrix beginnt diese zu fließen und verlässt meist zu einem gewissen Anteil das spätere Bauteil. Dieser Effekt wird unter anderem genutzt, um etwaige Poren herauszuspülen. Nach der Aushärtung ist der Faservolumenanteil im Produkt demnach höher als zuvor im Halbzeug. Das ausgetretene Matrixmaterial muss im Zusammenhang dieser Arbeit als Abfall, also nicht generativer Anteil, berücksichtigt werden. Ab diesem Zeitpunkt hat das Bauteil seinen Nenn-Faservolumenanteil erreicht (oder einen zu

messenden), und entsprechend müssen bei späterer spanender Nachbearbeitung die Massenanteile von Fasern und Matrix einbezogen werden.

Hilfsstoffe_{IN} und Hilfsstoffe_{OUT}

Hilfsstoffe werden gewogen, wie Fasern und Harz. Häufig ist das Auszählen verbrauchter Komponenten, wie Handschuhe, Schlauchschellen, usw., praktisch einfacher umsetzbar, aufgrund der geringen Einzelmasse. Durch Multiplikation der Einzelmassen kann jedoch ebenfalls Kilogramm als Einheit verwendet werden, was die spätere Bilanzierung durch einheitliche Einheiten erleichtert.

Energie / Anlagennutzungsdauer

Die Nutzung von Anlagentechnik ist essentiell, besonders im Hinblick auf die Prozessautomatisierung zur Realisierung großer Stückzahlen in der Serienfertigung. So sind für den Airbus A320 Nachfolger A320neo bereits 46 Flugzeuge pro Monat geplant (Flottau, et al., 2014). Diese Produktionsrate lässt sich voraussichtlich auf das Nachfolgemodell A30x mit größeren Anteilen an CFK-Strukturbauteilen übertragen, was nach Abschätzung von Kleineberg rund 200.000 Spante pro Jahr bedeuten würde (Kleineberg, 2008). Die Prozessautomatisierung verheißt die Steigerung der Effizienz in Produktionsprozessen, muss aber genauestens analysiert werden, da ineffiziente und unausgereifte Anlagen hohe Energieverbräuche oder hohe Ausschussraten verursachen können, die die Ressourceneffizienz reduzieren. In der Kostenrechnung wird bei Anlagen zwischen den Investitionskosten für die Bereitstellung der Anlage und den wiederkehrenden Kosten für Betrieb, Wartung und Instandhaltung unterschieden. Ein ökonomischer Faktor innerhalb der wiederkehrenden Kosten, der starken Einfluss auf die ökologische Effizienz eines Produktionsprozesses haben kann, ist der Energieverbrauch einer Anlage im Betrieb.

Im Rahmen dieser Arbeit wird deswegen der Energieverbrauch der genutzten Anlagentechnik gemessen. Dies ist meist durch zwischengeschaltete Leistungsmessgeräte einfach realisierbar. Die genutzten Großanlagen, so wie die Autoklaven, sind fest am Stromnetz angeschlossen, verfügen über eine eigene Absicherung und werden kontinuierlich aufgezeichnet. Der Leistungsverbrauch kann in diesem Falle über die Betriebstechnik in Erfahrung gebracht werden. Somit ist der wiederkehrende ökologische Einfluss abgedeckt. Über einen Energiekostenschlüssel wird auch der Kostenaspekt des Stromverbrauches einbezogen. Es wird jeweils die gesamte Energieaufnahme veranschlagt, da bei Fertigungsprozessen unter Laborbedingungen keine Energierückgewinnung vorgesehen ist. Dies ist also eine „worst-case“-Betrachtung.

Neben den Betriebskosten der Anlagentechnik sind die investitionsabhängigen Kosten, z.B. Abschreibungen, sowohl in finanzieller als auch in ökologischer Hinsicht, ein wichtiger Aspekt. Diese ökologischen Kosten können über geeignete Abschreibungsmodelle mit in das Effizienzkriterium einfließen. Im Falle der im Rahmen dieser Arbeit verwendeten Prozesse sind viele der verwendeten Anlagen nicht spezifisch für die dokumentierten Komponenten (L-Profil oder Rippe), sondern werden auch in anderen Prozessen mit variierenden Parametern verwendet. Deswegen werden die Investitionskosten nach Nutzungsdauer der jeweiligen Anlagentechnik umgelegt. Die Nutzungsdauer kann mit Hilfe einer Stoppuhr ermittelt werden, oder durch Auswertung der Infrarotvideos (siehe Kapitel 5.1.1). Da für die verwendete Anlagentechnik keine CO₂-Äquivalente, d.h. ökologische Investitionskosten, verfügbar sind, werden nur die ökonomischen Investitionskosten über einen Zeitschlüssel veranschlagt.

Arbeitszeit

Da bei den untersuchten Prozessen ein großer Anteil der Arbeiten manuell durchgeführt wird, müssen die Arbeitszeiten des technischen Personals ermittelt werden. Dies wird mit Hilfe von Infrarot-Videodokumentation getan (siehe Kapitel 5.1.1). Allgemein ist die Berücksichtigung von Personal immer notwendig, da auch bei hoch automatisierten Produktionsprozessen Personal für Wartung und Instandhaltung der Anlagen einbezogen werden muss.

Kostenbetrachtung

Für alle erwähnten zu dokumentierenden Prozessmerkmale, die in das Effizienzkriterium einfließen, werden neben Stoff- und Energieflüssen auch die dazugehörigen Kostenfaktoren (Materialkosten, Energiekosten, Mitarbeiterstundensätze) ermittelt. Die traditionelle Trennung von ökonomischen Analysen und Ökobilanzen hat Einfluss und Relevanz der Ökobilanz in Bezug auf Entscheidungsfindungen gemindert. Die wichtigen unmittelbaren Zusammenhänge zwischen Kosten und aus der Ökobilanz ermittelten alternativen Produkten oder Prozessen sollten in die Entscheidungsfindung jedoch unbedingt mit einfließen (Norris, 2001). Diese Ergänzung der Daten, um den ökonomischen Faktor schafft bessere Sichtbarkeit und Verständnis der Ergebnisse bei Entscheidungsträgern hinsichtlich der Auswahl ressourceneffizienter Prozesse.

Alle verwendeten Kostendaten sind reale Größen und beruhen auf Marktpreisen, wie sie vom Institut für Faserverbundleichtbau und Adaptronik kalkuliert werden. Investitionskosten und Materialpreise beruhen auf Daten aus Beschaffungen und Angeboten des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik.

5.1.1 Prozessdokumentation mittels Thermographie

Die Erfassung einiger Größen, die essentiell wichtig für die Bestimmung eines Effizienzkriteriums sind, stellt im betrieblichen Umfeld ein großes Problem dar (siehe Kapitel 2.4). Die Zeiterfassung ist besonders kritisch, da sie Grundlage für die Ermittlung von Energieverbräuchen, Lagerzeiten oder auch Arbeitszeiten von Mitarbeitern ist. Um einer Mitarbeiterüberwachung vorzubeugen, und dadurch den potentiellen Missbrauch personenbezogener Daten zu verhindern, wurde im Rahmen dieser Arbeit eine Methode entwickelt, die eine Zeiterfassung ermöglicht, gleichzeitig jedoch keine personenbezogenen Daten generiert.

Infrarotkamarasysteme sind Stand der Technik und werden in der Industrie bereits zur Prozessüberwachung eingesetzt. Bereits 1992 wurden Schweißprozesse mit Hilfe von Infrarotsensoren kontrolliert (Nagarajan, et al., 1992). Die berührungslos gemessenen Temperaturinformationen können für eine Zustandsüberwachung von Bohr-, Schleif- oder Schweißprozessen genutzt werden (Al-Habaibeh, et al., 2003). Je nach Anwendungsfall können nach Al-Habaibeh et al. z.B. Aussagen über die Oberflächenflächenqualität (Schleifprozess), den Werkzeugverschleiß (Bohrprozess) oder die Prozesssicherheit (Schweißprozess) getroffen werden. Des Weiteren werden Wärmebildkamarasysteme zur Qualitätssicherung von Klebprozessen genutzt (Hasenberg, et al., 2005). In der Faserverbundfertigung wird Thermografie zum einen zur zerstörungsfreien Bauteilprüfung genutzt (Oster, 2013) (Perterer, et al., 2009), zum anderen seit kurzem auch in der Fertigung von FVK zur Leckageerkennung von Vakuumaufbauten (Bölke, et al., 2012).

Die Thermographie bietet die Möglichkeit durch gezieltes Setzen des Histogramms auf über 37 °C Personen im Video zu überblenden und somit anonymisiert darzustellen. Gleichzeitig werden Bewegungsabläufe, Werkzeuge und Materialien hochaufgelöst abgebildet. Die Aufnahme und Sicherung von Arbeitsabläufen in Form von Infrarotvideoaufnahmen wurde im Rahmen dieser Arbeit mit dem Betriebsrat des DLR-Standortes Braunschweig erarbeitet und etabliert. Für die Auswertung am Computer wurde ein Videoschnittprogramm benutzt, das ein einfaches Navigieren durch das Video ermöglicht. Ein schnelles Umschalten vom Schnellvorlauf zur Bild-für-Bild Wiedergabe ist der Hauptgrund für den Einsatz einer solchen Software, da auf diese Weise sehr genau die Diskretisierungspunkte gesetzt werden können. Bei der Aufnahme des Prozesses können zusätzlich Gesten oder Bewegungen gemacht werden, um bei der späteren Auswertung einfacher Zeitmarken setzen zu können. Daraus ist bei der Auswertung ersichtlich, wann ein Teilprozess abgeschlossen ist. Das verwendete IR-Kamerasystem, bestehend aus IR-Kamera und Computer mit Software für die Aufzeichnung sind in Abbildung 24 dargestellt.

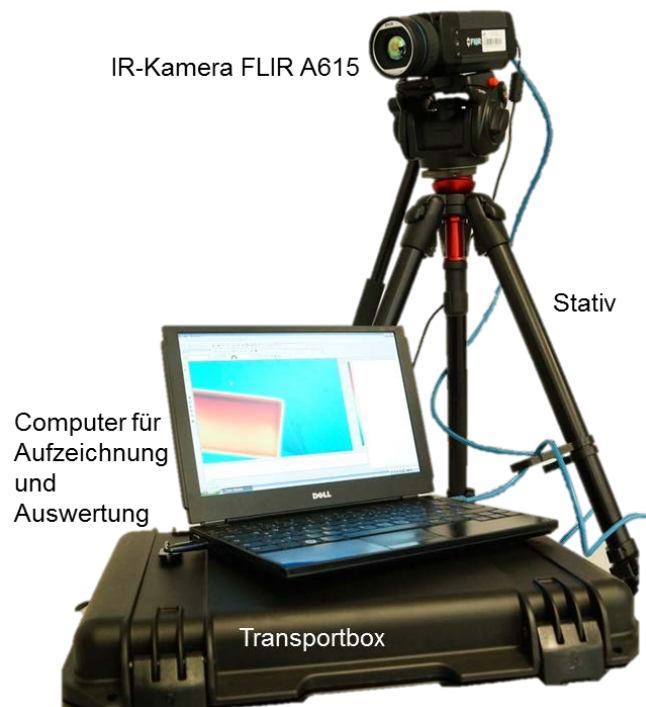


Abbildung 24: Infrarotkammersystem

Ein zusätzlicher Nutzen der Infrarotvideoaufzeichnung ist die Option thermische Prozesse in der Fertigung von Faserkunststoffverbunden sichtbar zu machen. Dies hat insbesondere bei der Ermittlung der Energieaufwände eines Fertigungsprozesses den Vorteil, dass versteckte Energieverbraucher durch dissipierte Energie und dadurch entstehende Wärme sichtbar und somit identifizierbar gemacht werden. Eine quantitative Messung von Energieströmen ist mit der verwendeten Technik prinzipiell möglich, wurde aber aufgrund des enorm hohen Aufwandes bei der Videodatenauswertung nicht genutzt. Die Messung der Leistungsaufnahme von Geräten und Anlagen mit Hilfe von Stromzählern ist wesentlich einfacher und voraussichtlich auch exakter. Trotzdem bietet die Thermographie den Nebeneffekt unnötige Energieverluste, z.B. durch schlechte Isolation, sichtbar zu machen.

Bei der Aufstellung des Kamerasystems ist die Wahl des Bildausschnittes der Optik zu beachten. Je nach räumlicher Ausdehnung des gesamten Fertigungsprozesses kann mit einer Kameraeinstellung entweder der gesamte Prozess erfasst werden, oder es müssen mehrere Einstellungen für einzelne Teilprozesse gewählt werden. Bei solch einer Diskretisierung muss darauf geachtet werden, dass keine Lücken in der Prozesskette entstehen und ggf. stoffliche oder energetische Ein- und Ausgänge übergangen werden. Der Bildausschnitt ist jeweils auch eine Systemgrenze, sowohl für einen Teil- als auch den Gesamtprozess, über die Materialien und Energie in das System eingebracht oder entnommen werden können. Diese Systemgrenze stellt gleichzeitig sicher, dass dem Auswertenden keine Informationen entgehen können. Auch in das System eingebrachte Subkomponenten sind als solche im IR-Videobild ersichtlich und können

nachträglich hinsichtlich zuvor erfolgter wertschöpfender Arbeitsschritte analysiert werden. Wird durch die Wahl mehrerer Bildausschnitte eine Diskretisierung der Prozesskette vorgenommen, sollte diese den Teilprozessen im später gebildeten Modell entsprechen, so dass Teilprozesse leicht ausgetauscht werden können.

5.2 Prozessaufnahme der Fertigung von L-Winkeln aus CFK im RTM-Verfahren

Bereits während der Prozessaufnahme der L-Winkel-Fertigung zeigte sich, dass es sinnvoll ist allgemein geläufige Bezeichnungen für die verschiedenen Teilprozesse zu vergeben. Dies erleichtert insbesondere die Zusammenarbeit mit Kollegen, die bei der Dokumentation der Prozesse unterstützen. Es muss jedoch darauf hingewiesen werden, dass eine solche Bezeichnung innerhalb einer Organisation, Firma etc. meist durchgängig verwendet wird, es zwischen Organisationen aber Unterschiede in der Nomenklatur geben kann. Abbildung 25 zeigt eine erste Diskretisierung der Fertigungsprozesskette in Teilprozesse innerhalb der gewählten Systemgrenzen (Materialanlieferung bis zum fertigen Bauteil, jedoch ohne spanende Nachbearbeitung). Die Technische Gebäudeausrüstung (TGA), z.B. Lüftung, Heiztechnik, Druckluft oder Licht, wird in der vorliegenden Arbeit nicht berücksichtigt. Die Systemgrenze wurde bewusst so gesetzt, dass die TGA außerhalb liegt, da etwaige Messwerte durch die vielfältige, zeitlich nicht durchgängige, Nutzung der Labors wenig Aussagekraft besäßen. Dies gilt ebenso für Raumkosten, da entsprechende Daten für die verwendeten Labors weder verfügbar waren, noch aussagekräftig wären.



Abbildung 25: Teilprozesse der L-Winkel-Herstellung

Diese Prozesskette der L-Winkel-Fertigung dient als Basis für die Erstellung eines allgemeingültigen Modells für Faserverbundfertigungsprozesse, weshalb im Folgenden die Fertigung mit ihren einzelnen Teilprozessschritten kurz erläutert wird.

Im Rahmen dieser Arbeit liegt der Fokus auf dem Herstellprozess von Faserverbundstrukturen, weshalb nur dieser Teil detailliert betrachtet wird. Die Herstellung von Halbzeugen und Hilfsstoffen entzieht sich der Möglichkeit einer genaueren Untersuchung, weshalb diese als Eingangsgrößen für das zu bildende Modell verwendet werden. Entsprechende CO₂-Äquivalente und andere Parameter wurden der Literatur entnommen oder bei Herstellern ermittelt.

Der Fertigungsprozess beginnt mit dem Zuschnitt des Fasermaterials mit Hilfe eines CNC-gesteuerten Cutters. Der Lagenaufbau der L-Winkelprofile ist durch die Geometrie der später zu vermessenden Winkel vorgegeben, ebenso die Abmessungen der Profile. Die verwendeten

Faserhalbzeuge und Matrixsysteme können im Einzelfall variieren. Jedoch wirkt sich dies nicht auf die Gültigkeit der ermittelten Prozessdaten für die Modellbildung aus, da der Prozess gleich ist und die Prozessdaten damit übertragbar sind. Verschiedene Matrixsysteme können unterschiedliche Temperzyklen erfordern, was den Energiebedarf für die Aushärtung beeinflusst. Dies wird durch unterschiedliche Teilprozesse, spezifisch für das jeweilige Matrixsystem, mit entsprechenden Prozessparametern, Energieverbräuchen etc., berücksichtigt.

Der Lagenaufbau des L-Profils ist in Abbildung 26 dargestellt. Er besteht aus acht Einzellagen Atlasgewebe, das mit einem thermoplastischen Binder versehen ist, welcher die Einzellagen durch anschließende thermische Aktivierung zu einem Preform verbindet. Die Abmessungen der Einzellagen betragen 250 mm x 126,5 mm. Die acht Lagen haben unterschiedliche Faserorientierungen (v.l.n.r.: 0°/90°/+45°/-45°/+45°/-45°/90°/0°), die quasiisotrope Materialeigenschaften im Bauteil erzeugen. Die Lagen werden in der abgebildeten Reihenfolge anschließend drapiert und fixiert.



Abbildung 26: Lagenaufbau für das L-Winkelprofil

Um die Lagen zu drapieren, wurde ein einfaches Preformwerkzeug gefertigt. Abbildung 27 zeigt dieses von der Stirnseite. Der Winkel, der von den Flächen eingeschlossen ist, ist identisch mit dem Innenwinkel des RTM-Werkzeuges (Abbildung 28), damit ein verzugfreies Schließen möglich ist. Die gelben Markierungen begrenzen den Auflegebereich für das Fasermaterial. Des Weiteren dienen sie als Hilfe für den Werker beim Ablegen der Faserlagen.



Abbildung 27: Profilwerkzeug für das Preforming

In Abbildung 28 sind das Ober- und Unterwerkzeug für den RTM-Prozess zu sehen. Die beiden Werkzeughälften bestehen aus Stahl und bilden im geschlossenen Zustand eine Kavität, die der Geometrie des herzustellenden L-Winkels entspricht. Durch die Anschlüsse an den Stirnseiten wird Wasser zur Temperierung gepumpt. Die Temperaturverteilung im Formwerkzeug wird mit Thermoelementen gemessen. Zusätzlich sind Ultraschallsensoren integriert, um den Fortschritt der Harzaushärtung zu erfassen.

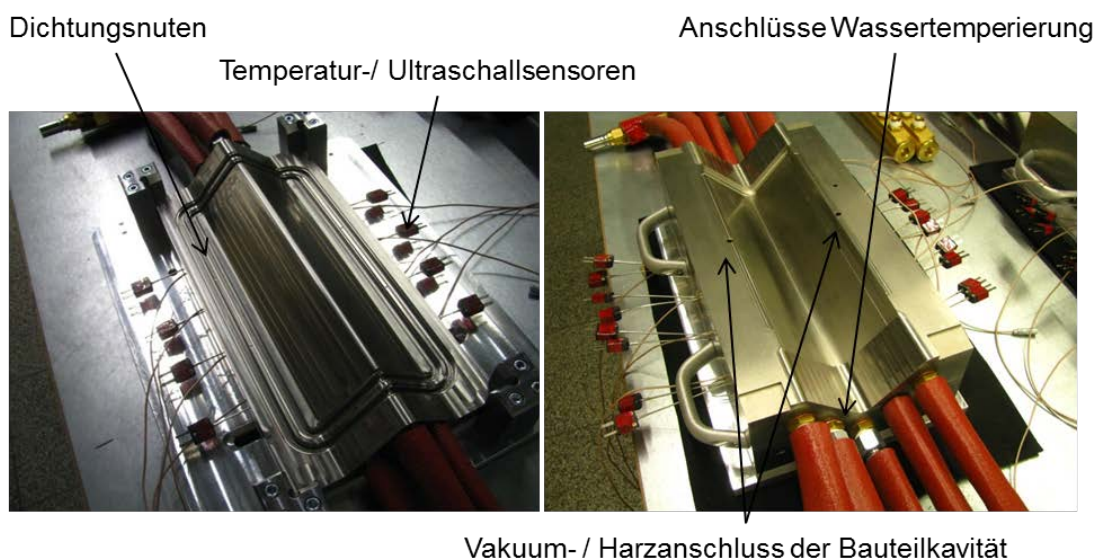


Abbildung 28: L-Winkelprofil-Werkzeug, RTM Ober- und Unterwerkzeug

In Abbildung 28 links sind die Nuten für die beiden umlaufenden Dichtungen zu sehen. Der Raum zwischen den zwei Dichtungen wird evakuiert, was die Dichtigkeit des Formwerkzeugs gewährleistet. Die Bauteilkavität hat zwei gegenüberliegende Öffnungen, an die auf der einen

Seite ein Vakuum angelegt wird, auf der anderen Seite das Harzsystem für die Infiltration des Fasermaterials bereitgestellt wird.

5.2.1 Prozessaufnahme der L-Winkel-Fertigung im RTM-Verfahren

Die experimentelle Prozessaufnahme wird in Teilprozesse untergliedert, deren Bezeichnungen wie in Kapitel 5.2 beschrieben allgemein etabliert sind. Es soll an dieser Stelle noch einmal darauf hingewiesen werden, dass die Definition der Systemgrenzen des kompletten Fertigungsprozesses, als auch der Teilprozesse, sowohl in dieser Arbeit als auch bei weiterführenden Betrachtungen, entscheidend ist. Diese Definition und Benennung der Teilprozesse ist obligatorisch, um Teilprozesse austauschen zu können und einen modularen Charakter des Modells zu gewährleisten. Es werden im Folgenden nur die Stoff- und Energieströme betrachtet, die während der Herstellung des L-Winkelprofils unmittelbar anfallen. Vorhergehende Emissionen werden zunächst nicht betrachtet. Systemgrenzen wurden dort gezogen, wo ideell ein Arbeitsgang, oder die Benutzung einer Maschine beendet ist.

Die in Abbildung 25 gewählte Diskretisierung des Prozesses erwies sich unmittelbar als zu grob, da die Arbeitsschritte Trimmen, Rüsten der Anlage und Reinigen mit wesentlichen Aufwänden verbunden sind und deshalb nicht in andere Teilprozesse integriert werden können. Der Prozess wird deshalb in die in Abbildung 29 dargestellten Teilprozesse untergliedert.

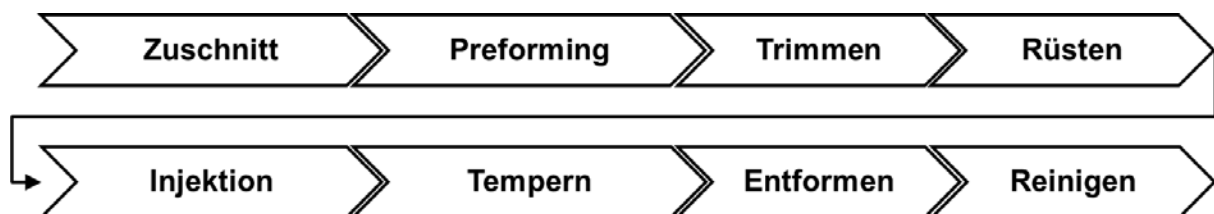


Abbildung 29: Teilprozesse der L-Winkel-Herstellung – erweiterte Diskretisierung

Bei jedem Teilprozess wird der Fokus auf die Aufnahme relevanter Daten, wie etwa die benötigten Materialien, die benötigte Arbeitszeit oder die für den Prozess notwendige Anlagentechnik, bzw. die notwendige Energie, gelegt. Die Datenerhebung geschieht mit dem in Kapitel 5.1.1 vorgestellten Infrarotvideosystem, das die Prozessdauer und verwendeten Materialien dokumentieren kann. Die Materialmengen werden zusätzlich durch Wiegen gemessen, Energiebedarfe mittels Leistungsmessgeräten. Die Kenngrößen des L-Winkelprofils sind in Tabelle 8 zusammengefasst.

Tabelle 8: Materialdaten und Lagenaufbau des L-Winkelprofils

		Einheit
Bezeichnung des Gewebes:	Kohlenstofffasergewebe HTA 5131:Style 796	-
Bindungsart:	Körperbindung	-
Flächengewicht des Gewebes:	391	g/mm ²
Dicke:	0,37	mm
Länge der Einzellage:	250	mm
Breite der Einzellage:	126,5	mm
Lagenaufbau:	[0 °/90 °/+45 °/-45 °] _s	-
Lagenanzahl:	8	Lagen

Zur Kalkulation der Bauteilkosten werden in der vorliegenden Arbeit die direkten Kosten nach Asiedu ermittelt. Diese umfassen Materialkosten, Lohnkosten, Anlagenkosten und Energiekosten (Asiedu, et al., 1998). Die Energiekosten werden zu den wiederkehrenden Anlagenkosten gerechnet s.u., da im Rahmen der durchgeführten Analysen, welche die TGA nicht berücksichtigen, keine weiteren Energiekosten anfallen. Materialkosten, sowie Kosten von Hilfs- und Verbrauchsstoffen entsprechen den Beschaffungskosten des Instituts für Faserverbundleichtbau und Adaptronik. Zur Einbeziehung der Lohnkosten wurden Löhne des Instituts angenommen. Kosten für die Nutzung von Räumen, sowie von technischer Gebäudeausstattung werden in dieser Arbeit nicht betrachtet.

Die Bauteilkosten ergeben sich entsprechend:

Bauteilkosten

$$= \text{Materialkosten} + \text{Lohnkosten} + \text{Anlagenkosten}_{\text{wiederkehrend}} + \text{Anlageneinzelkosten} \quad (6)$$

Die durch die Anlagentechnik anfallenden Kosten werden vereinfacht auf Basis des VDMA Einheitsblatts 34160 durchgeführt (VDMA, 2006). Für die Berechnung der Kosten ist die Ermittlung der Anschaffungskosten der Anlagentechnik erforderlich. Die Anlagenkosten werden in wiederkehrende Kosten (siehe (7)) und anteilige Einzelkosten (siehe (8)) aufgeteilt, die zusammen die Anlagenkosten ergeben.

Anlagenkosten_{wiederkehrend}

$$= \text{Energieverbrauch} * \text{Energiekosten pro kWh} + \text{jährliche Wartungskosten} * \frac{\text{Prozessdauer}}{\text{jährliche Betriebsstunden}} \quad (7)$$

Die jährlichen Betriebsstunden sind für alle Berechnungen auf 1731,6 h/Jahr (222 Arbeitstage à 7,8 Std.) festgelegt.

Zusätzlich werden Wartungskosten berücksichtigt, die als Prozentsatz (2-3 %) der Anschaffungskosten angenommen werden und auf Schätzungen beruhen. Ebenso werden für die Abschreibungsdauer Schätzwerte verwendet, da es für Anlagen im Laborbetrieb keine Abschreibungskonzepte gibt. Die Daten für die Wiederbeschaffungskosten der Anlagen basieren entweder auf Einkaufspreisen des Institutes für Faserverbundleichtbau und Adaptronik, oder auf Angeboten.

Anlageneinzelkosten

$$= \frac{\text{Wiederbeschaffungswert} - \text{Restwert}}{\text{Abschreibungsdauer} * \text{jährliche Nutzungsdauer}} * \text{Prozessdauer} \quad (8)$$

5.2.1.1 Zuschnitt:

In diesem Schritt werden die einzelnen Lagen von dem auf Rollen angelieferten Kohlenstoffasermaterial ausgeschnitten. Der Zuschnitt erfolgt mit einem Cutter. Zum Schneiden wurde ein Rollenmesseraufsatz verwendet.

Da für den vorgesehenen Aufbau sowohl Faserlagen in 0°/90° Ausrichtung, als auch in ±45° Orientierung benötigt werden, müssen die entsprechenden Lagen um ±45° gedreht aus dem Halbzeug herausgeschnitten werden. Dies verursacht je nach Schnittplan Verschnitt, der für die zu fertigenden Komponenten nicht verwendet werden kann und deshalb als Abfall betrachtet werden muss. Um ökonomisch und ökologisch zu fertigen, ist es von Vorteil, in diesem Schritt den Verschnitt auf ein Minimum zu reduzieren. Diese Aufgabe kann von einem Computer übernommen werden, der die Zuschnitte automatisch mit maximaler Materialausnutzung anordnet. Für einfache Zuschnittgeometrien funktioniert dies gut und gleichzeitig kann der Materialausnutzungsgrad am Computer ausgelesen werden. Um den Einrichtungsaufwand für den Cutter gering zu halten, sollten die 0°/90°-Zuschnitte, bzw. die ±45°-Zuschnitte immer gleich für mehrere Bauteile gemacht werden. Auf diese Weise können sowohl Arbeitszeit als auch Materialverschnitt minimiert werden.

Das Kamerasystem ist aktiv und die Zeitaufnahme startet mit dem Betreten des Raumes durch den Mitarbeiter. Abbildung 30 zeigt eine Momentaufnahme des Videos vom Zuschnitt, das mit der Infrarotkamera angefertigt wurde. Die aufgenommenen Zeiten finden sich in Tabelle 9 und Tabelle 10 wieder.



Abbildung 30: IR Aufnahme des Cutters beim Materialzuschnitt

Es wurde nur der Energieverbrauch des Cutters gemessen. Die Energieaufnahme des Steuercomputers ist darin enthalten. Für den Betrieb des Cutters ist zusätzlich eine Absaugung notwendig, deren Energieverbrauch im Rahmen dieser Arbeit nicht ermittelt werden konnte.

Tabelle 9: Energieverbrauch des Zuschnittprozesses und CO₂-Äquivalente (Al-Lami, et al., 2014)

Anlage/ Kategorie	Zeit/ Menge	Energie	kg _{CO2} /Einheit (eurostat) (ecoinvent Centre, 2015)	wiederkehrendes CO ₂
Cutter	0:15 h	0,84 kWh	0,59 kg/kWh	0,50 kg
Kohlenstoffasergewebe HTA 5131:Style 796	0,30 m ²	-	50,00 kg/kg	5,75 kg
Papier für Cutter	0,65 m ²	-	2,42 kg/kg	0,09 kg
Handschuhe	1 Paar	-	1,63 kg/kg	0,05 kg
Summe				6,39 kg

Sporadisch anfallende Arbeiten wie das regelmäßige Austauschen des verwendeten Rollmessers sind in dieser Betrachtung nicht explizit angeführt, sondern wurden in die Arbeitszeit des Werkers mit einbezogen. Die Kosten des Zuschnittprozesses sind in Tabelle 10 dargestellt.

Tabelle 10: Kosten des Zuschnittprozesses (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie/ Anlage	Zeit/ Menge	Energie [kWh]	Kosten/ Einheit	Wiederbeschaffungswert [€]	wiederkehrende Kosten	Einzelkosten
Werker	0:15 h	-	80,40 €/h	-	20,10 €	-
Cutter	0:15 h	0,84	0,08 €/kWh	183.000,00 €	0,60 €	3,52 €
Kohlenstofffasergewebe HTA 5131:Style 796	0,30 m ²	-	63,91 €/m ²	-	25,00 €	-
Papier für Cutter	0,65 m ²	-		0,1192 €/m ²	0,08 €	-
Handschuhe	1 Paar	-	0,23 €/Paar	-	0,23 €	-
Summe					46,01 €	3,52 €

Tabelle 11 zeigt die anfallenden Faserabfälle des Zuschnittprozesses. Diese lassen sich aufgrund der Computersteuerung mit der Steuerungssoftware berechnen, die die benötigten Zuschnitte mit maximaler Materialausnutzung anordnet und den Materialausnutzungsgrad ermittelt. So ist es nicht notwendig den Faserverschnitt zu wiegen.

Tabelle 11: Abfälle beim Zuschnittprozess (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie	Zeit/ Menge	kg _{CO2} /Einheit	wiederkehrendes CO ₂
Kohlenstofffasergewebe HTA 5131:Style 796	0,065 m ²	50,00 kg/kg	0,96 kg

5.2.1.2 Preforming

Allgemein wird unter diesem Schritt die Herstellung eines Preforms verstanden, also ein Vorformling aus Faserhalbzeugzuschnitten. Dieser bleibt in seiner drapierten Form, da durch thermische Aktivierung ein thermoplastischer Binder aufgeschmolzen wird, der nach seinem Abkühlen die gewünschte Form beibehält. Durch seine Eigenstabilität kann ein Preform), im Gegensatz zu biegeschlaffen Faserhalbzeugen, im Fertigungsprozess gut gehandhabt werden (manuell oder automatisiert). Ein Preform kann darüber hinaus das Erreichen des richtigen Faservolumengehaltes des fertigen Bauteils gewährleisten und ist auch für die zuverlässige Werkzeugabdichtung bei der späteren Injektion des Matrixsystems verantwortlich.

Die im vorhergehenden Schritt zugeschnittenen Kohlenstofffaserlagen werden auf das Preform-Werkzeug (Abbildung 27) aufgelegt und der Binder thermisch aktiviert. Die thermische Aktivierung geschieht mithilfe eines Bügeleisens (160 W Leistungsaufnahme) bei 160 °C. Die Aufheizzeit für jede Aktivierung beträgt 02:30 min. Der Binder ist bereits durch den Hersteller auf das Faserhalbzeug aufgebracht. Die thermische Binderaktivierung wird für alle acht

Faserlagen wiederholt, um einen festen Verbund herzustellen. Abbildung 31 zeigt eine Aufnahme aus dem IR-Video zum Preforming. Das Preformwerkzeug mit einer gerade fixierten Kohlenstofffaserlage, das Bügeleisen und die Hände des Mitarbeiters sind auf dem Bild zu erkennen. Das Preforming ist hier zunächst ein manueller Prozess.

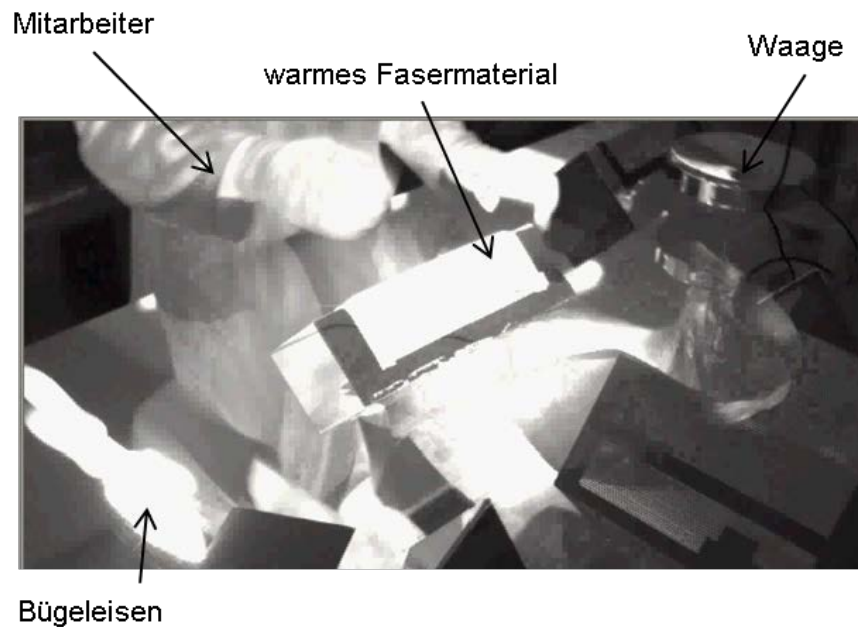


Abbildung 31: IR Aufnahme des manuellen Prefomings

Tabelle 12 zeigt den gemessenen Energieverbrauch und die entsprechenden CO₂-Äquivalente des Preform-Prozesses.

Tabelle 12: Energieverbrauch des Preform-Prozesses und CO₂-Äquivalente (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie/ Anlage	Zeit/ Menge	Energie	kg _{CO2} /Einheit (Green Responsibility, 2012) (ecoinvent Centre, 2015)	wiederkehrendes CO ₂
Bügeleisen	0:17 h	0,35 kWh	0,59 kg/kWh	0,21 kg
Handschuhe	1 Paar	-	1,63 kg/kg	0,05 kg
Trennfolie gelocht	0,06 m ²	-	2,70 kg/kg	0,01 kg
Summe				0,27 kg

Der Preformingvorgang selbst lässt sich in die drei Arbeitsschritte

1. Kohlenstofffaserlage auflegen und ausrichten und das Aufbringen einer Trennfolie,
2. thermische Aktivierung mit dem Bügeleisen,
3. Entfernen der Trennfolie unterteilen.

In Tabelle 13 sind diese Arbeitsschritte zur Kostenberechnung zusammengefasst. Die Daten wurden für 5 Preforms à 8 Lagen wiederholt und das arithmetische Mittel der Zeiten gebildet.

Tabelle 13: Kosten des Preform-Prozesses (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie/ Anlage	Zeit/ Menge	Energie	Kosten/ Einheit	Wiederbeschaffungswert	wiederkehrende Kosten	Einzelkosten
Werker	0:17 h	-	80,40 €/h	-	22,78 €	-
Bügeleisen	0:17 h	0,35 kWh	0,08 €/kWh	1.000,00 €	0,07 €	0,02 €
Handschuhe	1 Paar	-	0,23 €/Paar	-	0,23 €	-
Trennfolie gelocht	0,06 m ²	-	1,23 €/m ²	-	0,07 €	-
Summe					23,15 €	0,02 €

Beim Preforming fallen keine Halbzeugabfälle an, da es sich um einen reinen Umformprozess handelt.

5.2.1.3 Trimmen

Da das manuelle Preforming nur ungenügend geometrisch exakte Preforms hervorbringt und durch Einzellagen gleicher Größe aufgrund des nach außen hin größer werdenden Radius zudem schräge Kanten entstehen, muss ein weiterer Teilprozess, das Trimmen, eingeführt werden.



Abbildung 32: Teilprozess Trimmen

Durch die schrägen Kanten würden beim Injektionsprozess Kanäle zwischen Preform und Formwerkzeug entstehen, die das Harzsystem voreilen ließen und eine vollständige Durchtränkung des Preforms unmöglich machen würden.

Beim Trimmprozess wird keine weitere Energie verbraucht, da die Arbeiten manuell mit einer Schere bzw. einem Rollmesser durchgeführt werden. Es entstehen somit lediglich CO₂-Äquivalente durch den Verbrauch von Hilfsstoffen (Tabelle 14).

Tabelle 14: Energieverbrauch des Trimmprozesses und CO₂-Äquivalente (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie	Menge	kg _{CO2} /Einheit (ecoinvent Centre, 2015)	wiederkehrendes CO ₂
Werker	0:12 h	-	-
Baumwollhandschuhe	1 Paar	0,15 kg/kg	0,06 kg
Handschuhe	1 Paar	1,63 kg/kg	0,05 kg
Summe			0,11 kg

Die entstehenden Kosten für Arbeitszeit und Hilfsstoffe sind in Tabelle 15 dargestellt.

Tabelle 15: Kosten des Trimmprozesses (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie	Menge	Kosten/ Einheit	wiederkehrende Kosten
Werker	0:12 h	80,40 €/h	16,08 €
Baumwollhandschuhe	1 Paar	0,49 €/Paar	0,49 €
Handschuhe	1 Paar	0,23 €/Paar	0,23 €
Summe			16,80 €

Um den anfallenden Kohlenstofffaserabfall während des Trimm-Prozesses zu ermitteln, wurden die Preforms vor und nach dem Trimmen gewogen. Über 8 Preforms gemittelt ergab sich ein Gewichtsverlust durch Trimmen von 4,425 g, was bei einem Flächengewicht von 294 g/m² 0,015 m² Material entspricht (Al-Lami, et al., 2014).

Nach dem Trimmen ist der Preform fertig vorbereitet, so dass anschließend die Infiltration mit dem Matrixsystem stattfinden kann. Man spricht in diesem Fall von einem endkonturnahen Preform (siehe Abbildung 33), da das Bauteil nach Infiltration und Aushärtung nicht spanend bearbeitet werden muss und somit die Endkontur, sprich finale Geometrie, besitzt.



Abbildung 33: Preform nach Trimmen

5.2.1.4 Rüsten

Wie unter 5.2.1 erwähnt sind die kommenden Arbeitsschritte zu umfangreich, um sie unter einem Teilprozess Injektion zusammenzufassen. Deswegen wurde der Teilprozess Rüsten als Vorbereitung für den Injektionsprozess eingeführt.



Abbildung 34: Teilprozess Rüsten

Der Schritt des Rüstens umfasst das Eintrennen des Formwerkzeuges mit einem Trennmittel, das Einlegen der Dichtungen, das Einlegen des Preforms, sowie das Anschließen aller Leitungen für die Vakuumversorgung und den Injektionsaufbau. Abbildung 35 zeigt eine Aufnahme aus dem Video, das zum Rüsten erstellt wurde. Formwerkzeug und Dichtungen müssen dreimal mit einem Trennmittel beschichtet werden, damit das fertige Bauteil nach dem Temperprozess problemlos aus dem Formwerkzeug gelöst werden kann. Das Trennmittel muss nach jedem Auftragen mindestens 15 min ablüften, damit das enthaltene Lösungsmittel sich verflüchtigen kann. Erst anschließend kann die nächste Schicht aufgetragen werden. Nach dem Eintrennen müssen die Dichtungen in das Werkzeug eingebracht werden, nachdem diese ebenfalls mit Trennmittel beschichtet wurden. Zum Rüsten wird auch das Einbringen des Preforms in das Formwerkzeug und das Schließen der Handhebelpresse gezählt. Nach diesen Schritten werden die Vakuumschläuche als Verbindung zwischen der Vakuumpumpe und der Kavität angebracht. Die Schläuche werden mit Schlauchschellen an den vorher eingetrennten Schlauchanschlüssen fixiert. Anschließend werden die Hochdruckleitungen der Wassertemperieranlage angeschlossen.

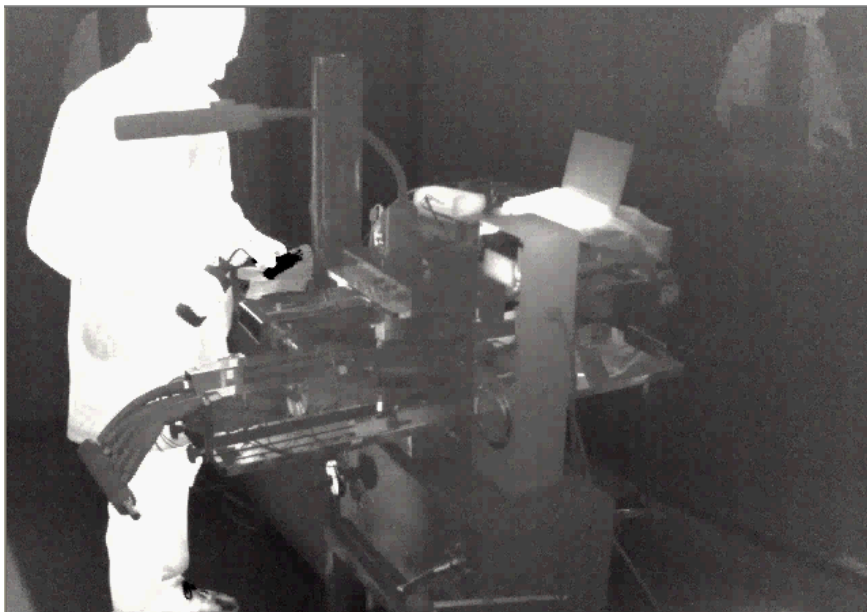


Abbildung 35: IR-Aufnahme der Rüstarbeiten

Um die Hilfsstoffverbräuche zu ermitteln, wurden die Behälter, in denen das Aceton und das Trennmittel aufbewahrt werden, vor und nach dem Prozess gewogen. Das Ergebnis dieser Messung und der weiteren Materialverbräuche sind in Tabelle 16 und Tabelle 17 ersichtlich.

Tabelle 16: Energieverbrauch des Rüstprozesses und CO₂-Äquivalente (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie/ Anlage	Zeit/ Menge	Energie	kg _{CO2} /Einheit (Green Responsibility, 2012) (ecoinvent Centre, 2015)	wiederkehrendes CO ₂
Vakuumpumpe	3:15 h	1,40 kWh	0,59 kg/kWh	0,83 kg
RTM-Computer	3:15 h	0,20 kWh	0,59 kg/kWh	0,12 kg
Harzerhitzer	3:15 h	11,38 kWh	0,59 kg/kWh	6,71 kg
RTM-Wasserheizung	3:15 h	12,00 kWh	0,59 kg/kWh	7,08 kg
Aceton	0,1 l	-	2,23 kg/kg	0,17 kg
Trennmittel, Chemlease 255	0,1 l	-	2,23 kg/kg	0,17 kg
Putzpapier	10 Blatt	-	2,42 kg/kg	0,12 kg
Kupferrohr	0,6 m	-	2,77 kg/kg	0,29 kg
Baumwollhandschuhe	1 Paar	-	0,15 kg/kg	0,06 kg
Handschuhe	4 Paar	-	1,63 kg/kg	0,18 kg
Schlauchselle	6 Stk.	-	6,15 kg/kg	0,09 kg
Silikonschlauch	0,4 m	-	7,90 kg/kg	0,41 kg
Holzspatel	1 Stk.	-	2,42 kg/kg	0,03 kg
Summe				16,26 kg

Entsprechend den ermittelten CO₂-Äquivalenten sind in Tabelle 17 die Kosten für den Rüstprozess aufgeführt.

Tabelle 17: Kosten des Rüstprozesses (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie/ Anlage	Zeit/ Menge	Energie	Kosten/ Einheit (eurostat)	Wieder- beschaffungs- kosten	wieder- kehrende Kosten	Einzel- kosten
Werker	3:15 h	-	80,40 €/h	-	261,30 €	-
Vakuumpumpe	3:15 h	1,40 kWh	0,08 €/kWh	3.500,00 €	0,46 €	1,31 €
RTM-Computer	3:15 h	0,20 kWh	0,08 €/kWh	enthalten in Wasserheizung	0,04 €	0,00 €
Harzerhitzer	3:15 h	11,38 kWh	0,08 €/kWh	enthalten in Wasserheizung	2,17 €	0,00 €
RTM-Wasserheizung	3:15 h	12,00 kWh	0,08 €/kWh	70.000,00 €	8,13 €	58,33 €
Aceton	0,1 l	-	2,49 €/l	-	0,25 €	-
Trennmittel, Chemlease 255	0,1 l	-	38,30 €/l	-	3,83 €	-
Putzpapier	10 Blatt	-	0,02 €/Blatt	-	0,21 €	-
Kupferrohr	0,6 m	-	2,21 €/m	-	1,33 €	-
Baumwollhandschuhe	1 Paar	-	0,49 €/Paar	-	0,49 €	-
Handschuhe	4 Paar	-	0,23 €/Paar	-	0,92 €	-
Schlauchselle	6 Stk.	-	0,79 €/Stk.	-	4,74 €	-
Silikonschlauch	0,4 m	-	1,90 €/m	-	0,76 €	-
Holzspatel	1 Stk.	-	0,14 €/Stk.	-	0,14 €	-
Summe					284,78 €	59,65 €

Beim Rüsten des RTM-Prozesses werden viele Hilfsstoffe für den Injektionsaufbau, insbesondere Schläuche, Kupferrohr und Schlauchschellen, verbaut, die nach Prozessende den Abfällen zugerechnet werden, da sie nicht wiederverwendbar sind. Das gilt ebenso für die Hilfsstoffe, die zum Eintrennen von Formwerkzeug und Dichtungen benötigt werden, wie Aceton, Trennmittel und Handschuhe.

5.2.1.5 Injektion

Im Prozessschritt Injektion wird das Matrixsystem in den Preform injiziert. Dieser Teilprozess wird, wie in einer industriellen Serienfertigung, automatisiert von einer Injektionsanlage durchgeführt, die Prozessparameter wie Harzmenge, Harztemperatur, Harzdruck und Vakuum regelt.

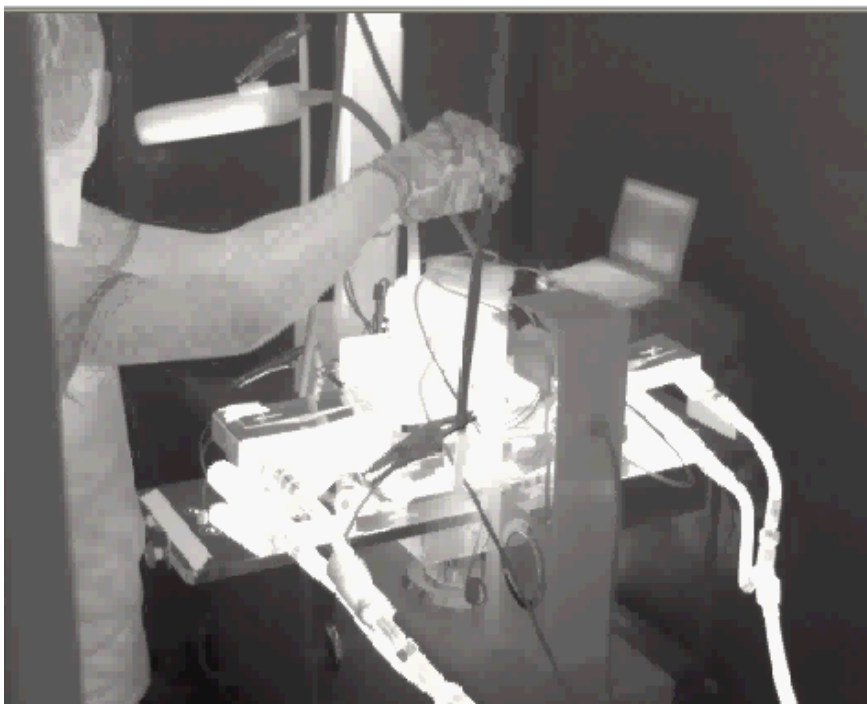


Abbildung 36: IR-Aufnahme der Injektion

Abbildung 36 zeigt beispielhaft den Aufbau. Je nach Matrixsystem wird ein Stoffgemisch aus Harz und Härter oder ein Einkomponentenharz mit Druck in die Kavität eingebracht. Durch ein am Formwerkzeug angelegtes Vakuum kann die Infiltration des innenliegenden Preforms noch unterstützt werden. Einkomponentenharzsysteme erfordern ein Vorheizen des Formwerkzeuges, damit ihre Viskosität nicht bereits während des Injizierens soweit steigt, dass eine vollständige Tränkung des Fasermaterials unmöglich wird.

Hilfsstoffe werden für den Injektionsvorgang selbst nicht benötigt, diese wurden bereits beim Rüsten verbaut. Für die Injektion sind ein Werker und diverse Anlagen notwendig. Tabelle 19 zeigt den Personalaufwand und Anlagen während der Injektion.

Tabelle 18: Energieverbrauch des Injektionsprozesses und CO₂-Äquivalente (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie/ Anlage	Zeit/ Menge	Energie	kg _{CO2} /Einheit (Green Responsibility, 2012)	wiederkehrendes CO ₂
Werker	0:40 h	-	-	-
Ingenieur	0:15 h	-	-	-
Heißluftföhn	0:40 h	1,33 kWh	0,59 kg/kWh	0,79 kg
Vakuumpumpe	1:00 h	0,40 kWh	0,59 kg/kWh	0,24 kg
RTM-Computer	0:40 h	0,04 kWh	0,59 kg/kWh	0,02 kg
Harzerhitzer	0:40 h	2,33 kWh	0,59 kg/kWh	1,38 kg
RTM-Wasserheizung	0:40 h	12,00 kWh	0,59 kg/kWh	7,08 kg
Ofen	1:00 h	2,00 kWh	0,59 kg/kWh	1,18 kg
Infusionsanlage	1:00 h	4,00 kWh	0,59 kg/kWh	2,36 kg
Epoxidharz RTM-6	0,300 kg	-	3,5 kg/kg	1,05 kg
Summe				14,10 kg

Tabelle 19: Kosten des Injektionsprozesses (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie/ Anlage	Zeit/ Menge	Energie	Kosten/ Einheit (eurostat)	Wieder- beschaffungs- kosten	wieder- kehrende Kosten	Einzel- kosten
Werker	0:40 h	-	80,40 €/h	-	53,60 €	-
Ingenieur	0:15 h	-	95,50 €/h	-	23,88 €	-
Heißluftföhn	0:40 h	1,33 kWh	0,08 €/kWh	500,00 €	0,12 €	0,03 €
Vakuumpumpe	1:00 h	0,40 kWh	0,08 €/kWh	3.500,00 €	0,09 €	0,40 €
RTM-Computer	0:40 h	0,04 kWh	0,08 €/kWh	enthalten in Wasserheizung	0,00 €	0,00 €
Harzerhitzer	0:40 h	2,33 kWh	0,08 €/kWh	enthalten in Wasserheizung	0,20 €	0,00 €
RTM-Wasserheizung (elektr.)	0:40 h	12,00 kWh	0,08 €/kWh	70.000,00 €	2,20 €	11,97 €
Ofen (elektr.)	1:00 h	2,00 kWh	0,08 €/kWh	20.000,00 €	0,40 €	1,54 €
Infusionsanlage	1:00 h	4,00 kWh	0,08 €/kWh	90.000,00 €	2,64 €	15,38 €
Epoxidharz RTM-6	0,300 kg	-	40,00 €/kg	-	12,00 €	-
Summe					95,14 €	29,32 €

Beim Teilprozess Injektion fallen keine weiteren Abfälle an.

5.2.1.6 Tempern

Im Anschluss an das Injizieren folgt vollautomatisch der Teilprozess des Temperns. Die Formwerkzeughälften werden mit Hilfe der Wassertemperieranlage nach einem vorgegebenen Temperzyklus mit definierten Aufheizraten auf die erforderliche Aushärtetemperatur erwärmt. Diese kann je nach verwendetem Harzsystem zwischen 80 °C und 180 °C liegen und hängt unter anderem von den gewünschten Bauteileigenschaften ab. Abbildung 37 zeigt einen Ausschnitt aus dem zu diesem Prozessschritt aufgenommenen Video, auf dem deutlich das heiße Formwerkzeug zu sehen ist.

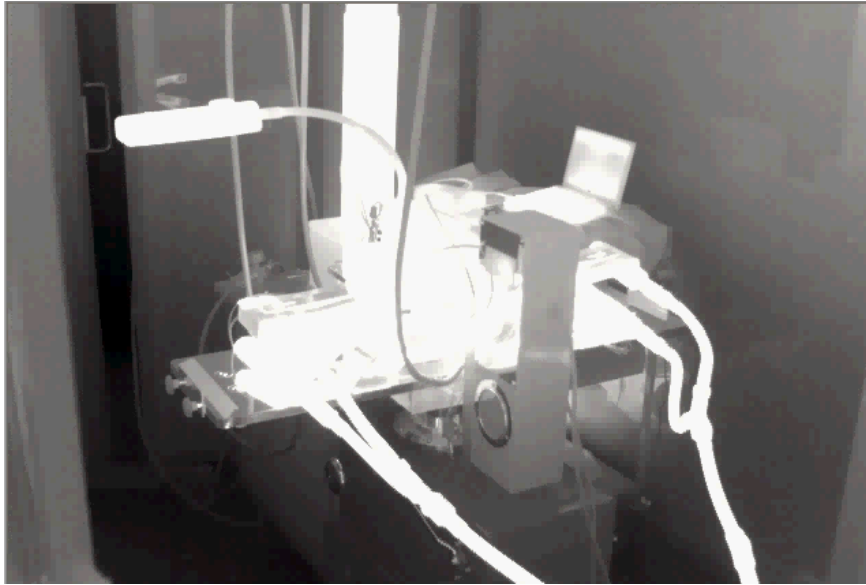


Abbildung 37: IR-Aufnahme des Temporns

Der Temperzyklus umfasst keine weiteren Arbeiten. Jedoch ist er durch die eingebrachte Energie zur Erwärmung des Bauteils ein wesentlicher Energieverbraucher im gesamten Herstellprozess. Bereits im hier betrachteten RTM-Prozess muss in jedem Zyklus das Formwerkzeug (ca. 40 kg Stahl) auf Aushärtetemperatur erwärmt werden. Da es in direktem Kontakt mit den metallischen Pressenbacken ist, müssen dort auftretende Wärmeleitungsverluste durch das Heizsystem kompensiert werden. Verluste durch Strahlung und Konvektion sind dem gegenüber zu vernachlässigen. Bei anderen Prozessvarianten, z.B. der Bauteilherstellung in einem Autoklaven, müssen große Mengen Luft, die als Energieträger dient, und die äußerst massive Anlagentechnik mit erhitzt werden. Deswegen ist besonders für diesen Prozessschritt das Messen des Energieverbrauchs sehr wichtig.

Je nach Harzsystem werden verschiedene Temperzyklen gefahren, die unterschiedliche Heizgradienten, Haltephasen und Abkühlgradienten fordern. Theoretisch entspräche das Integral des Temperzyklus multipliziert mit der Masse des Bauteils und seiner spezifischen Wärmekapazität der benötigten Energiemenge für dessen Aushärteprozess, doch dies berücksichtigt weder Verluste, noch die Verbräuche der Anlagentechnik. Eine Temperkurve für das Aushärten des Harzes RTM6® ist in Abbildung 38 dargestellt.

Abbildung 38: Temperzyklus für Harzsystem RTM6® in Anlehnung an (Minakuchi, et al., 2011)

Die beim Tempern verbrauchte Energie mit den zugehörigen CO₂-Äquivalenten ist in Tabelle 20 dargestellt.

Tabelle 20: Energieverbrauch des Temperprozesses und CO₂-Äquivalente (Al-Lami, et al., 2014)

Anlage	Zeit	Energie	kg _{CO2} /Einheit (Green Responsibility, 2012)	wiederkehrendes CO ₂
Vakuumpumpe	7:45 h	6,04 kWh	0,59 kg/kWh	3,56 kg
Wassertemperieranlage	7:45 h	40,00 kWh	0,59 kg/kWh	23,60 kg

Tabelle 21: Kosten des Temperprozesses (Al-Lami, et al., 2014)

Anlage	Zeit	Energie	Kosten/ Einheit	Wieder- beschaffungs- wert	wiederkehrende Kosten	Einzel- kosten
Vakuumpumpe	07:45 h	6,04 kWh	0,0844 €/kWh	3.500 €	0,98 €	3,13 €
Wasser- temperieranlage	07:45 h	40,00 kW h	0,0844 €/kWh	70.000 €	17,29 €	139,10 €
Summe					18,27 €	142,24 €

Nimmt man eine spezifische Wärmekapazität von $c = 710 \text{ J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ des Bauteils mit der Masse von $m = 200 \text{ g}$ aus kohlenstofffaserverstärktem Kunststoff an, so beläuft sich die notwendige Energie zur Aufheizung von Raumtemperatur ($20 \text{ }^\circ\text{C}$) auf Vernetzungstemperatur ($180 \text{ }^\circ\text{C}$) unter Verwendung von (2) auf

$$Q = 710 \frac{\text{J}}{\text{kg K}} * 0,2 \text{ kg} * 160 \text{ K} = 22720 \text{ J} \quad (9)$$

Mit $1 \text{ J} = 1 \text{ W} \cdot \text{s}$ ergibt sich, dass 22,72 kJ rechnerisch 0.006311 kWh entsprechen, also aufgerundet 0,01 kWh, die zur Aufheizung des Bauteils notwendig sind. Dem gegenüber steht der Gesamtenergieverbrauch des Temperprozesses mit 46,04 kWh. Da in einem optimalen Prozess lediglich die berechnete Energie von 0,01 kWh für die Vernetzung des Polymers und damit das Erreichen der gewünschten Bauteileigenschaften notwendig ist, muss die Differenz von 46,03 kWh als ungenutzte Energie betrachtet werden.

5.2.1.7 Entformen

Das Entformen ist ein manueller Prozess, der unter Umständen viel Zeit in Anspruch nimmt. So kann es vorkommen, dass das fertige Bauteil sich beim Öffnen der Presse selbst entformt und ohne Mühe entnommen werden kann. Es kann sich aber auch im Formwerkzeug verkanten, so dass diverse Hilfsmittel zum Einsatz kommen müssen und einige Zeit vergeht bis das Bauteil entformt ist. Eine allgemeingültige Dauer für diesen Prozessschritt konnte nicht gefunden werden, da die Bedingungen ständig wechseln. Tabelle 22 gibt die Energieverbräuche und CO₂-Äquivalente wieder. Die Wassertemperieranlage taucht hier auf, da das Formwerkzeug häufig erwärmt werden muss, um das Bauteil entformen zu können. Die Temperatur wird erhöht, um den thermischen Schrumpfung des Bauteils beim Abkühlen umzukehren, der zum Verklemmen des Bauteils bei Raumtemperatur führen kann.

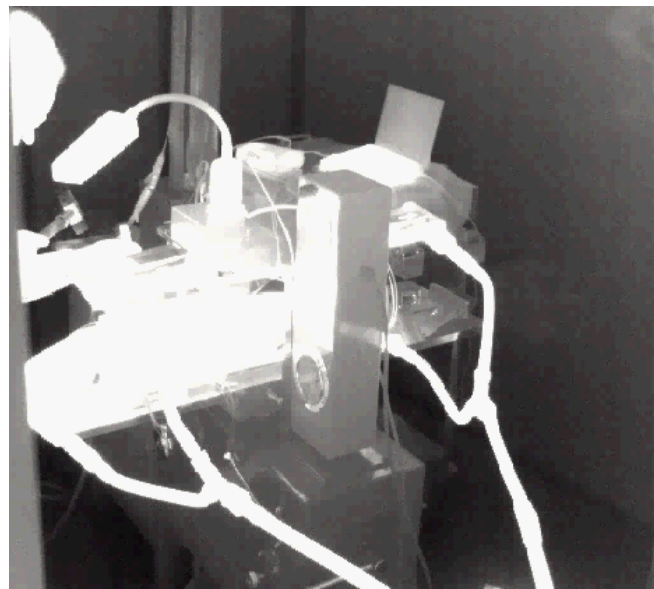


Abbildung 39: IR Aufnahme des Entformens

In Tabelle 22 und Tabelle 23 sind die CO₂-Äquivalente und Kosten des Entformungsprozesses aufgeführt.

Tabelle 22: Energieverbrauch des Entformungsprozesses und CO₂-Äquivalente (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie/ Anlage	Zeit	Energie	kg _{CO2} /Einheit (Green Responsibility, 2012)	wiederkehrendes CO ₂
Wassertemperier-anlage	0:35 h	4,00 kWh	0,59 kg/kWh	2,36 kg
Summe				2,36 kg

Beim Teilprozess Entformung fallen keine Abfälle an. Lediglich die von der Wassertemperieranlage verbrauchte Energie muss als nicht wertschöpfend betrachtet werden, da sie keinen Mehrwert im Endprodukt erzeugt.

Tabelle 23: Kosten des Entformungsprozesses (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie/ Anlage	Zeit	Energie	Kosten/ Einheit (eurostat)	Wiederbeschaffungswert	wiederkehrende Kosten	Einzelkosten
Werker	0:15 h	-	80,40 €/h	-	20,10 €	-
Wassertemperier-anlage	0:35 h	4,00 kWh	0,08 €/kWh	70.000,00 €	1,38 €	10,47 €
Summe					21,48 €	10,47 €

5.2.1.8 Reinigen

Als letzter Teilprozess wird laut der in Abbildung 29 eingeführten Prozessaufteilung noch ein Reinigungsschritt hinzugefügt. Zum Reinigen wird im Rahmen dieser Arbeit sowohl das Abrüsten der Anlagentechnik als auch das Reinigen der Formwerkzeuge gezählt. Beim Abrüsten der RTM-Anlagentechnik wird der Injektionsaufbau demontiert, dessen Komponenten bereits im Teilprozess Rüsten verrechnet wurden. Beim Reinigen fällt als zusätzlicher Abfall das Matrixharz an, welches lediglich für die Füllung der Injektionsleitungen etc. benötigt wurde. Die Masse kann durch Auswiegen der entsprechenden Schlauchabschnitte ermittelt werden.

Tabelle 24: Energieverbrauch des Reinigungsprozesses und CO₂-Äquivalente (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie	Zeit/ Menge	kg _{CO2} /Einheit (ecoinvent Centre, 2015)	wiederkehrendes CO ₂
Aceton	0,1 l	2,19 kg/kg	0,17 kg
Putzpapier	5 Blatt	2,42 kg/kg	0,06 kg
Holzspatel	1 Stk.	2,42 kg/kg	0,03 kg
Summe			0,26 kg

Die Reinigung der Formwerkzeuge ist trotz der vorhergehenden Beschichtung mit Trennmittel oftmals sehr aufwendig. Dünne Harzfilme haften häufig durch Kohäsion an den Oberflächen

und können nur händisch unter Zuhilfenahme von Holzwerkzeugen entfernt werden, um die Oberflächen nicht zu beschädigen. Als Reinigungsmittel wird meist Aceton verwendet.

Tabelle 25: Kosten des Reinigungsprozesses (Al-Lami, et al., 2014)

Kategorie	Zeit/ Menge	Kosten	wiederkehrende Kosten
Werker	0:25 h	80,40 €/h	33,50 €
Aceton	0,1 l	2,49 €/l	0,25 €
Putzpapier	5 Blatt	0,02 €/Blatt	0,11 €
Holzspatel	1 Stk.	0,14 €/Stk.	0,14 €
Summe			34,00 €

Tabelle 26: Abfälle beim Reinigungsprozess (Al-Lami, et al., 2014)

Material	Menge	kg _{CO2} /Einheit	wiederkehrendes CO ₂
Epoxidharz RTM-6	0,200 kg	3,5 kg/kg	0,73 kg

5.3 Modellbildung

Der Grundgedanke bei der Modellierung ist es ein modulares System zu schaffen in dem mit einer beliebigen Anzahl Bausteine Prozessketten dargestellt werden können. Diese Bausteine stellen die einzelnen Teilprozesse einer beliebigen Prozesskette dar. Es soll die Möglichkeit bestehen diese Bausteine nach eigenem Ermessen des Nutzers zu einer Prozesskette zu verknüpfen, bzw. diese Bausteine/Module innerhalb einer bestehenden Prozesskette beliebig zu verschieben.

Pro:

- Es können beliebig umfangreiche Prozessketten mit ggf. sehr vielen Teilprozessen modelliert werden.
- Einzelne Teilprozesse können innerhalb der Prozessabfolge verschoben werden, um Abläufe im Prozessfluss zu optimieren.

Kontra:

- Der Modellbildner muss ein gewisses Sachverständnis für die Fertigungsprozesse von Faserverbundwerkstoffen besitzen, da andernfalls inkonsistente Prozessketten modelliert werden könnten.

Die Austauschbarkeit der Elemente kann am einfachsten dadurch hergestellt werden, dass die Elemente alle auf einem Standardmodul beruhen, in welchem jeweils ein Teilergebnis autark berechnet wird. Mehrere Teilergebnisse aus verschiedenen Modulen, die je einen Teilprozess verkörpern, können anschließend in einem speziellen Modul, dem Reportmodul, zusammengeführt und für die Auswertung aufbereitet werden. Abbildung 40 zeigt die allgemeine Modellstruktur.



Abbildung 40: Struktur des Modells

Der innere Aufbau der Module, in denen die Teilprozesse abgebildet werden, ist gleich. Lediglich die Definition der Parameter innerhalb der Module, bzw. das Einfügen entsprechender Messwerte, macht ein Modul zum spezifischen Repräsentanten eines Teilprozesses. Beispielhaft bedeutet dies, dass Teilprozess 1 in Abbildung 40 identisch mit Teilprozess 2 wäre, wenn in beiden Modulen dieselben Größen/Parameter eingetragen wären. Somit kann ein Preformingprozess durch Abänderung der inneren Parameter zu einem Temperprozess werden, und umgekehrt.

Innerhalb eines Typs von Teilprozess, z.B. Zuschnitt, können wiederum unterschiedliche Varianten desselben Teilprozesses aufgenommen, dokumentiert und abgespeichert werden. So können theoretisch unendlich viele Varianten einzelner Teilprozesse, sowie unendlich viele Teilprozesse selbst definiert werden. Die sinnvolle Kombination obliegt dem Anwender, der das Modell aus den Modulen zusammenfügt.

Die Berechnung von Teilergebnissen in den einzelnen Modulen (Teilprozessen) hat den Vorteil, dass bei der Auswertung in dem Reportmodul eine Aufschlüsselung nach Teilprozessen möglich ist. Dies erlaubt die gezielte Suche nach Treibern im Prozess, hinsichtlich Material- und Energieverbräuchen, aber auch Prozesszeiten und Kosten. So kann der Prozess nach den gewünschten Parametern analysiert und anschließend daraufhin optimiert werden.

Das gebildete Modell wurde für die Arbeit in ein Tabellenkalkulationsprogramm (MS Excel) implementiert. Es bietet unter anderem den Vorteil, dass sowohl aufgenommene Prozessdaten, als auch recherchierte Materialdaten übersichtlich dargestellt werden können.

Darüber hinaus bietet die Tabellenkalkulation in Verbindung mit Skriptprogrammierung universelle Verwendbarkeit, Nutzung interner Berechnung, unbegrenzte Erweiterbarkeit und im speziellen Fall von MS Excel eine hohe Verfügbarkeit.

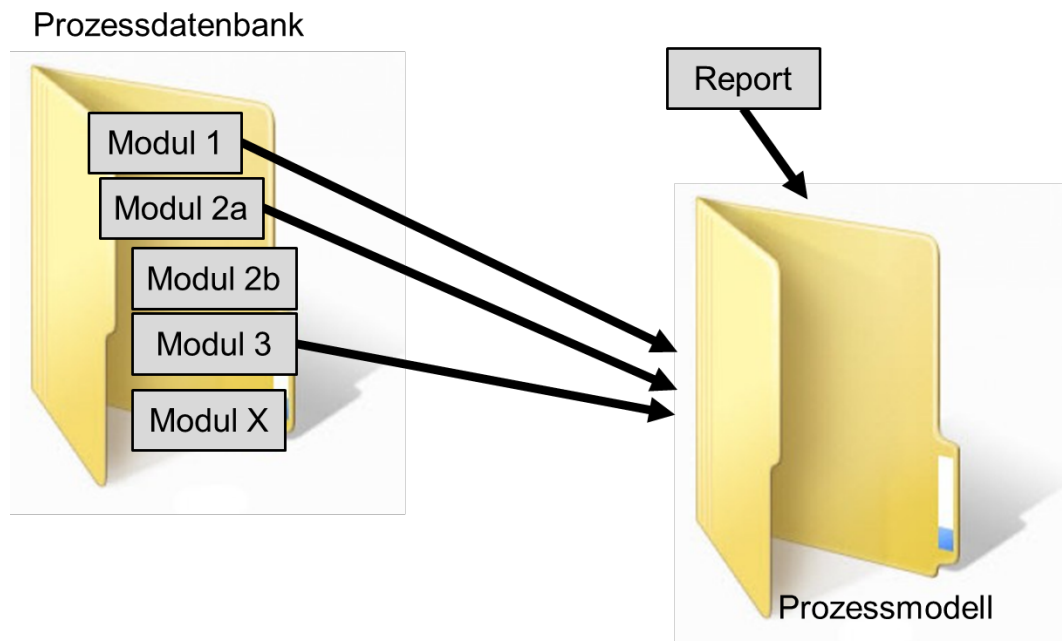


Abbildung 41: Modellstruktur in Windows Explorer

Abbildung 41 zeigt exemplarisch die Struktur, wie sie in der Windows Ordnerstruktur realisiert wurde. Ein Ordner (Prozessdatenbank) enthält sämtliche dokumentierten Module mit unterschiedlichsten Teilprozessen. Der Anwender kann Module auswählen und in einen separaten Ordner kopieren. Zusammen bilden die kopierten Module das Modell der Prozesskette. In diesen Ordner wird zusätzlich das Reportmodul eingefügt, welches die einzelnen Module zusammenfasst und auswertet. Dieser Ordner (hier Prozessmodell) repräsentiert die eine spezifische Prozesskette.

Um das Effizienzkriterium berechnen zu können, müssen sowohl die in den Prozess eingebrachten Stoffe und Energien dokumentiert werden, als auch die nicht wertschöpfend umgesetzten Ressourcen. Es ist praktisch deutlich einfacher zu verwirklichen die Abfälle zu dokumentieren, bzw. zu messen, als die im Bauteil verbleibenden Ressourcen zu bestimmen. Für die verwendeten Halbzeuge (Fasern, Matrices und Prepreg) wurden im Modell separate Abfallkategorien für jedes Material eingeführt. Diese Erweiterung ermöglicht bei der späteren Auswertung eine Differenzierung innerhalb der Kategorie der Materialien. Die Effizienz des

Einsatzes von Fasern, Matrixwerkstoffen und Hilfsstoffen kann auf diese Weise getrennt bewertet werden.

5.4 Validierung des Modells

In diesem Kapitel sollen zum einen alternative Fertigungsverfahren für den zuvor betrachteten L-Winkel aufgenommen werden, sowie eine Prozessdokumentation für ein komplexeres Bauteil aus CFK, die in Kapitel 5 vorgestellt Flügelrippe, durchgeführt werden. Mit den gesammelten Daten werden entsprechende Module parametrisiert, mit denen anschließend CO₂-Fußabdrücke und Kosten der einzelnen Prozessketten berechnet werden können. Die errechneten CO₂-Äquivalente und Kosten sind in Kapitel 6 zu finden, wo sie zwecks der Validierung des Modells miteinander verglichen werden.

Die Prozessdaten der Validierungsprozesse und –bauteile sind im Folgenden in komprimierter Form dargestellt.

5.4.1 L-Winkel-Fertigung mit RTM-Verfahren und teilautomatisiertem Preform-Prozess

Dieser Fertigungsprozess entspricht grundsätzlich dem in Kapitel 5.2.1 gezeigten, mit der Ausnahme, dass der manuelle Preform-Prozess durch einen teilautomatisierten Preform-Prozess ersetzt wurde. Auf diese Weise können zwei Prozessketten verglichen werden, die sich nur in einer einzelnen Technologie in einem ihrer Teilprozesse unterscheiden. Die einzelnen Faserlagen werden nicht manuell von einem Mitarbeiter umgeformt und mit Hilfe eines Bügeleisens kompaktiert, bzw. der Binder aktiviert, sondern es wird eine Vorrichtung zur Umformung, Konsolidierung und Binderaktivierung verwendet (siehe Abbildung 42).

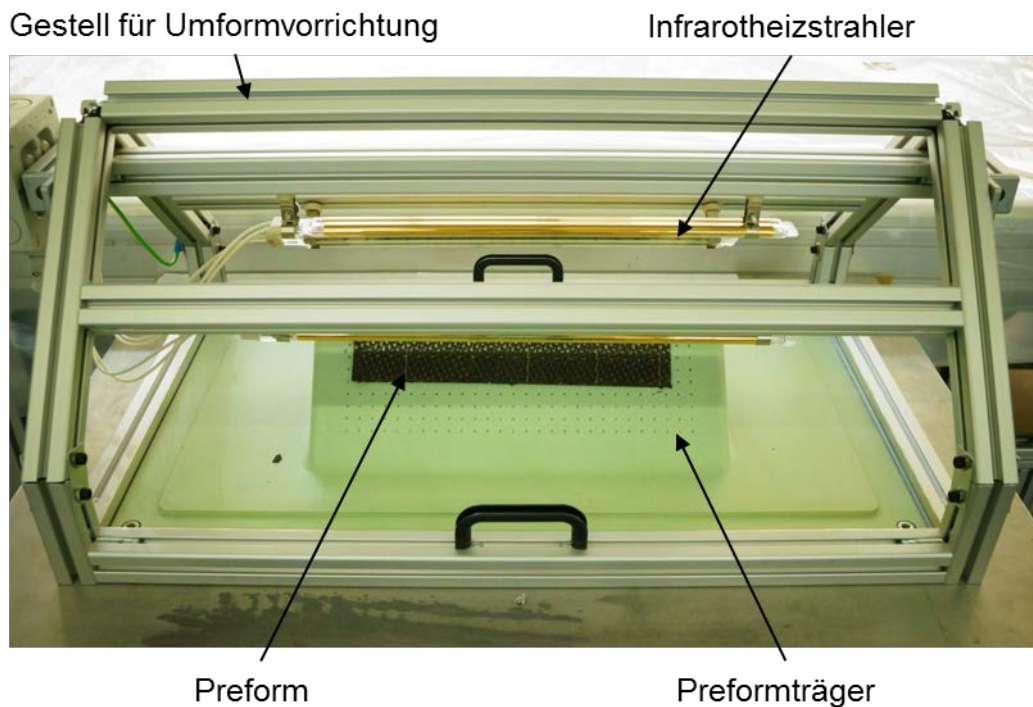


Abbildung 42: Vorrichtung zum teilautomatisierten Prefoming

Die thermische Binderaktivierung bei der Konsolidierung erfolgte nicht mit einem Bügeleisen, sondern mit Hilfe eines Infrarotstrahlers. Diese Abänderung des Fertigungsprozesses in nur einem Teilprozess ermöglicht eine Abschätzung des Einflusses den eine einzelne Technologie auf die gesamte Prozesskette haben kann. Tabelle 27 zeigt die in einem Einzelversuch gemessenen Energieverbräuche der verwendeten Anlagen und die mittels des Modells errechneten CO₂-Äquivalente, jeweils in den einzelnen Prozessschritten.

Tabelle 27: Energie und CO₂-Äquivalente des alternativen Herstellprozesses für L-Winkel mit RTM und automatischem Prefomingprozess und IR-Binderaktivierung

Teilprozess	Anlagen - wiederkehrendes CO ₂ (Green Responsibility, 2012)	Fasern	Faser- abfall	Harz	Harz- abfall	Hilfsstoffe (ecoinvent Centre, 2015)	Energie
Zuschnitt	0,50 kg	5,75 kg	1,27 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,14 kg	0,84 kWh
Prefoming	0,06 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,06 kg	0,10 kWh
Rüsten	14,73 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	1,36 kg	24,97 kWh
Injektion	13,04 kg	0,00 kg	0,00 kg	1,10 kg	0,00 kg	0,00 kg	22,11 kWh
Tempern	27,16 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	46,04 kWh
Entformen	2,36 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	4,00 kWh
Reinigen	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,73 kg	0,26 kg	0,00 kWh
Summe	57,85 kg	5,75 kg	1,27 kg	1,10 kg	0,73 kg	1,82 kg	98,05 kWh

Die mit Hilfe des Modells berechneten Kosten der einzelnen Teilprozesse finden sich in Tabelle 28.

Tabelle 28: Kosten des alternativen Herstellprozesses für L-Winkel mit RTM-Verfahren und automatischem Preformingprozess und IR-Binderaktivierung

Teilprozess	Mitarbeiter	Anlagen - wieder- kehrende Kosten	Anlagen- einzel- kosten	Fasern	Faser- abfall	Harz	Harz- abfall	Hilfsstoffe
Zuschnitt	20,10 €	0,60 €	3,52 €	25,00 €	3,19 €	0,00 €	0,00 €	0,23 €
Preforming	22,78 €	0,03 €	0,13 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,23 €
Rüsten	261,30 €	8,13 €	59,65 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	12,67 €
Injektion	77,48 €	5,42 €	27,75 €	0,00 €	0,00 €	12,00 €	0,00 €	0,00 €
Tempern	26,80 €	18,25 €	142,24 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Entformen	20,10 €	1,38 €	10,47 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Reinigen	33,50 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	8,00 €	0,50 €
Summe	462,06 €	33,81 €	243,76 €	25,00 €	3,19 €	12,00 €	8,00 €	13,63 €

5.4.2 L-Winkel-Fertigung im DP-RTM-Verfahren

Im Vergleich zu den bislang betrachteten Fertigungsverfahren gibt es beim DP-RTM-Verfahren zwei wesentliche Unterschiede. Zum einen wird ein einseitiges Formwerkzeug verwendet. Dieses ist zumeist aus Metall (Stahl, Aluminium oder Invar), in einigen Fällen aber auch aus Faserverbundkunststoff, und gibt die spätere Bauteilgeometrie vor. Um das Fasermaterial porenfrei mit dem Matrixharz tränken zu können und auch den Faservolumengehalt einstellen zu können, wird als flexibles Gegenwerkzeug eine Folie verwendet, unter der das Fasermaterial evakuiert und dadurch vorkompaktiert wird. Der Aufbau entspricht im Wesentlichen dem in Abbildung 14 gezeigten Aufbau des SLI-Verfahrens, welches eine Variante des DP-RTM-Verfahrens darstellt. Der zweite Unterschied zu den RTM-Verfahren ist, dass ein Autoklav im Fertigungsprozess verwendet wird. Dieser stellt sowohl Überdruck zur Kompaktierung des Fasermaterials bereit, zum anderen liefert er die thermische Energie für die Viskositätssenkung im Infusionsprozess und die anschließende Aushärtung des Harzsystems. Die in einem Einzelversuch gemessenen Prozessparameter (Energieverbrauch), sowie die berechneten CO₂-Äquivalente sind in Tabelle 29 dargestellt.

Tabelle 29: Energie und CO₂-Äquivalente des Herstellprozesses für L-Winkel im DP-RTM Verfahren mit automatischem Preformingprozess

Teilprozess	Anlagen – wiederkehrendes CO ₂ (Green Responsibility , 2012)	Fasern	Faserabfall	Harz	Harzabfall	Hilfsstoffe (ecoinvent Centre, 2015)	Energie
Zuschnitt	0,50 kg	10,54 kg	3,82 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,46 kg	0,84 kWh
Preforming	0,06 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,06 kg	0,11 kWh
Rüsten FWZ	0,40 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	2,13 kg	0,68 kWh
Rüsten Autoklav	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,91 kg	0,00 kWh
Infusion	0,20 kg	0,00 kg	0,00 kg	1,10 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,34 kWh
Tempern	43,70 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	74,07 kWh
Entformen	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kWh
Reinigen	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,73 kg	0,32 kg	0,00 kWh
Summe	44,86 kg	10,54 kg	3,82 kg	1,10 kg	0,73 kg	3,88 kg	76,04 kWh

Tabelle 30 zeigt die in den Teilprozessen entstehenden Fertigungskosten.

Tabelle 30: Kosten des Herstellprozesses für L-Winkel im DP-RTM Verfahren mit automatischem Preformingprozess

Teilprozess	Mitarbeiter	Anlagen - wiederkehrende Kosten	Anlagen-einzelkosten	Fasern	Faserabfall	Harz	Harzabfall	Hilfsstoffe
Zuschnitt	33,50 €	0,95 €	5,87 €	45,84 €	9,58 €	0,00 €	0,00 €	2,70 €
Preforming	47,85 €	0,04 €	0,22 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,23 €
Rüsten FWZ	436,43 €	0,40 €	3,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	18,16 €
Rüsten Autoklav	320,30 €	4,08 €	27,69 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	5,56 €
Infusion	154,40 €	1,05 €	6,92 €	0,00 €	0,00 €	12,00 €	0,00 €	0,00 €
Tempern	47,85 €	15,97 €	66,14 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Entformen	20,10 €	0,01 €	0,13 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Reinigen	33,50 €	0,02 €	0,22 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	8,00 €	0,61 €
Summe	1093,93 €	22,52 €	110,19 €	45,84 €	9,58 €	12,00 €	8,00 €	27,26 €

5.4.3 L-Winkel-Fertigung im Prepreg-Verfahren

Die Fertigung von Bauteilen im Prepreg-Verfahren benötigt ebenso wie das zuvor gezeigte DP-RTM Verfahren einen Autoklaven. Dieser ist vor Allem notwendig, um den Harzüberschuss aus dem Halbzeug zu drücken, der eventuell vorhandene Poren herauszuspülen soll. Der Fertigungsaufbau besteht wie beim DP-RTM-Verfahren, bzw. SLI-Verfahren, aus einem einseitigen FWZ mit einem Vakuumaufbau. Es wird entgegen dem SLI-Aufbau jedoch nur ein Vakuumanschluss benötigt, um den Fertigungsaufbau zu evakuieren. Da ein CO₂-Äquivalent für

Prepreg-Material nicht unmittelbar verfügbar war, wurde basierend auf einem angenommenen Faservolumengehalt von 50 % und den Quellen für ein Kohlenstofffaseräquivalent und ein Matrixäquivalent ein CO₂-Äquivalent von 26,75 kg_{CO₂}/kg_{Kohlenstofffaser} errechnet. Tabelle 31 stellt die in einem Einzelversuch ermittelten Energieverbräuche und CO₂-Äquivalente entsprechend den verursachenden Teilprozessen dar.

Tabelle 31: Energie und CO₂-Äquivalente des Herstellprozesses für L-Winkel im Prepreg-Verfahren

Teilprozess	Anlagen - wiederkehrendes CO ₂ (Green Responsibility, 2012)	Prepreg	Prepreg Abfall	Hilfsstoffe (ecoinvent Centre, 2015)	Energie
Zuschnitt	0,50 kg	5,62 kg	1,60 kg	0,48 kg	0,84 kWh
Rüsten FWZ	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,54 kg	0,00 kWh
Rüsten Autoklav	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,81 kg	0,00 kWh
Tempern	49,56 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	83,99 kWh
Entformen	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kWh
Reinigen	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,27 kg	0,00 kWh
Summe	50,05 kg	5,62 kg	1,60 kg	2,11 kg	84,83 kWh

In Tabelle 32 sind die Kosten verursachungsgerecht nach Teilprozessen aufgeführt.

Tabelle 32: Kosten des Herstellprozesses für L-Winkel im Prepreg-Verfahren

Teilprozess	Mitarbeiter	Anlagen - wieder- kehrende Kosten	Anlagen- einzel- kosten	Prepreg	Prepreg Abfall	Hilfsstoffe
Zuschnitt	47,85 €	0,07 €	0,00 €	28,00 €	8,00 €	0,92 €
Rüsten FWZ	202,55 €	0,22 €	1,88 €	0,00 €	0,00 €	6,29 €
Rüsten Autoklav	57,04 €	0,60 €	4,00 €	0,00 €	0,00 €	5,12 €
Tempern	63,80 €	19,45 €	84,12 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Entformen	13,40 €	0,01 €	0,09 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Reinigen	33,50 €	0,02 €	0,22 €	0,00 €	0,00 €	0,52 €
Summe	418,14 €	20,37 €	90,31 €	28,00 €	8,00 €	12,85 €

5.4.4 Fertigung von zwei Flügelrippen

Die Fertigung der Flügelrippen erfolgte äquivalent zur Prozesskette der L-Winkel-Fertigung im DP-RTM-Verfahren (siehe Kapitel 5.4.2). Eine Besonderheit war jedoch, dass beide Rippen zeitgleich auf einem gemeinsamen Formwerkzeug gefertigt wurden, welches die Geometrie von Rippe 2 als auch von Rippe 3 abbildet (siehe Abbildung 43). Dieses Formwerkzeugkonzept wurde angewendet, um Material beim FWZ einzusparen und damit die Gesamtkosten für das

Formwerkzeug möglichst gering zu halten. Darüber hinaus bietet dieses Konzept auch den Vorteil, dass nur einen Vakuumaufbau für beide Bauteile zusammen benötigt wird, wodurch die Arbeitszeit für einen Vakuumaufbau entfällt. Da beide Rippen in einem Autoklavprozess gemeinsam gefertigt werden können, spart dies außerdem Prozesszeit (=Energie).

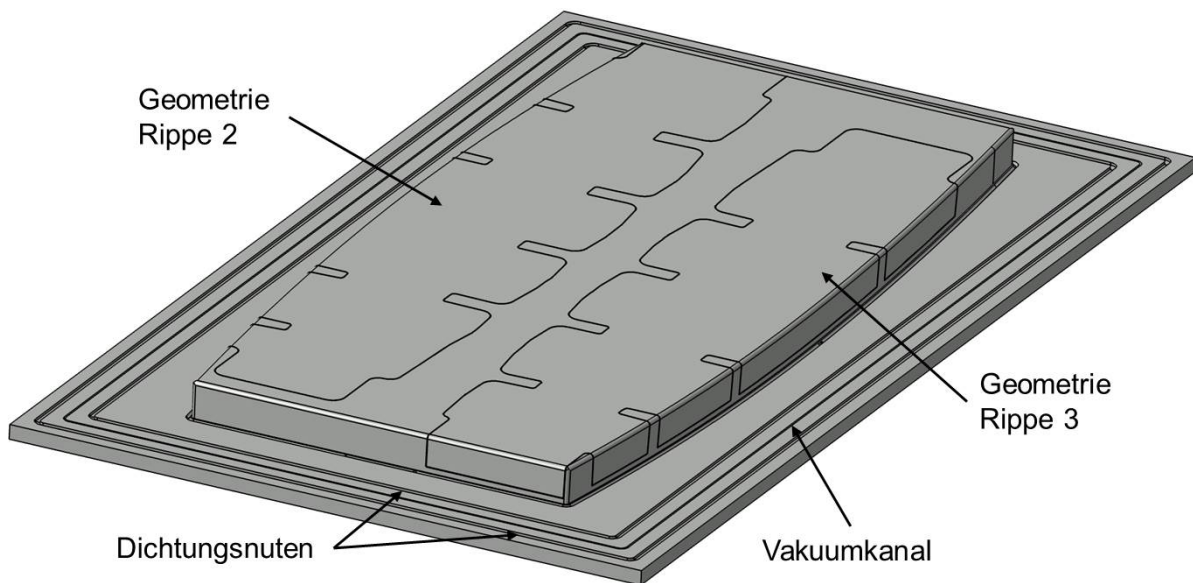


Abbildung 43: Formwerkzeug der Flügelrippen 2 und 3

Wie bei den vorhergegangenen Prozessen, wurde die Fertigung der Flügelrippen detailliert dokumentiert. Im Rahmen dieser Arbeit wurden die Prozessdaten in einem Einzelversuch ermittelt. Die Ergebnisse sind in Tabelle 33 und Tabelle 34 dargestellt.

Tabelle 33: Energie und CO₂-Äquivalente des Herstellprozesses für 2 Flügelrippen im DP-RTM Verfahren

Teilprozess	Anlagen – wiederkehrendes CO ₂ (Green Responsibility , 2012)	Fasern	Faserabfall	Harz	Harzabfall	Hilfsstoffe (ecoinvent Centre, 2015)	Energie
Zuschnitt	3,98 kg	828,88 kg	423,02 kg	0,00 kg	0,00 kg	7,03 kg	6,32 kWh
Preforming	4,66 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	4,94 kg	7,38 kWh
Rüsten	2,83 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	14,51 kg	4,48 kWh
Infusion	0,40 kg	0,00 kg	0,00 kg	33,12 kg	6,12 kg	0,00 kg	0,63 kWh
Tempern	171,14 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	271,23 kWh
Entformen	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kWh
Reinigen	0,45 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,00 kg	0,88 kg	0,72 kWh
Summe	183,46 kg	828,88 kg	423,02 kg	33,12 kg	6,12 kg	27,35 kg	290,76 kWh

Tabelle 34: Kosten des Herstellprozesses für 2 Flügelrippen im DP-RTM Verfahren

Teilprozess	Mitarbeiter	Anlagen - wiederkehrende Kosten	Anlagen-einzelkosten	Fasern	Faserabfall	Harz	Harzabfall	Hilfsstoffe
Zuschnitt	221,10 €	1,59 €	7,05 €	1882,19 €	1000,85 €	0,00 €	0,00 €	4,22 €
Preforming	869,66 €	0,98 €	2,36 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	5,01 €
Rüsten	562,80 €	1,47 €	7,30 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	53,40 €
Infusion	113,90 €	0,14 €	0,57 €	0,00 €	0,00 €	260,42 €	48,13 €	0,00 €
Tempern	40,20 €	78,33 €	369,59 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Entformen	241,20 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
Reinigen	321,60 €	0,24 €	1,16 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	2,37 €
Summe	2370,46 €	82,75 €	388,03 €	1882,19 €	1000,85 €	260,42 €	48,13 €	65,00 €

Zwischenfazit

Die Dokumentation von Faserverbundfertigungsprozessen mit Hilfe der Infrarotvideotechnik ist hilfreich, da innerhalb der Erfassungsgrenze des Videobildes alle Ressourcenströme erfasst werden. Stoff- und Energieströme können auf diese Weise zwar nur bedingt ermittelt werden, aber die Verwendung von parallel verwendeten Messeinrichtungen ermöglicht deren Quantifizierung.

Das modulare System zur Modellierung von Prozessketten der Faserverbundfertigung ermöglicht die Abbildung verschiedener Varianten von Prozessketten. Dies zeigt, dass die eingeführte Methodik den Vergleich alternativer Faserverbundprozessketten möglich macht.

Bereits während der Prozessdokumentation wurde deutlich, dass die einheitliche Bezeichnung von Teilprozessen essentiell für eine spätere Vergleichbarkeit ist. Dies kann nur durch intensive Kommunikation zwischen den Parteien erreicht werden, die jeweils fertigen, dokumentieren oder modellieren. Auch die Vorgabe von Begriffen durch den Modellbildner ist ggf. nicht eindeutig für den Mitarbeiter in der Fertigung und genutzte Begriffe sollten immer klar definiert sein.

6 Vergleich der Fertigungsprozesse

Im Folgenden werden die unterschiedlichen Prozessvarianten und Bauteile miteinander verglichen. Zunächst werden für den Vergleich die CO₂-Äquivalente, unterteilt in die einzelnen Teilprozesse, herangezogen. Die Darstellung mit Hilfe eines Tortendiagramms ermöglicht es direkt die treibenden Teilprozesse hinsichtlich des CO₂-Aufkommens zu identifizieren. Da die Fasern beim Zuschnittprozess in den Fertigungsprozess einfließen, sind die CO₂-Äquivalente der Kohlenstofffasern in diesem Teilprozess enthalten. Der direkte Vergleich der zwei RTM-Prozesse zur Herstellung der L-Winkel, einmal mit manuellem Preforming und Konsolidierung mittels Bügeleisen (Abbildung 44) gegenüber der Prozessvariante mit automatisiertem Preforming und IR-Konsolidierung (Abbildung 45) zeigt, dass sich die zwei Teilprozesse deutlich um mehr als Faktor 2 unterscheiden.

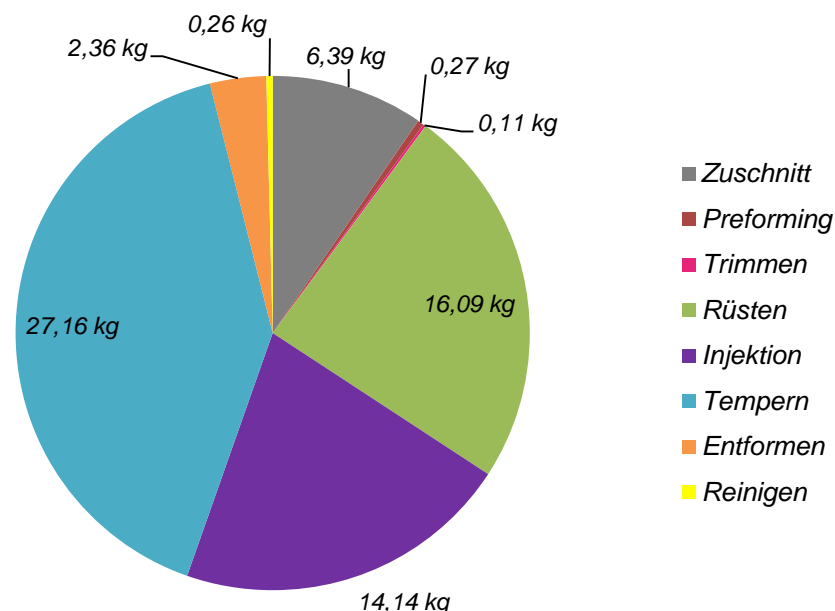


Abbildung 44: Verteilung der wiederkehrenden CO₂-Äquivalente beim L-Winkel im RTM-Prozess

Es ist allerdings auch offensichtlich, dass dieser Unterschied kaum Einfluss auf das Verhältnis der CO₂-Äquivalente bezogen auf die gesamte Prozesskette hat. Der Unterschied von 0,27 kg des manuellen Fertigungsschrittes gegenüber 0,12 kg CO₂-Äquivalent beim automatisierten Teilprozess ist zwar vorhanden, im Vergleich zu den anderen Teilprozessen jedoch kaum wahrnehmbar.

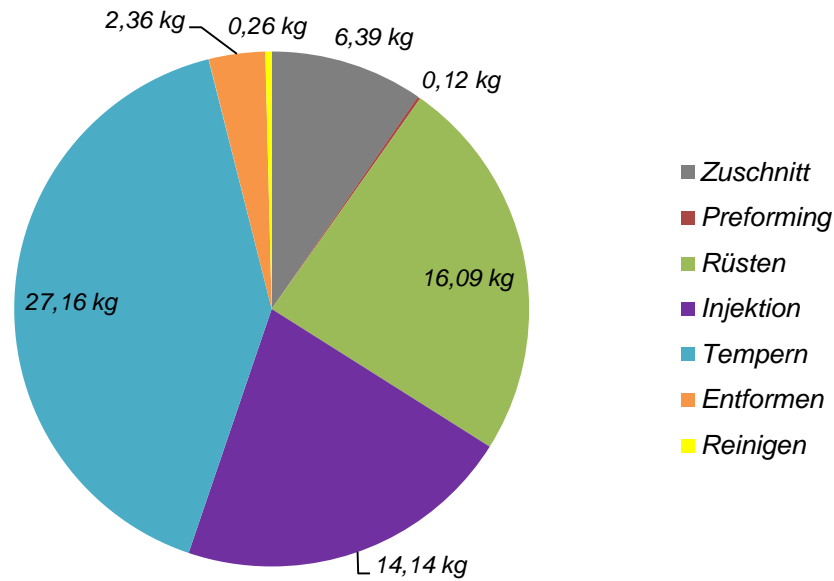


Abbildung 45: Verteilung der wiederkehrenden CO₂-Äquivalente beim L-Winkel im RTM-Prozess mit automatisiertem Preforming-Prozess und IR-Konsolidierung

Die Verlagerung des Fertigungsprozesses in den Autoklaven (Abbildung 46) zeigt, dass die Verteilung der CO₂-Äquivalente im Vergleich zu den zwei Fertigungsverfahren im RTM-Verfahren deutlich abweicht. Der im DP-RTM-Verfahren im Autoklaven hergestellte L-Winkel war doppelt so dick wie die anderen L-Winkel. Mit 4 mm Bauteildicke gegenüber 2 mm wurde nominell doppelt so viel Faser- und Matrixmaterial benötigt. Gegenüber den anderen Prozessvarianten, inklusive dem Prepreg-Verfahren, ist hier jedoch zu erkennen, dass durch die größere Materialmenge der Zuschnittprozess offenbar effizienter in punkto Materialausnutzung und Energiebedarf ist, da das CO₂-Äquivalent des Zuschnittprozesses nicht doppelt so hoch ist wie bei den anderen Prozessvarianten. Neben dem effizienteren Zuschnittprozess ist sehr deutlich der größere Energiebedarf des Temperzyklus im Autoklaven zu erkennen, der mit einem deutlichen Plus von 16,5 kg CO₂-Äquivalent zu Buche schlägt. Dagegen muss jedoch beachtet werden, dass die Gesamtmenge an CO₂-Äquivalent von ca. 66,5 kg bei den RTM-Varianten deutlich höher ist als im DP-RTM-Verfahren mit ca. 60,5 kg, was auf die Energieverbräuche der Anlagen während der Rüst- und Injektionsprozesse zurückzuführen ist. In diesen Zeiten ist der Energieverbrauch durch den „Stand-by“-Betrieb signifikant höher als beim Autoklaven, bei dem lediglich der Steuerungscomputer in Betrieb ist.

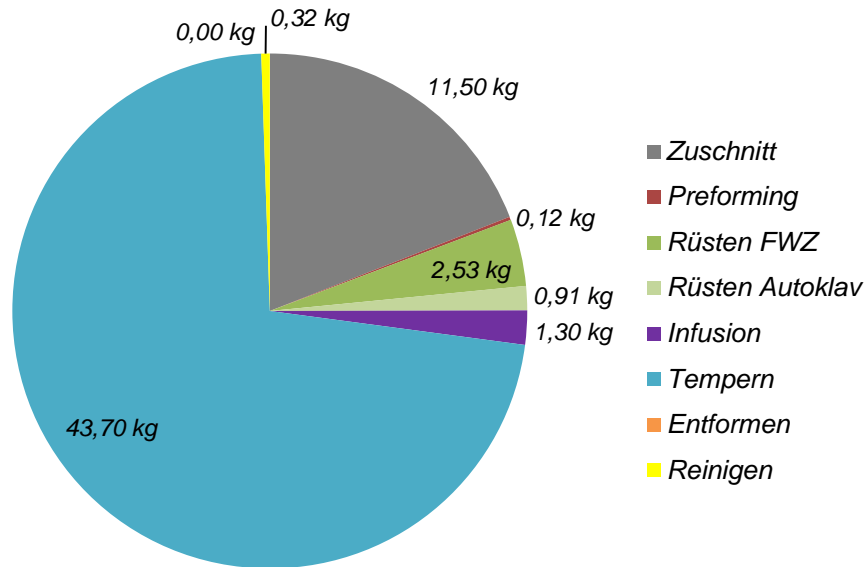


Abbildung 46: Verteilung der wiederkehrenden CO₂-Äquivalente beim L-Winkel im DP-RTM-Prozess

Die Rippe aus Prepreg-Material (Abbildung 47) zeigt, dass in dieser Prozessvariante CO₂-Äquivalente beinahe ausschließlich durch das vorimprägnierte Fasermaterial während des Zuschnittprozesses und durch den Temperzyklus entstehen. Der Teilprozess Infusion/Injektion entfällt komplett und auch die Teilprozesse Preforming und Entformen fallen in Bezug auf Energie- oder Hilfsstoffverbräuche komplett weg, da hier weder Hilfsstoffe noch Energieverbraucher verwendet werden.

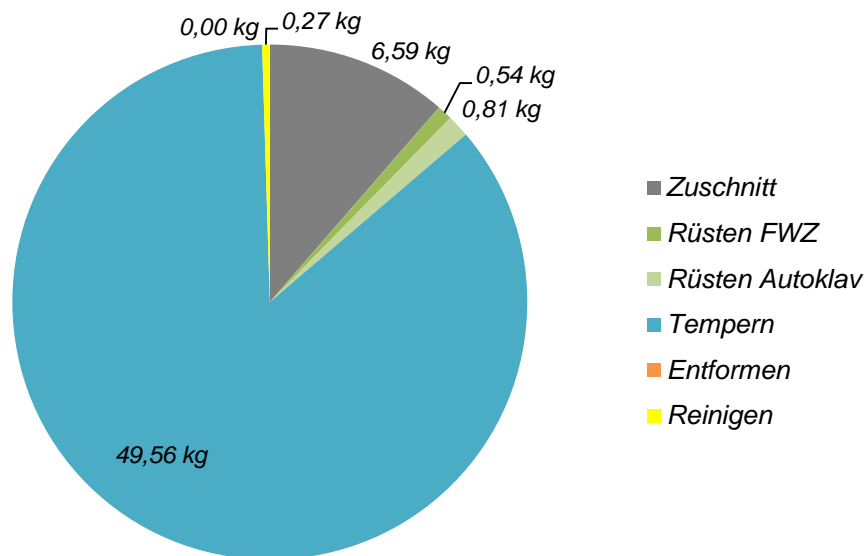


Abbildung 47: Verteilung der wiederkehrenden CO₂-Äquivalente beim L-Winkel im Prepreg-Prozess

Erweiterte man die Bilanzierungsgrenzen auf die Lagerung der Halbzeuge, würden bei allen Prozessvarianten die Energiebedarfe für Lagerung bei -18 °C hinzukommen. Allerdings fielen beim Prepreg-Prozess deutlich größere Kapazitäten für Kühlräume an, da dort nicht nur das Matrixsystem, sondern das gesamte vorimprägnierte Fasermaterial auf Rollen gelagert werden muss.

Abbildung 48 zeigt die Verteilung der generierten CO₂-Äquivalente bei der Fertigung der zwei Flügelrippen in einem Prozess. Der Temperprozess ist hier nur mit rund 16 % an den CO₂-Emissionen beteiligt, während er bei den zwei vorhergegangenen Autoklavprozessen (L-Winkel DP-RTM 72 %, L-Winkel Prepreg 86 %) deutlich größere Anteile ausmacht. Demgegenüber hat sich der Anteil der CO₂-Emissionen durch das Fasermaterial deutlich erhöht und beträgt nun rund 78 % der Gesamtemissionen.

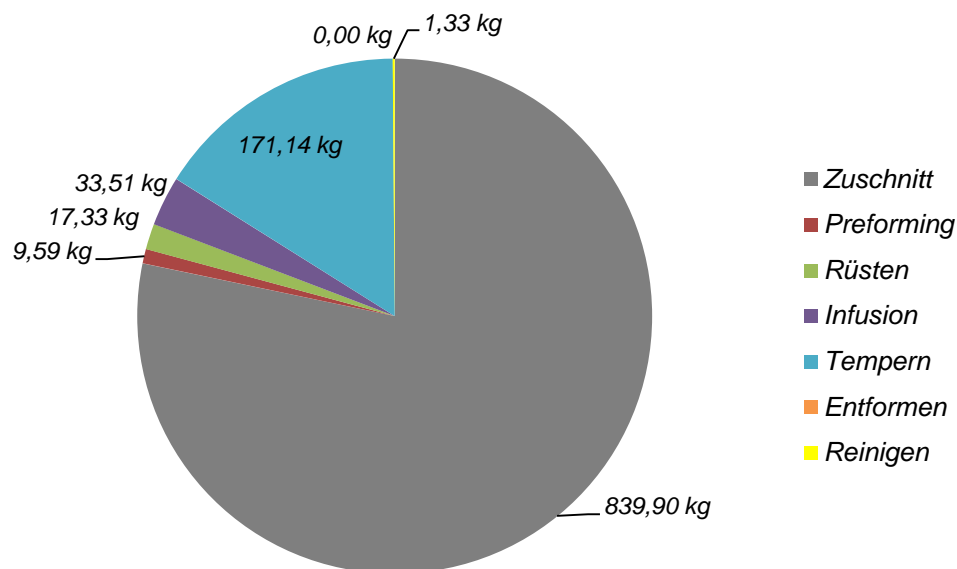


Abbildung 48: Verteilung der wiederkehrenden CO₂-Äquivalente bei Rippe 2 und 3 im DP-RTM-Prozess

6.1 Prozessbewertung mit Hilfe des Effizienzkriteriums

Im Folgenden wird nun das Effizienzkriterium nach Gleichung (5) berechnet, um die verschiedenen Prozesse hinsichtlich ihrer Ressourceneffizienz zu vergleichen. Der Risikofaktor wird dabei R=1 gesetzt, da im Rahmen dieser Arbeit, wie in Kapitel 4 beschrieben, keine repräsentativen Ausfallquoten bzw. Prozessrisiken ermittelt werden konnten.

Tabelle 35 zeigt zunächst eine Zusammenfassung aller dokumentierten Prozesse. Es zeigt sich, dass EK₂ für alle L-Winkel-Prozesse in derselben Größenordnung liegt, es jedoch auch deutliche Unterschiede gibt, speziell hinsichtlich der Energieeffizienz und der Effizienz der Hilfsstoffnutzung.

Tabelle 35: Effizienzkriterien EK₂ der untersuchten Bauteile und ihrer Fertigungsprozesse

Bauteil / Prozess	Summe CO ₂ Äquivalent pro Bauteil	(Faser _{OUT} / Faser _{IN}) * CO ₂ Faser	(Matrix _{OUT} / Matrix _{IN}) * CO ₂ Matrix	(Hilfsstoffe _{OUT} / Hilfsstoffe _{IN}) * CO ₂ Hilfsstoff	(Energie _{OUT} / Energie _{IN}) * CO ₂ Energie	EK₂ [kg CO₂/kg]
L-Profil RTM	66,78 kg	0,27 kg	0,67 kg	1,92 kg	57,99 kg	60,86 kg
L-Profil RTM alternativ	66,52 kg	0,22 kg	0,67 kg	1,82 kg	57,85 kg	60,55 kg
L-Profil DP-RTM	60,39 kg	0,36 kg	0,67 kg	3,88 kg	44,86 kg	49,77 kg
L-Profil Prepreg	57,77 kg	0,29 kg		2,11 kg	50,04 kg	52,44 kg
Rippe 2&3	1072,80 kg	0,51 kg	0,18 kg	27,35 kg	171,38 kg	199,43 kg

Betrachtet man die verschiedenen Prozessketten für die Herstellung des L-Winkelprofils so wird deutlich, dass der RTM-Prozess gegenüber den anderen Prozessvarianten effizienter hinsichtlich der Hilfsstoffausnutzung ist. In punkto Energieausnutzung besitzen beide RTM-Varianten jedoch eine niedrigere Effizienz als die Autoklav-Verfahren. Dies zeigt sich sowohl anhand der Werte, die EK₂ annimmt, als auch am Gesamt-CO₂-Äquivalent, welches bei den Autoklavprozessen um ca. 6,5 kg niedriger ist. Dieser erhöhte Energiebedarf, und damit auch die höheren CO₂-Äquivalente, werden vermutlich durch den Rüstprozess bei der RTM-Fertigung generiert, da dieser ca. 25 % des CO₂-Äquivalents der RTM-Prozesse ausmacht. Entgegen der allgemeinen Ansicht Autoklavprozesse seien energetisch wenig effizient, zeigen diese Ergebnisse, dass dies im betrachteten Fall für den L-Winkel nicht zutreffend ist. Eine allgemeingültige Aussage lässt sich daraus jedoch nicht ableiten, da RTM-Prozesse in der industriellen Anwendung einen deutlich höheren Automatisierungsgrad besitzen als im Labor, und dadurch Rüstzeiten und einhergehende Energieverbräuche ggf. gänzlich wegfallen. Der Ausnutzungsgrad der Fasermaterialien zwischen den zwei Varianten des RTM-Verfahren zeigt sehr deutlich, wie sich der optimierte Zuschnittprozess und der dadurch obsolete Trimmprozess positiv auf die Effizienz der Faserausnutzung auswirken.

Es sollen nun für die untersuchten Prozesse die Beiträge von Fasern, Matrices, Hilfsstoffen und Energie zum Effizienzkriterium ins Verhältnis gesetzt werden, um mögliche Treiber hinsichtlich der ineffizienten Nutzung der einzelnen Komponenten zu bestimmen.

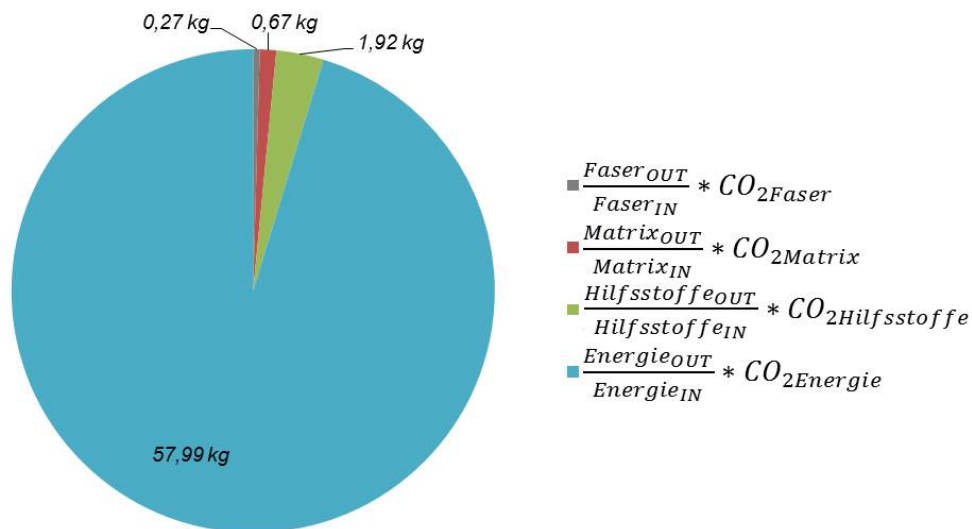


Abbildung 49: Verhältnis der Summanden für EK₂ beim L-Winkel im RTM-Prozess

Abbildung 49 zeigt, dass der Energieterm des Effizienzkriteriums beim RTM-Prozess mit über 95 % den mit Abstand größten Anteil ausmacht. Zurückzuführen ist dies auf den großen Energieeintrag in den Prozess, der jedoch nicht unmittelbar für die Bauteilherstellung notwendig ist. Die Verteilung der Anteile für EK₂ ist in Abbildung 50 für den im RTM-Prozess hergestellten L-Winkel mit automatisiertem Preform-Verfahren und IR-gestützter Konsolidierung dargestellt und weicht in den Verhältnissen kaum vom Basisprozess ab. Der Prozess mit dem alternativen Preforming-Prozessschritt (Abbildung 50) schneidet absolut etwas besser ab, da der Zuschnitt-Prozess optimiert werden konnte. Das Trimmen entfällt durch einen Schnittplan, der die zunehmende Länge der äußeren Lagen des Winkels berücksichtigt, was die Materialausnutzung leicht verbessert. Des Weiteren ist der IR-Strahler für die Binderaktivierung energetisch effizienter, da er eine geringere Leistungsaufnahme hat und zusätzlich in kürzerer Zeit eine Durchwärmung des Preforms gewährleisten kann. Im Vergleich zu der sehr ineffizienten Nutzung der Energie in diesen Prozessen, fallen die zuvor genannten Optimierungen jedoch kaum ins Gewicht.

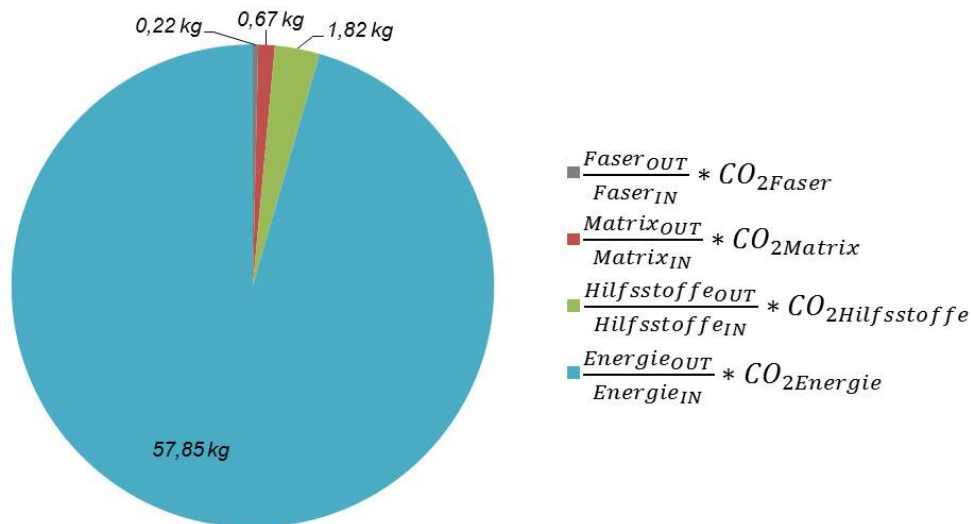


Abbildung 50: Verhältnis der Summanden für EK₂ beim L-Winkel im RTM-Prozess mit automatisiertem Preforming-Prozess und IR-Konsolidierung

Der ökonomische Vergleich der zwei RTM-Prozessvarianten (Abbildung 51) zeigt, dass die Differenz in den Herstellkosten lediglich durch den Trimm-Prozess entsteht. Durch den energetisch günstigeren Preformingprozess mit den IR-Strahlern können an dieser Stelle die Kosten nur um 4 Cent gesenkt werden, wohingegen der Wegfall des Trimm-Prozesses 16,80 € einspart. Dies zeigt, dass in diesem Falle durch die Optimierung des Prozesses hinsichtlich der Faserausnutzung, und damit der Ressourceneffizienz, auch eine ökonomische Verbesserung erzielt werden konnte.

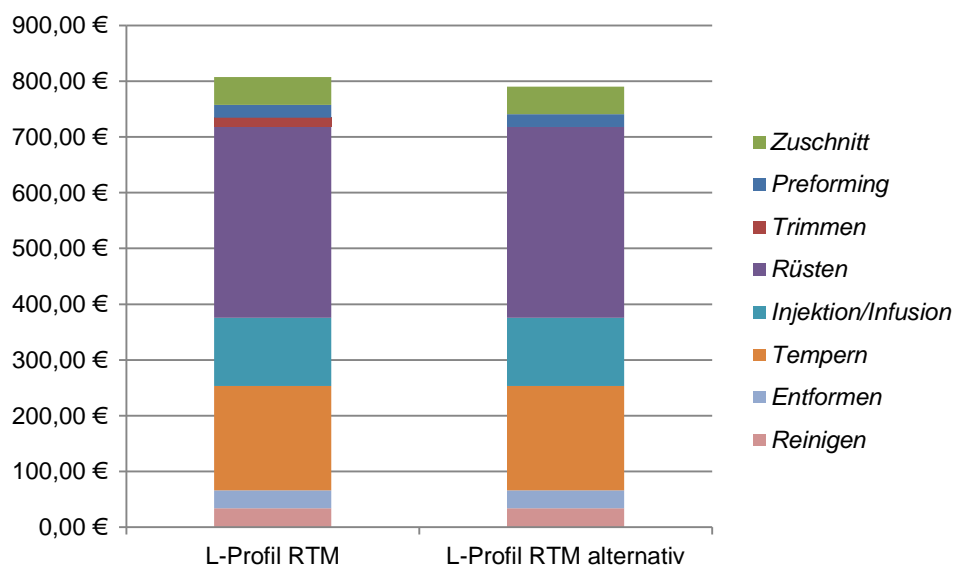


Abbildung 51: Ökonomischer Vergleich der RTM-Prozessvarianten

Auch bei den beiden im Autoklav gefertigten L-Winkeln (Abbildung 52 und Abbildung 53) stellt der Energieterm mit rund 90 % den größten Anteil an EK_2 . Bei der Darstellung zum DP-RTM-Verfahren (Abbildung 52) ist zu sehen, dass der Term, der den Nutzungsgrad der Matrix angibt, dem der RTM-Prozesse entspricht. Der Hilfsstoffbedarf ist beim DP-RTM-Prozess mit Faktor 2 jedoch deutlich größer, da hier gegenüber dem RTM-Verfahren zusätzlich der Vakuumaufbau mit Dichtmasse, Folie und Abreibgewebe, und überdies auch die längeren Zuleitungen für die Infusion benötigt werden. Der Hilfsstoffanteil beim Prepreg-Prozess (Abbildung 53) entspricht demgegenüber den Anteilen der RTM-Prozesse. Hieraus kann jedoch keine Regel abgeleitet werden, da Leitungslängen bei RTM-Prozess, die einen großen Anteil der Hilfsstoffe ausmachen, immer ungefähr gleichbleibend sind. Bei einem Autoklav-Prozess fallen je nach Bauteilgröße sehr unterschiedlich große Mengen an Folien, Dichtmasse und Abreibgewebe an. Es muss jedoch auch berücksichtigt werden, dass bei Prozessen mit geschlossenen Formwerkzeugen Dichtungen zum Einsatz kommen, die zwar meist mehrfach verwendet werden können, aber nach einer gewissen Zyklenzahl ebenfalls verschlissen sind. Sind diese Dichtungen verschlissen, müssen sie ausgetauscht werden. Die verschlissenen Dichtungen werden entsorgt. Dies konnte im Rahmen dieser Arbeit nicht dargestellt werden, da die Dichtung beim RTM-Prozess aufgrund der kleinen Stückzahlen niemals ersetzt werden musste.

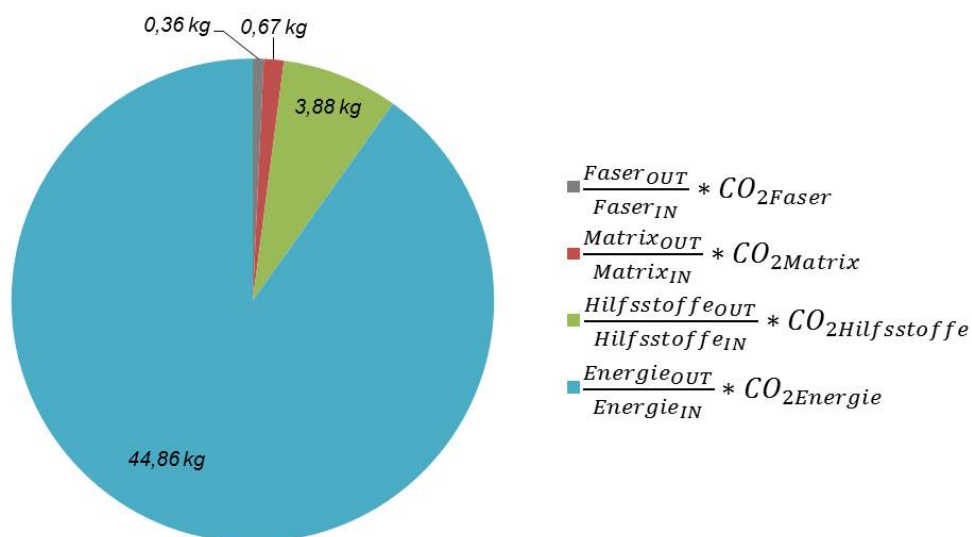


Abbildung 52: Verhältnis der Summanden für EK_2 beim L-Winkel im DP-RTM-Prozess

Eine Besonderheit beim Prepreg-Prozess ist sicherlich die Kombination von Fasern und Matrix im Halbzeug. Die Differenz in den Faservolumengehalten zwischen Halbzeug und dem fertig ausgehärteten Bauteil ist im Rahmen dieser Arbeit nicht berücksichtigt. Das Matrixsystem, das während des Temperprozesses durch den Autoklavdruck aus dem Bauteil gespült wird, um den

gewünschten Faservolumengehalt zu erreichen, müsste als zusätzlicher Harzabfall in einem Prozessschritt, z.B. beim Entformen oder Reinigen, berücksichtigt werden. Allerdings ist es sehr schwer diese Harzmenge messtechnisch zu ermitteln, da sie in anderen Hilfsstoffen, vor Allem im Abreibgewebe, gebunden wird. Eine andere Möglichkeit diese Materialmenge einzubeziehen wäre sie analytisch zu berechnen, basierend auf den vom Hersteller bezifferten Nenn-Faservolumengehalten von Halbzeug und fertig ausgehärtetem Produkt.

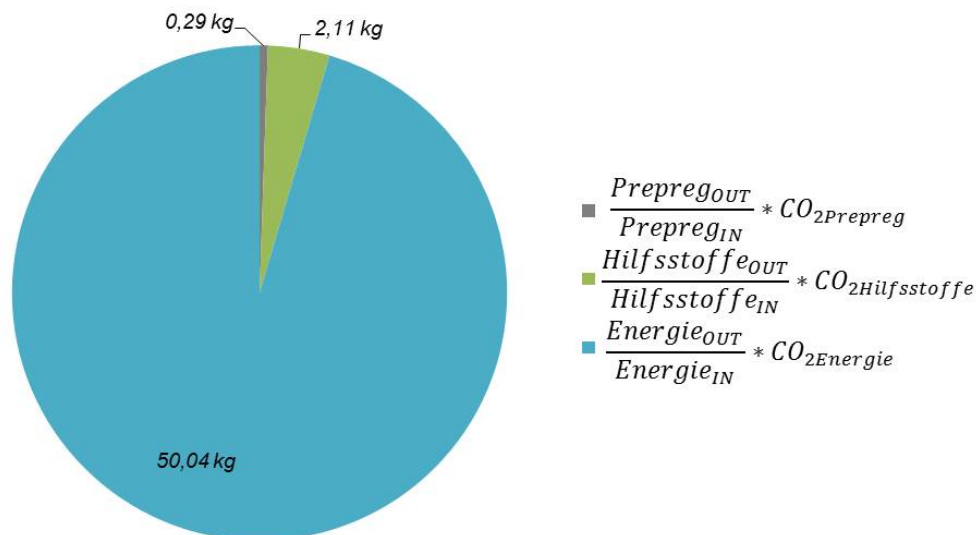


Abbildung 53: Verhältnis der Summanden für EK₂ beim L-Winkel im Prepreg-Prozess

Die Terme von EK₂ für den Ausnutzungsgrad der Materialressourcen, Fasern und Matrix, sind im Fertigungsprozess der Flügelrippen in der Gesamtbilanz kaum wahrnehmbar, jedoch auch im Vergleich zum L-Winkel im DP-RTM-Verfahren deutlich geringer. Dies deutet darauf hin, dass der Prozess effizienter hinsichtlich des Ressourcenbedarfes der Halbzeuge wird, wenn größere Bauteile gefertigt werden. Es ist dabei nachvollziehbar, dass insbesondere kleine komplexe Bauteile, unabhängig von der Prozessvariante, sehr ineffizient in Bezug auf den Nutzungsgrad des Fasermaterials sind, da viel Verschnitt anfällt. Größere, möglichst wenig komplexe Bauteile lassen grundsätzlich einen hohen Materialausnutzungsgrad zu. Allerdings muss berücksichtigt werden, dass der Materialausnutzungsgrad auch zu einem hohen Maße von der Form des Halbzeuges abhängt. So kann z.B. eine ungünstige Rollenbreite des Faserhalbzeuges bauteilunabhängig zu ineffizienter Materialausnutzung führen.

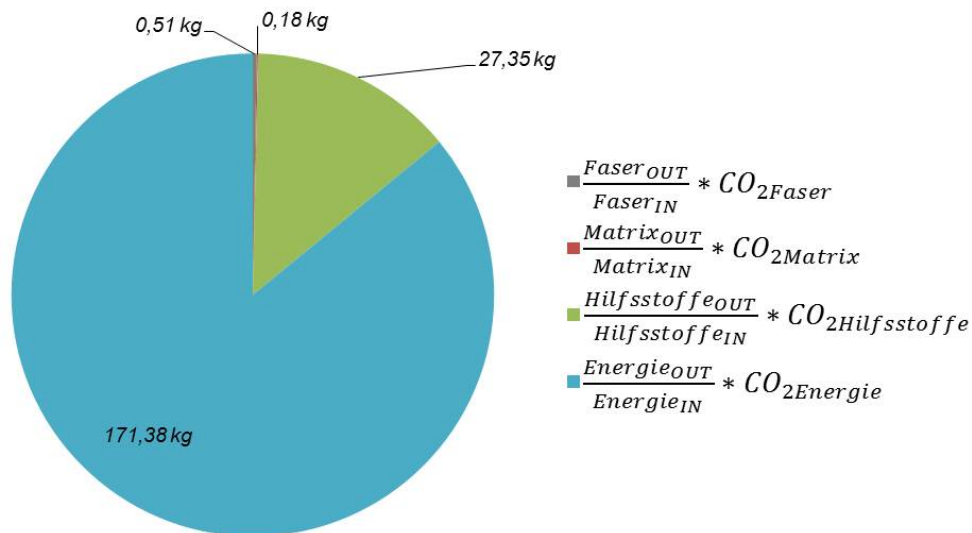


Abbildung 54: Verhältnis der Summanden für EK₂ bei Rippe 2 und 3 im DP-RTM-Prozess

Aufgrund des größeren und massiveren Formwerkzeuges und auch der höheren Bauteilmasse ist eine größere Gesamtmenge Energie zur Temperierung notwendig. Entsprechend Gleichung (9) ergibt sich für 2 Flügelrippen à 4400 g eine benötigte Wärmemenge von 999,68 kJ bzw. 0,2777 kWh. Wie jedoch aus Abbildung 54 ersichtlich wird, ist auch hier das Verhältnis der insgesamt in den Prozess eingespeisten Energie zur tatsächlich notwendigen Energie sehr groß. Der Energieterm stellt 95% von EK₂.

Im direkten Vergleich der beiden DP-RTM-Prozesse, L-Winkel gegenüber 2 Rippen, zeigt sich, dass die Effizienz der Halbzeuge und Hilfsstoffe im Verhältnis zum Gesamtprozess mit zunehmender Bauteilgröße offenbar besser wird, der Anteil von EK₂ wird kleiner (Abbildung 55). Beide Bauteile wurden mit demselben Fertigungsverfahren hergestellt. Bei dem relativ kleinen L-Winkel stellen Fasern und Matrix mit 0,73 % bzw. 1,33 % einen zwar geringen, aber sichtbaren Anteil an EK₂. Dagegen sind bei den Flügelrippen die Faser- und Matrix-Anteile mit 0,03 % und 0,15 % nicht mehr nennenswert. In Hinblick auf die Hilfsstoffe lässt sich sagen, dass einige Posten, wie beispielsweise Handschuhe für die technischen Mitarbeiter, immer gleich bleiben, während andere Posten direkt von der Bauteilgröße abhängig sind. Große, dünnwandige Bauteile benötigen relativ zu ihrer Masse besonders große Mengen an Abreißgewebe, Vakuumfolie und Siegelkit, während kleine, massive Bauteile mit sehr wenigen Hilfsstoffen auskommen können. Das heißt das nicht einzig die Bauteilgröße für den Hilfsstoffverbrauch verantwortlich ist, sondern vielmehr das Verhältnis Oberfläche zu Volumen eines Produktes einen Einfluss hat.

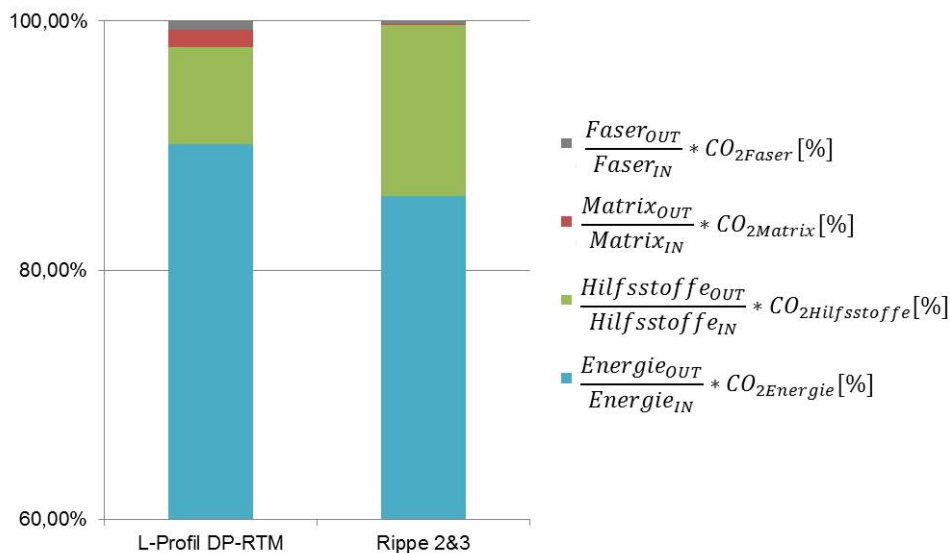


Abbildung 55: Vergleich der Anteile von EK_2 zwischen L-Winkel (DP-RTM) und den Flügelrippen

Eine Gesamtübersicht (Abbildung 56) der Herstellungskosten aller Bauteil- und Prozessvarianten zeigt, dass einige Teilprozesse bei allen analysierten Prozessen ähnliche Kosten verursachen. Der Rüstprozess fällt bei Prepreg-Verfahren deutlich günstiger aus, da der zeitaufwendige Aufbau für die Infusion/Injektion nicht anfällt. Fasst man beim Prepreg-Prozess die Rüstkosten mit den hier separat aufgenommenen Formwerkzeuigrüstkosten zusammen, sticht nur der L-Winkel im DP-RTM-Verfahren mit heraus. Die sehr hohen Rüstkosten des Formwerkzeuges sind hier durch eine Undichtigkeit im Vakuumaufbau entstanden, deren Suche viel Zeit und damit Lohnkosten in Anspruch genommen hat. Da dieser Wert auf einer Einzelmessung beruht, ist er nicht repräsentativ für die Rüstkosten beim DP-RTM-Verfahren und müsste über eine breitere Datenbasis statistisch angeglichen werden. In Bezug auf das Effizienzkriterium ist der Wert jedoch sehr wohl repräsentativ, da die hohen Kosten in diesem Teilprozess durch Arbeitszeit verursacht wurden, die keinen Einfluss auf EK_2 hat. Die Arbeitszeit hätte Auswirkungen auf EK_2 , wenn die Nutzung von Fertigungsräumlichkeiten, die ggf. klimatisiert sind und Energie verbrauchen, berücksichtigt würden. Nahezu verfahrens- und bauteilunabhängig sind die Teilprozesse Reinigen und Entformen, wenn man berücksichtigt, dass zwei Rippen entformt werden mussten und Arbeitszeit halbiert werden könnte. Der Temperzyklus bei den Rippen ist mit höheren Kosten verbunden, da das Investitionsvolumen des genutzten Autoklaven (ca. 8 m³) mehr als doppelt so groß ist wie das der RTM-Anlagentechnik und des kleineren Autoklaven (ca. 1 m³), der für die L-Winkel eingesetzt wurde.

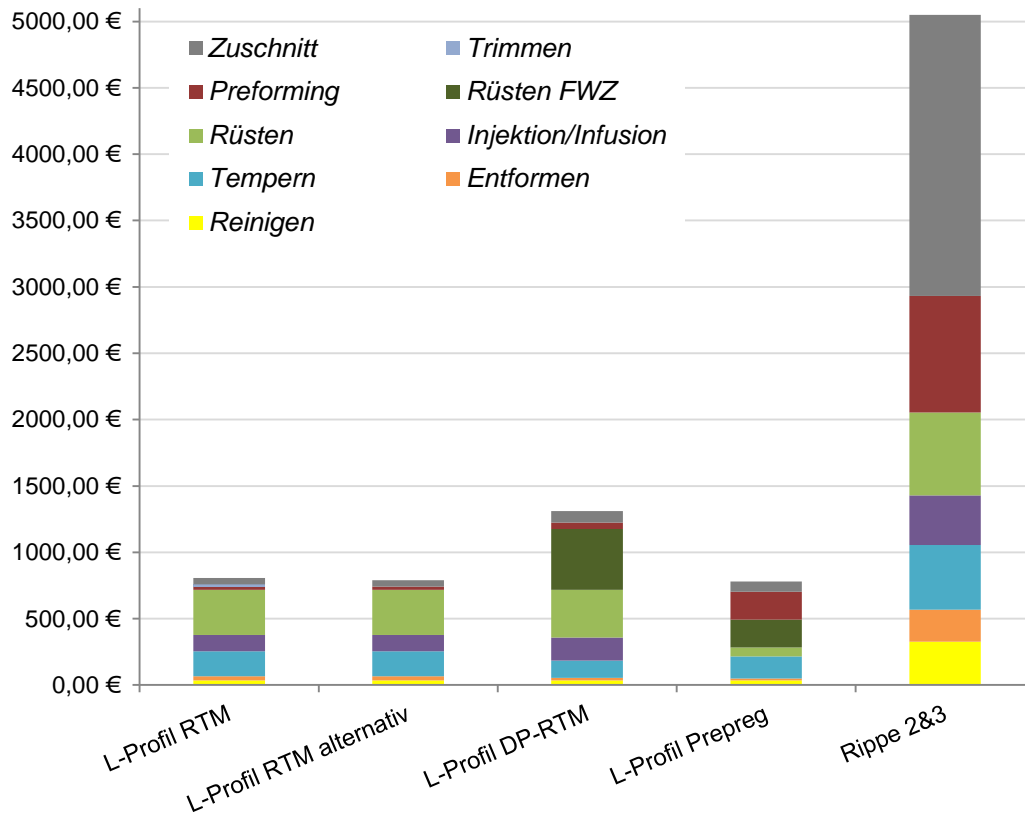


Abbildung 56: Kosten aller Bauteil- und Prozessvarianten

Der Vergleich der Temperprozesse der L-Winkel, die im RTM-Verfahren hergestellt wurden mit den zwei Winkeln, die im Autoklaven getempert wurden (Abbildung 44 - Abbildung 47) verdeutlicht, dass die Anlagentechnik einen besonders großen Einfluss auf die generierten CO₂-Äquivalente hat. Die rund doppelte Menge an CO₂-Äquivalent, die durch die Autoklavtemperierung erzeugt wird, findet sich nicht in den Kosten dieser Temperprozesse wieder. Die Kosten der Autoklavtemperierung sind tendenziell geringer, was zeigt, dass die Energie keinen starken Einfluss auf die Kostenstruktur, wohl aber auf die CO₂-Bilanz hat.

7 Fazit

Alle untersuchten Prozessvarianten der L-Winkel-Fertigung, und auch die Variation mit den deutlich größeren und komplexeren Flügelrippen, zeigen, dass der Großteil der in den Prozessen verwendeten Energie nicht wertschöpfend zu den Bauteileigenschaften beiträgt. Die Energieeffizienz aller Prozesse ist extrem niedrig. Allerdings ist bei allen untersuchten Prozessen zu beachten, dass die verwendete Anlagentechnik, sowohl RTM-Technik als auch die Autoklaven, nicht auf die gefertigten Bauteile optimiert ist. Sprich, die Anlagen sind aufgrund ihres universellen Einsatzbereiches im Laborbetrieb überdimensioniert gegenüber den verhältnismäßig kleinen Bauteilen, die mit ihnen gefertigt wurden. Daraus folgt, dass mit jedem Prozess große thermische Massen der Anlagentechnik erwärmt werden mussten, was in einem industriellen Serienprozess in dieser Ausprägung nicht unbedingt vorkommen würde. Der verwendete Autoklav hat beispielsweise eine Masse von ca. 8 t und besteht aus Stahl, der über die Dauer des Temperprozesses durch die warme Luft im Inneren erwärmt wird. Es entsteht ein Wärmestrom von der Heißluft zum Autoklavbehälter und anschließend über Strahlung an die Laborumgebung. Dieser Wärmestrom entzieht dem Temperprozess des Bauteils Energie, die kompensiert werden muss, um die Temperatur der Luft aufrecht zu erhalten. Die RTM-Anlagentechnik ist thermisch ebenfalls kaum isoliert, so dass auch hier viel Energie darauf verwendet werden muss die Formwerkzeugtemperatur aufrecht zu erhalten. Um die Energieeffizienz der Temperprozesse zu erhöhen, müssen Wärmeströme in die Umgebung minimiert werden, z.B. durch Isolation. Bei zyklischen Temperprozessen, wie sie in dieser Arbeit betrachtet wurden, ist die Reduzierung der thermischen Massen ebenfalls eine Möglichkeit den Energiebedarf zu senken und die Energieeffizienz zu erhöhen.

Das in dieser Arbeit eingeführte Effizienzkriterium EK_2 für die Bewertung von Fertigungsprozessen in puncto Ressourceneffizienz verdeutlicht die niedrige Effizienz bei der Nutzung von Energie bei allen untersuchten Prozessen. Wie im Absatz zuvor erwähnt ist dies sicherlich zu einem Teil der nicht spezialisierten Anlagentechnik aus dem Laborbetrieb geschuldet, jedoch sind die Größenverhältnisse bei industriellen Anlagen oftmals ähnlich. Eine Effizienzsteigerung bei Autoklavprozessen wird erreicht, indem Autoklaven meist mit einer großen Menge an Bauteilen beladen werden, die zusammen in einem Zyklus getempert werden. So kann das Verhältnis Anlagenmasse zu Summe der Bauteilmassen verringert werden. Referenzwerte aus einem industriellen Umfeld wären sehr nützlich, um abschätzen zu können, bei welchen Bauteilen welche Anlagentechnik am sinnvollsten einzusetzen ist. Wichtig ist an dieser Stelle auch den Risikofaktor direkt mit zu betrachten und Ausfallquoten zu erheben. Ein energetisch höchst ineffizienter Temperprozess kann sich als sehr positiv in der

Gesamtbetrachtung erweisen, wenn er eine hohe Prozesssicherheit gewährleistet. Ein energetisch optimierter, „ökologisch guter“, Temperprozess mit hohen Ausschussraten, der dazu führt, dass das Material gesamter Bauteile entsorgt werden muss, würde die Effizienz der Faser- Matrixausnutzung drastisch senken. Ökonomisch wäre dies ebenso relevant, da zu einem relativ späten Zeitpunkt innerhalb der Fertigungsprozesskette Ausschuss entsteht, und nicht nur die teuren Halbzeuge sondern auch besonders wertschöpfende und kostenintensive Arbeitsschritte, z.B. der Preform-Prozess, den Ausschuss besonders kostspielig machen würden.

Ein anderer Schluss, der sich aus der Berechnung der Effizienzkriterien ziehen lässt ist, dass die Hilfsstoffe, egal welchen Anteil sie an EK_2 haben, bei den untersuchten Prozessen immer sichtbar, das heißt hoch ineffizient, sind. In dieser Arbeit wird angenommen, dass Hilfsstoffe nicht wertschöpfend zu den Bauteileigenschaften beitragen, weshalb sie ohne Abzüge in das Effizienzkriterium eingehen. Dies ist insofern sinnvoll, als dass die verwendeten Hilfsstoffe oftmals charakteristisch für einzelne Fertigungsprozesse sind, und deshalb einen Anteil bei der Bewertung ausmachen sollten. Der Autoklavprozess mit einem einseitigen Formwerkzeug benötigt Vakuumfolie und Dichtband, um ein konsolidiertes Bauteil herzustellen. Ohne diese Hilfsstoffe wäre der gesamte Prozesskette nicht valide.

Die in Kapitel 2 aufgestellten Arbeitshypothesen konnten alle bestätigt werden.

1. Es ist notwendig den Fertigungsprozess detailliert mit allen Stoff- und Energieströmen zu dokumentieren, da nur auf diese Weise alle Verursacher von Emissionen im Prozess ermittelt werden können. Ebenfalls ist eine Zerlegung der Prozesskette in Teilprozesse nur durch detaillierte Prozessdokumentation möglich. Es wird jedoch darauf hingewiesen, dass einige, für eine Ökobilanz entscheidende, Stoffströme im Rahmen dieser Arbeit nicht erfasst wurden. Insbesondere gasförmige Emissionen, wie Dämpfe von Trennmitteln, Aceton oder das Ausgasen des Matrixsystems wurden aufgrund nicht vorhandener Messtechnik zunächst nicht betrachtet. Die vorgestellte Methodik lässt eine Integration dieser Größen im Nachhinein problemlos zu.
2. Die Infrarotvideoaufzeichnung ist als Werkzeug zur Prozessdokumentation besonders gut geeignet, wenn Prozesse aufgenommen werden müssen bei denen Menschen arbeiten, und deren Anonymität gewahrt werden muss. Da mit der IR-Videodokumentation keine personenbezogenen Daten generiert werden, ist eine Mitarbeiterüberwachung nahezu unmöglich. Andere Dokumentationsmethoden, wie Stoppuhr oder Waage, waren bei anderen Prozessschritten, die bzgl. Mitarbeiterüberwachung unkritisch waren, wesentlich schneller in der Umsetzung.
3. Das Erstellen eines universell verwendbaren Moduls, in dem jede Art von Teilprozess durch entsprechende Parametrisierung abgebildet werden kann, ermöglicht zwei Dinge:

- a. Jede Zusammensetzung von Fertigungsprozessketten kann durch die Aneinanderreihung beliebig vieler Module abgebildet werden.
 - b. Der modulare Aufbau ermöglicht die Verwendung bereits dokumentierter Teilprozesse und das Ersetzen bestehender Teilprozesse, was eine einfache Bewertung von alternativen Teilprozessen, bzw. Technologien, im Zusammenhang mit der gesamten Prozesskette ermöglicht.
4. Die Allgemeingültigkeit des Modells für Faserverbundfertigungsprozesse konnte insofern gezeigt werden, als dass sich alle untersuchten realen Fertigungsprozesse mit Hilfe des Modells abbilden und analysieren ließen. Beim Vergleich der Fertigungsprozesse zeigte sich ebenfalls, dass eine Vergleichbarkeit gegeben ist, sowohl zwischen Prozessvarianten, als auch zwischen verschiedenen Bauteilgeometrien bei gleichem Fertigungsprozess.

Die Haupthypothese der Arbeit konnte in Ansätzen ebenfalls verifiziert werden. Durch die Optimierung des Preforming-Prozesses für die RTM-Fertigung des L-Winkelprofils, die auch den Wegfall des Trimmprozesses zur Folge hatte, konnte der generative Anteil in diesem Fertigungsprozess erhöht werden, bzw. der Abfall von Fasermaterial und die Energie für die Konsolidierung des Preforms minimiert werden. Außerdem konnte gezeigt werden, dass der Autoklav, der gemeinhin als großer Energieverbraucher gilt, es im Falle der L-Winkel ermöglicht die Energieeffizienz gegenüber dem RTM-Verfahren zu verbessern (Tabelle 35). Bei der Betrachtung der Energieverbräuche nach Teilprozessen fällt besonders auf, dass die Wassertemperieranlage nicht nur während des Temperierprozesses selbst lief, sondern ebenfalls während der Rüst- und Entformungsarbeiten. An dieser Stelle besteht sicherlich Potential für eine Optimierung dieser Teilprozesse, so dass die Nutzung der Wassertemperieranlage auf den eigentlichen Temperprozess beschränkt werden kann.

Der Aspekt, dass Kohlenstofffasern als Material mit einem sehr hohen CO₂-Äquivalent von bis zu 50,0 kg_{CO2}/kg_{Kohlenstofffaser} gegenüber Stahl mit 0,9 - 6,2 kg_{CO2}/kg_{Stahl} (ecoinvent Centre, 2015) verarbeitet wurden, spielte bei den untersuchten Prozessen eine untergeordnete Rolle, da lediglich Faserverbundfertigungsprozesse untereinander verglichen wurden. Es wurde in allen Prozessen Fasermaterial mit demselben CO₂-Äquivalent verarbeitet, so dass eine Vergleichbarkeit der Prozessketten untereinander in jedem Falle gegeben ist. Der Ausnutzungsgrad der Fasern war im Vergleich zur Energieeffizienz der Prozesse immer hoch. Das CO₂-Äquivalent der Fasern wird jedoch eine entscheidende Rolle spielen, sobald der Risikofaktor für Prozesse, Materialien, Hilfsstoffe usw. ermittelt und einbezogen wird. Sobald es zu Ausschuss in einem Fertigungsprozess kommt, wirkt sich dies auf die Effizienz der Fasernutzung aus, die das CO₂-Äquivalent als Multiplikator hat.

Die Ermittlung der Herstellungskosten parallel zu den ökologischen Parametern der Prozesse konnte aufzeigen, dass der Fokus für eine Optimierung eines Prozesses durch die Auswertung auf ökologische oder ökonomische Gesichtspunkte gelenkt werden kann. Dies zeigt sich besonders bei der in den Prozessen verbrauchten Energie. Spielt sie hinsichtlich der Produktionskosten kaum eine Rolle, so macht sie 41 % (alternativer RTM-Prozess) bis 86 % (Prepreg-Prozess) der CO₂-Äquivalente aus. Nimmt man das Effizienzkriterium als Bewertungskriterium, um nach Optimierungsansätzen im Prozess zu suchen, so weist dieses sogar noch deutlicher auf das Potential der energetischen Optimierung hin. Der Energieterm der untersuchten Prozesse macht immer zwischen 90 % und 95 % des Effizienzkriteriums EK₂ aus.

Grundsätzlich ist an dieser Stelle anzumerken, dass es eine sehr geringe Datenbasis für das CO₂-Äquivalent der Kohlenstofffaser gibt. Die Literaturwerte variieren stark und oftmals ist nicht eindeutig ob auf die reine Faser Bezug genommen wird, auf weiterverarbeitete Halbzeuge oder gar auf Bauteile, die einen Fertigungsprozess bereits durchlaufen haben. Die Qualität dieser Daten ist entscheidend für das mit der aufgezeigten Methodik ermittelte Ergebnis. Im Rahmen dieser Arbeit ist dies nicht relevant, da in allen untersuchten Prozessen Kohlenstofffasern verarbeitet wurden. Solange ausschließlich Ergebnisse dieser Methodik untereinander verglichen werden, bei denen Kohlenstofffasern verarbeitet werden, können qualitative Aussagen über die Ressourceneffizienz der Prozesse und Komponenten zueinander gemacht werden. Für einen Vergleich mit Produkten aus anderen Werkstoffen wäre eine solide Datenbasis unverzichtbar.

8 Ausblick

Die Merkmale der Herstellprozesse wurden in dieser Arbeit in die drei Kategorien Stoff, Energie und Information gegliedert. Aus Gründen der Vereinfachung war es sinnvoll die Informationen zunächst direkt in Energie oder Stoffe zu überführen. Bei der zunehmenden Automatisierung der Faserverbundherstellung und damit einhergehenden prozessbegleitenden Qualitätsüberwachung und –Kontrolle, werden Informationen im Prozess eine immer größere Bedeutung bekommen. Informationen aus Messungen im laufenden Prozess könnten dazu genutzt werden Bauteile bereits frühzeitig als Ausschuss zu definieren und sie aus dem Prozess zu nehmen, so dass keine unnötigen wertschöpfenden und Ressourcen verbrauchenden Arbeitsschritte mehr durchgeführt werden. Eine prozessbegleitende Messung des Aushärtegrades (siehe Kapitel 5.2) der Matrix kann den Prozess derart beeinflussen, dass bei Erreichen des gewünschten Aushärtegrades der nächste Prozessschritt eingeleitet wird, so dass keine Sicherheitsfaktoren in den Temperaturzyklen verwendet werden müssen, die mit unnötigen Energieaufwänden verbunden sind (Liebers, et al., 2012). So kann Information den Fertigungsprozess insgesamt effizienter machen.

In der Anwendung hat sich gezeigt, dass für die weitere Nutzung des Modells eine weitere hierarchische Ebene eingeführt werden sollte. Diese Ebene könnte es ermöglichen jede Form von Montagearbeiten abzubilden. Mit dem hier vorgestellten Modell können nur monolithische Bauteile modelliert werden. Möchte man Integralbauteile aus mehreren Unterkomponenten, oder nachträglich verklebte, verniete oder verschraubte Bauteile darstellen, so wäre eine Ebene über der Einzelteilebene anzustreben. Auf diese Weise könnten auch Einzelteile, die in verschiedenen Fertigungsprozessen hergestellt werden, miteinander kombiniert werden. Die Methodik könnte auf diese Weise auf die Bewertung von Gesamtstrukturen angewendet werden.

Um die Bewertungsmöglichkeiten unter ökologischen Gesichtspunkten zu erweitern, sollten in weiterführenden Arbeiten bislang unberücksichtigte Prozessemissionen gemessen und in die Betrachtung einbezogen werden. Dazu können z.B. gasförmige Emissionen im Prozess durch Abdampfen von Trennmitteln, Aceton oder das Ausgasen des Matrixsystems gehören. Auch die technische Gebäudeausrüstung, z.B. der Kühlwasserverbrauch der verwendeten Anlagen, Druckluft für den Betrieb der Autoklaven, und der Energieverbrauch von Lagern und Transportmitteln wurden in dieser Arbeit nicht erhoben. Es wurde zunächst auf die maßgeblichen Komponenten fokussiert, aber für eine ganzheitliche Bewertung müssen auch diese in Zukunft einkalkuliert werden.

9 Literaturverzeichnis

Adams, R. D., et al. 2014. Recycling of Reinforced Plastics. *Applied Composite Materials*. 2014, Bd. Volume 21, Issue 1.

Alcott, Blake. 2008. The Sufficiency Strategy: Would Rich-World Frugality Lower Environmental Impact? *Ecological Economics*. 2008, Bd. Volume 64, Issue 4, S. 770–786.

Al-Habaibeh, A. und Parkin, R. 2003. An autonomous low-Cost infrared system for the on-line monitoring of manufacturing processes using novelty detection. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2003, Bd. Volume 22, Issue 3-4.

Al-Lami, A. und Hilmer, P. 2014. *Assessment of Composite Manufacturing Process Variation with the Help of a Process Model*. Braunschweig : Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt, 2014. IB 131-2014/050.

Angerer, A., et al. 2011. Design of an automation system for performing processes in aerospace industries. In: *Proceedings of IEEE International Conference on Automation Science and Engineering*. Trieste, Italy : IEEE, 2011. S. 557 - 562.

Asiedu, Y. und Gu, P. 1998. Product life cycle cost analysis: state of the art review. *International Journal of Production Research*. 1998, Bd. Volume 35, Issue 4.

Bellgran, M. und Säfsten, E.K. 2009. *Production development: design and operation of production systems*. London : Springer Science & Business Media, 2009.

Bergmann, Sven. 2013. Mobile Videoanalyse: Rüstzeiten unter der Lupe. *IT & Production*. [Online] 10 2013. [Zitat vom: 19. 02 2015.] http://www.it-production.com/index.php?seite=einzel_artikel_ansicht&id=60506.

Bogdanski, G., et al. 2012. Energy Monitoring in Manufacturing Companies – Generating Energy Awareness through Feedback. *The 19th CIRP International Conference on Life Cycle Engineering*. Berkeley, USA : Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2012.

Bölke, J., et al. 2012. *Leckageerkennung*. EP 2 518 465 A3 Europa, 31. 10 2012. Europäisches Patent.

Bos, Hariëtte. 2004. The Potential of Flax Fibres as Reinforcement for Composite Materials. *Dissertation*. Technische Universität Eindhoven : University Press Facilities, 2004.

Brandt, Jürgen, Drechsler, Klaus und Filsinger, Jürgen. 2001. Advanced Textile Technologies for the Cost Effective Manufacturing. Loen, Norway : RTO AVT specialist meeting on low cost composite structures, 2001.

Braz, R.G.F., Scavarda, L.F und Martins, R.A. 2011. Reviewing and improving performance measurement systems: An action research. *International Journal of Production Economics*. 133. Jg., 2011, Bd. Nr. 2.

Brickwedde, F. 2010. Ökologische Nachhaltigkeit. [Buchverf.] W. Krüger. *Die Zukunft gibt es nur einmal!* Wiesbaden : Gabler Verlag, 2010.

Brundtland, G., et al. 1987. *Our Common Future ('Brundtland report')*. Oxford : Oxford University Press, USA, 1987.

Bruno, Dave. 2010. *The 100 Thing Challenge: How I Got Rid of Almost Everything, Remade My Life, and Regained My Soul*. New York : Harper Collins, 2010. 9780061787744.

Bunse, K., et al. 2011. Integrating energy efficiency performance in production management - gap analysis between industrial needs and scientific literature. *Journal of Cleaner Production* 19. 19. Jg., 2011, Bd. Nr. 6, Volume 19, Issues 6–7.

Danilov, Maksim. 2012. Energieeffiziente Mikrowellentemperierung von kohlenstofffaserverstärkten Duroplasten. *Dissertation*. Technische Universität Braunschweig : DLR, Bibliotheks- und Informationswesen, 2012.

Das, Sujit. 2011. Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites. *Internatioinal Journal on Life Cycle Assessment*. 2011, Bd. Volume 16, Issue 3, S. 268-282 .

Deng, Yelin. 2014. Life Cycle Assessment of Biobased Fibre-Reinforced Polymer Composites. *Dissertation*. Leuven : KU Leuven, Science, Engineering & Technology, 2014. 978-94-6018-845-9.

Deutsches Institut für Normung e.V. 2009. DIN EN ISO 14040. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 11 2009.

DIN e.V. 2011. DIN EN ISO 14051. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2011.

Duflou, J.R., et al. 2014. Comparative impact assessment for flax fibre versus conventional glass fibre reinforced composites: Are bio-based reinforcement materials the way to go? *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2014, Bd. Volume 63, Issue 1.

Duflou, J.R., et al. 2012. Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study. *MRS bulletin*. 2012, Bd. Volume 37, Nr. 04.

Duflou, J.R., et al. 2009. Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing. *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2009, Bd. Volume 58, Issue 1.

Duflou, J.R., et al. 2012. Towards energy and resource efficient manufacturing: A processes and systems approach. *CIRP Annals - Manufacturing Technology* 61.2. 2012.

Duflou, J.R., Kellens, K. und Dewulf, W. 2011. Unit Process Impact Assessment for Discrete Part Manufacturing: A State of the Art. *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*. Issue 2, 2011, Volume 4.

Dyckhoff, H. und Souren, R. 2008. *Nachhaltige Unternehmensführung – Grundzüge industriellen Umweltmanagements*. Berlin / Heidelberg : Springer Verlag, 2008.

ecoinvent Centre. 2015. ecoinvent data 3.2. Dübendorf, Schweiz : Swiss Centre for Life Cycle Inventories, 2015.

ecoinvent. 2014. ecoinvent. [Online] 2014. [Zitat vom: 7. März 2014.] <http://www.ecoinvent.org/>.

Ehrenberger, S., et al. 2013. Recycling, Life-Cycle-Assessment und Rohstoffverfügbarkeit. [Buchverf.] H. E. Friedrich. *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Wiesbaden : Springer Fachmedien , 2013.

Ehrenstein, G.W. 2006. *Faserverbundkunststoffe Werkstoffe-Verarbeitung-Eigenschaften*. München : Carl Hanser Verlag, 2006.

Eickenbusch, Heinz und Krauss, Oliver. 2013. Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien. Berlin : VDI Zentrum Ressourceneffizienz GmbH, Mai 2013.

Endres, H.-J. und Habermann, C. 2014. The Project: Sustainability Racing—The Vision: Mobility of the Future. [Buchverf.] J. Wellnitz, A. Subic und R. Trufin. *Sustainable Automotive Technologies 2013: Proceedings of the 5th International Conference ICSAT 2013 (Lecture Notes in Mobility)*. Berlin : Springer International Publishing, 2014.

Engström, T. und Medbo, P. 1997. Data collection and analysis of manual work using video recording and personal computer techniques. *International Journal of Industrial Ergonomics*. 1997, Bd. Volume 19, Issue 4.

Europäische Kommission. 2003. *Europäische Kommission: Entwicklung einer thematischen Strategie für die nachhaltige Nutzung der natürlichen Ressourcen: KOM(2003)*. Brüssel : Kommission der Europäischen Gemeinschaften, 2003.

European Commission. 2011. Flightpath 2050 - Europe's Vision for Aviation. Belgium : Publications Office of the European Union, 2011. 978-92-79-19724-6.

eurostat. ec.europa.eu/eurostat. [Online] [Zitat vom: 16. 10 2014.] <http://epp.eurostat.ec.europa.eu/tgm/refreshTableAction.do;jsessionid=9ea7d07e30df517eb86f61984c6abfc0a201da13b9dd.e340aN8Pc3mMc40Lc3aMaNyTbxuOe0?tab=table&plugin=1&pcode=ten00117&language=de>.

Feiza, R., et al. 2015. Improving the CO2 performance of cement, part I: utilizing life-cycle assessment and key performance indicators to assess development within the cement industry. *Journal of Cleaner Production*. 2015, Volume 98.

Feldhusen, Jörg und Grote, Karl-Heinrich. 2013. *Pahl/Beitz Konstruktionslehre: Methoden und Anwendung erfolgreicher Produktentwicklung*. Berlin Heidelberg : Springer Vieweg, 2013. 3642295681.

Flemming, M., Ziegmann, G. und Roth, S. 1995. *Faserverbundbauweisen: Fasern und Matrices*. Berlin : Springer Verlag, 1995.

Flemming, M./ Ziegmann, G./ Roth, S. 1996. *Faserverbundbauweisen. Halbzeuge und Bauweisen*. Berlin : Springer Verlag, 1996.

Flottau, Jens und Norris, Guy. 2014. Airbus And Boeing Plan Increased Output. *Aviation Week & Space Technology*. 2014, online verfügbar unter: <http://aviationweek.com/farnborough-2014/airbus-and-boeing-plan-increased-output>.

FOUR MOTORS GmbH. 2014. Four Motors - Bioconcept Car. [Online] FOUR MOTORS GmbH, 12 2014. [Zitat vom: 19. 02 2015.] <http://www.fourmotors.com/>.

Freese, B. 2003. *Coal, A Human History*. New York : Penguin, 2003. 0142000981.

Gibson, Ian, Rosen, David W. und Stucker, Brent. 2012. Additive Manufacturing Technologies: Rapid Prototyping to Direct Digital Manufacturing. *Assembly Automation*. Jg. 32, 2012, 2.

Gloeckler, Philipp. 2012. Whyownit. [Online] 2012. [Zitat vom: 12. 09 2014.] <http://whyownit.com/>.

Green Responsibility. 2012. www.green-responsibility.de. [Online] 2012. [Zitat vom: 15. 10 2014.] <http://www.green-responsibility.de/wp-content/uploads/CO2-Umrechnungsfaktoren.pdf>.

Gu, D.D., et al. 2012. Laser additive manufacturing of metallic components: materials, processes and mechanisms. *International Materials Reviews*. 2012, Bd. Volume 57, Issue 3.

Gutenberg, E. 1983. *Grundlagen der Betriebswirtschaftslehre - Band 1: Die Produktion*. Berlin : Springer Verlag, 1983. ISBN 3540056947.

Gutowski, Timothy G., et al. 2013. A Global Assessment of Manufacturing: Economic Development, Energy Use, Carbon Emissions, and the Potential for Energy Efficiency and Materials Recycling. *The Annual Review of Environment and Resources*. 2013, Bd. 38, S. 81-106.

Hasenberg, D., et al. 2005. Sichere Erkennung defekt geklebter Bauteile in der Produktion. *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*. 2005, Bd. Volume 49, Issue 7-8.

Hauff, Volker. 1987. *Unsere gemeinsame Zukunft. Der Brundtland-Bericht der Weltkommission für Umwelt und Entwicklung*. Greven : Eggenkamp Verlag, 1987.

Hauschild, M. Z., Jeswiet, J. and Alting, L. 2004. Design for Environment - Do We Get the Focus Right? *CIRP Annals - Manufacturing Technology*. 2004.

Heinrich, B. 2004. Systemanalyse. Wiesbaden : Springer, 2004.

Helms, H. und Lambrecht, U. 2006. The potential contribution of light-weighting to reduce transport energy consumption. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Special Issue 12, 2006, Bd. 1.

Herrmann, C. 2010. *Ganzheitliches Life Cycle Management – Nachhaltigkeit und Lebenszyklusorientierung in Unternehmen*. Berlin / Heidelberg : Springer Verlag, 2010.

Hilgers, D. 2008. Performance Management – Leistungserfassung und Leistungssteuerung in Unternehmen und öffentlichen Verwaltungen. *Dissertation*. Universität Hamburg : GWV Fachverlage GmbH, 2008.

Hofstetter, Patrick und Braunschweig, Arthur. 1994. Bewertungsmethoden in Ökobilanzen – ein Überblick. *GAIA - Ecological Perspectives for Science and Society* . July 1994, Bd. Volume 3, Number 4, S. 227-236.

Huber, J. 1995. Nachhaltige Entwicklung durch Suffizienz, Effizienz und Konsistenz . [Buchverf.] P. Fritz, J. Huber und H.W. Levi. *Nachhaltigkeit in naturwissenschaftlicher und sozialwissenschaftlicher Perspektive : eine Publikation der Karl-Heinz-Beckurts-Stiftung.* Stuttgart : Hirzel, 1995.

Huber, Joseph. 2000. Industrielle Ökologie. Konsistenz, Effizienz und Suffizienz in zyklusanalytischer Betrachtung. [Buchverf.] Udo Ernst. *Global Change.* Baden-Baden : Nomos, 2000.

Hungerbühler, K., Ranke, J. und Mettier, T. 2013. *Chemische Produkte und Prozesse: Grundkonzepte zum Umweltorientierten Design.* Berlin Heidelberg New York : Springer, 2013. 3540648542.

Imboden, Dieter. 2003. *Systemanalyse: Einführung in die mathematische Modellierung natürlicher Systeme.* Berlin-Heidelberg : Springer, 2003.

International Energy Agency. 2013. International Energy Agency.CO2 Emissions from Fuel Combustion, 2013 Edition. [Online] 2013. [Zitat vom: 24. September 2014.] <http://www.iea.org/media/statistics/CO2highlights.pdf>.

Jakobsen, M.M. 1999. The Relation of Eco-Effectiveness and Eco-Efficiency - An Important Goal in Design for Environment. *DFX 1999: Proceedings of the 10th Symposium on Design for Manufacturing.* 1999.

Jevons, W.S. 1905. *The Coal Question: An Inquiry Concerning the Progress of the Nation, and the Probable Exhaustion of our Coal-mines.* New York : Augustus M. Kelley, 1905. 978067800/073.

Job, Stella. 2014. Recycling composites commercially. *REINFORCEDplastics.* Issue 5, 2014, Volume 58.

Kadla, J.F., Kubo, S., Venditti, R.A., Gilbert, R.D., Compere, A.L., Griffith, W. 2002. Lignin-based carbon fibers for composite fiber applications. *Carbon, Volume 40, Issue 15.* 2002, S. 2913-2920.

Kahlert, J. 2004. *Simulation technischer Systeme.* Wiesbaden : Friedr. Vieweg & Sohn Verlag/GWV Fachverlag GmbH, 2004.

- Kellens, K., et al. 2012.** Methodology for Systematic Analysis and Improvement of Manufacturing Unit Process Life Cycle Inventory, Part 1: Methodology Description. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. 2012, Bd. Volume 17, Issue 1, S. 69–78.
- Kellens, Karel, et al. 2010.** *Environmental Assessment of Selective Laser Melting and Selective Laser Sintering*. Wien, Österreich : Austrian Society for Systems Engineering and Automation, 2010.
- Kemminer, Jörg. 1999.** *Lebenszyklusorientiertes Kosten- und Erlösmanagement*. Wiesbaden : Deutscher Universitäts-Verlag, 1999. 978-3-8244-6966-6.
- Kermeli, K., Graus, W.H.J. und Worrell, E. 2014.** Energy efficiency improvement potentials and a low energy demand scenario for the global industrial sector. *Energy Efficiency*. 2014.
- Kleineberg, Markus. 2008.** Präzisionsfertigung komplexer CFK-Profilen am Beispiel Rumpfspant. *Dissertation*. Technische Universität Braunschweig : DLR, Bibliotheks- und Informationswesen, 2008.
- Klöpffer, W. 2009.** *Ökobilanz (LCA): Ein Leitfaden für Ausbildung und Beruf*. Weinheim : Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, 2009.
- Komlajeva, L. und Adamovics, A. 2012.** Evaluation of flax (*linum usitatissimum* L.) quality parameters for bioenergy production. In: *Proceedings of the 11th international scientific conference "Engineering for rural development"*, Seite 490-494. Jelgava, Latvia : Natural Gas, 2012.
- Kulekci, Mustafa Kemal. 2008.** Magnesium and its alloys applications in automotive industry. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 39. Jg., November 2008, Bde. Nr. 9-10, S. 851-865.
- Lässig, R., et al. 2012.** Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen. *Perspektiven für den deutschen Maschinen-und Anlagenbau*. Studie Roland Berger, 2012.
- Lauter, Christian, et al. 2011.** Manufacturing Processes for Automotive Structures in Multi-Material Design Consisting of Sheet Metal and CFRP Prepregs. *16th International Conference on Composite Structures (ICCS16)*. Porto, Portugal : FEUP, 2011.
- Leohold, Jürgen. 2011.** Chancen und Grenzen für einen nachhaltigen FVK-Einsatz im Automobil. *CCeV Automotive Forum*. Ingolstadt : CCeV, 2011.

Lewis, H. und Gertsakis, J. 2001. *Design and Environment: A Global Guide to Designing Greener Goods*. Sheffield : Greenleaf Publishing Limited, 2001. ISBN 1874719438.

Liebers, Nico, et al. 2012. Sensor and Real-Time-Process-Simulation Guided Autoclave Process Control for Composite Production. Brisbane, Australia : ICAS, 2012. Online verfügbar unter http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2012/ABSTRACTS/693.HTM.

Liu, Z. 2013. Life cycle assessment of composites and aluminium use in aircraft systems. *Masterthesis*. Cranfield University : Cranfield University, 2013.

Loew, T., et al. 2003. Ansätze der Umweltkostenrechnung im Vergleich. Vergleichende Beurteilung von Ansätzen der Umweltkostenrechnung auf ihre Eignung für die betriebliche Praxis und ihren Beitrag für eine ökologische Unternehmensführung. *Forschungsbericht 299 15 156*. Berlin : Umweltbundesamt, 2003. ISSN 0722-186X.

Maya, G., et al. 2015. Energy management in production: A novel method to develop key performance indicators for improving energy efficiency. *Applied Energy*. 2015, Volume 149.

McConnell, Vicki P. 2010. Launching the carbon fibre recycling industry. *REINFORCEDplastics*. 2010, Bd. Volume 54, Issue 2.

Mesa Fernández, J. M., et al. 2016. *Methodology for the Selection of Key Performance Indicators for Sustainable Steel Production Through an Intelligent Control System Use*. Schweiz : Springer International Publishing, 2016.

Meyer, L.O., Schulte, Karl und Grove-Nielsen, E. 2009. CFRP-Recycling Following a Pyrolysis Route: Process Optimization and Potentials. *Journal of Composite Materials*. 2009, Bd. Vol. 43, No. 9.

Minakuchi, Shu, et al. 2011. Life cycle monitoring of large-scale CFRP VARTM structure by fiber-optic-based distributed sensing. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. 42. Jg., 2011, Bd. Nr. 6.

Möller, A. 1993. Datenerfassung für das Öko-Controlling: Der Petri-Netz-Ansatz. [Buchverf.] H.-K. (Hrsg.) Arndt. *Umweltinformationssysteme für Unternehmen*. Berlin : Schriftenreihe des Instituts für Ökologische Wirtschaftsforschung Nr. 69/93, 1993.

Morrow, W.R., et al. 2007. Environmental aspects of laser-based and conventional tool and die manufacturing. *Journal of Cleaner Production*. 2007, Bd. Volume 15, Issue 10.

Murphy, T. 2008. The new face of CAFÉ. *Ward's auto world*. 34. Jg., 2008, Nr. 4.

Nagarajan, S., et al. 1992. Control of the Welding Process Using Infrared Sensors. *Transactions on Robotics and Automation*. 1992, Bd. Vol. 8, No. 1.

Nakagawa, Mitsutoshi, Shibata, K. und Kuriya, H. 2009. Characterization of CFRP using recovered carbon fibers from waste CFRP. *The 5th ISFR, Part V, Solvolysis*. 2009.

NASA. 2013. Nasa Goddard Space Flight Center. [Online] März 2013. [Zitat vom: 25. September 2014.] http://imagine.gsfc.nasa.gov/docs/science/known_1/emspectrum.html.

Norris, Gregory A. 2001. Integrating Life Cycle Cost Analysis and LCA. *The International Journal of Life Cycle Assessment*. Issue 2, 2001, Volume 6.

Oster, R. 2013. *Herausforderungen an die ZfP bei Ihrer Anwendung an Faserverbundbauteilen*. München : Deutsche Gesellschaft für Zerstörungsfreie Prüfung, 2013.

Otto, K. N., & Wood, K. L. 200. Product Design - Techniques in Reverse Engineering and New Product Development. New Jersey, New Jersey : Prentice Hall, 200. 0130212717.

Pannkoke, Kord, Oethe, Marcus und Busse, Jürgen. 1998. Efficient prepreg recycling at low temperatures. *Cryogenics*. 1998, Bd. Volume 38, Issue 1.

Patel, M. 2008. Cumulative energy demand (CED) and cumulative CO2 emissions for products of the organic chemical industry. *Energy*. 28. Jg., 2008, Nr. 7.

Peebles, L.H. 1995. Carbon Fibers: Formation, Structure, and Properties. Boca Raton, Florida : CRC Press, 1995. 978-0849324505.

Perterer, M., et al. 2009. *Einsatzmöglichkeiten von kosteneffizienten Zerstörungsfreien Prüfmethode (ZfP) am Beispiel CFK-Fahrradrahmen*. DVM-Workshop Berlin : TU München, 2009.

Pimenta, Soraia und Pinho, Silvestre T. 2011. Recycling carbon fibre reinforced polymers for structural applications: Technology review and market outlook. *Waste Management*. 2011, Bd. Volume 31, Issue 2.

Reinhardt, S. 2014. *Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung*. München : Herbert Utz Verlag, 2014. ISBN 978-3-8316-4317-2.

Ribeiro, M.C.S., et al. 2013. A Case Study on the Eco-Efficiency Performance of a Composite Processing Industry: Evaluation and Quantification of Potential Improvements. *Journal of Research Updates in Polymer Science*. 2 Jg., 2013, Bd. Nr. 1.

Rogall, H. 2008. Ökologische Ökonomie: Eine Einführung. Wiesbaden : Verlags für Sozialwissenschaften, 2008.

Rosa, La, et al. 2013. Life cycle assessment of a novel hybrid glass-hemp/thermoset composite. *Journal of Cleaner Production*. 2013, Bd. Volume 44.

Schaltegger, S., Burritt, R. und Petersen, H. 2003. An Introduction to Corporate Environmental Management. Striving for Sustainability. Sheffield : Greenleaf, 2003.

Schmidt, M. 1997. Stoffstromnetze zwischen produktbezogener und betrieblicher Ökobilanzierung. [Buchverf.] M. Schmidt und A. Häuslein. *Ökobilanzierung mit Computerunterstützung*. Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag, 1997.

Schmidt, M. und Schneider, M. 2010. Kosteneinsparungen durch Ressourceneffizienz in produzierenden Unternehmen. *uwf UmweltWirtschaftsForum* . 2010, Bd. Volume 18, Issue 3-4.

Schrack, D. 2015. Nachhaltigkeitsorientierte Materialflusskostenrechnung. *Dissertation*. Universität Linz : Springer Gabler, 2015. ISBN 978-3-658-11301-8.

Schürmann, H. 2007. Konstruieren mit Faser-Kunststoff-Verbunden, 2., bearbeitete und erweiterte Auflage. Heidelberg : Springer Verlag, 2007.

Schütz, H. und Bringezu, S. 2008. *Ressourcenverbrauch von Deutschland - aktuelle Kennzahlen und Begriffsbestimmungen*. Dessau-Roßlau : Umweltbundesamt, 2008.

Sheikh-Ahmad, J. Y. 2009. Machining of polymer composites. New York : Springer Verlag, 2009.

Sloan, Jeff. 2013. Market Outlook: Surplus in carbon fiber's future? *Compositesworld*. [Online] 1. 3 2013. [Zitat vom: 19. 2 2014.] <http://www.compositesworld.com/articles/market-outlook-surplus-in-carbon-fibers-future>.

Song, Young S., Youn, Jae R., Gutowsky, Timothy G. 2009. Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*. August 2009, Bd. Volume 40, Issue 8, S. 1257–1265.

Ströhlein, Tobias. 2012. Volumetrische Erwärmung von Kohlenstofffaserhalbzeugen. *Dissertation*. Technische Universität Braunschweig : DLR, Bibliotheks- und Informationswesen, 2012.

Suh, Sangwon, et al. 2004. System Boundary Selection in Life-Cycle Inventories Using Hybrid Approaches. *Environmental Science and Technology*. 2004, Bd. No. 3, VOL. 38.

Suzuki, T. und Takahashi, J. 2005. Prediction of Energy Intensity of Carbon Fiber Reinforced Plastics for Mass-Produced Passenger Cars. *Ninth Japan International SAMPE Symposium JISSE-9*. 29. November 2005.

Thiede, Sebastian. 2012. A Systematic Method for Increasing the Energy and Resource Efficiency in Manufacturing Companies. *Interdisciplinary Research in Production Engineering (CIRPE2012)*. Procedia CIRP - 1st CIRP Global Web Conference : Elsevier, 2012.

Thunga, Mahendra, et al. 2014. Bio-renewable precursor fibers from lignin/poly lactide blends for conversion to carbon fibers. *Carbon*. March 2014, Volume 68, S. 159-166.

Torcellini, P., et al. 2004. US LCI database project development guidelines. Colorado : National Renewable Energy Laboratory, 2004.

U.S. Environmental Protection Agency. 2006. Life Cycle Assessment: Principles and Practice. Cincinnati : Environmental Protection Agency, 05 2006.

Umair, S. 2006. Environmental Impacts of Fiber Composite Materials: Study on Life Cycle Assessment of Materials used for Ship Superstructure. *Masterthesis*. Stockholm : Kungliga Tekniska Högskolan (KTH), 2006. SOM-EX 06-40.

Umweltbundesamt. 2015. Probas. [Online] Bundesrepublik Deutschland, 12. 02 2015. [Zitat vom: 16. 02 2015.] <http://www.probas.umweltbundesamt.de/php/index.php>.

United Nations. 1998. *Kyoto Protocol to the United Nations Framework Convention on Climate Change*. Kyoto, Japan : United Nations, 1998.

Van Acker, K., et al. 2009. Lightweight materials for the automotive: environmental impact analysis of the use of composites. *Revue de Métallurgie*. 2009, Bd. Volume 109, Issue 12.

VDMA, (Verband Deutscher Maschinen- und Anlagenbau e.V.). 2006. VDMA 34160 Prognosemodell für die Lebenszykluskosten von Maschinen und Anlagen. Berlin : Beuth Verlag GmbH, 2006.

Vereinte Nationen. 1992. *Article 2 of the United Nations Framework Convention on Climate Change*. New York : Vereinte Nationen, 1992.

Vogel, Peter. 2011. *Systemtheorie ohne Ballast*. Heidelberg : Springer, 2011.

von Weizäcker, E.U. und Seiler-Hausmann, J.-D. 1999. *Ökoeffizienz: Management der Zukunft*. Berlin/Basel/Boston : Springer-Verlag, 1999.

Walther, G. 2010. *Nachhaltige Wertschöpfungsnetzwerke – Überbetriebliche Planung und Steuerung von Stoffströmen entlang des Produktlebenszyklus.* Wiesbaden : Gabler Verlag, 2010.

Wambua, P., Ivens, J., Verpoest, I. 2003. Natural fibres: can they replace glass in fibre reinforced plastics? *Composites Science and Technology.* 21. February 2003, S. 1259-1264.

Warnecke, Moritz, et al. 2013. *Faserstofftabelle Carbonfasern / Fibre-Table Carbon Fibres.* Aachen : Shaker, 2013. 978-3-8440-2375-6.

Wirtschaftslexikon, Gabler. 2014. Stichwort: Key Performance Indicator (KPI). *Gabler Wirtschaftslexikon.* [Online] Springer Gabler Verlag, 2014. [Zitat vom: 6. Dezember 2014.] <http://wirtschaftslexikon.gabler.de/Archiv/326735/key-performance-indicator-kpi-v1.html>.

Witik, R.A., et al. 2011. *Assessing the economic and environmental potential of out of autoclave processing.* Jeju, Korea : Proceedings of 18th ICCM, 2011.

Womack, J., Jones, D. und Roos, D. 1990. *The Machine that changed the World: The Story of Lean Production.* New York : Harper Collins, 1990.

Zein, A. 2012. Transition Towards Energy Efficient Machine Tools. *Dissertation.* Technische Universität Braunschweig : Springer-Verlag, 2012. ISBN 978-3-642-32246-4.

Zhang, Meng und Ogale, Amod A. 2014. Carbon fibers from dry-spinning of acetylated softwood kraft lignin. *Carbon.* April 2014, Volume 69, S. 626-629.

Zhang, X., YAMAUCHI, M. und TAKAHASHI, J. 2011. *Life Cycle Assessment of CFRP in Application of Automobile.* Jeju, Korea : Proceedings of 18th ICCM, 2011.