

Fakultät für Maschinenwesen

Ökobilanzielle Untersuchung von Herstellungsverfahren für CFK-Strukturen zur Identifikation von Optimierungspotentialen

Systematische Methodik zur Abschätzung der Umweltwirkungen von Fertigungsprozessketten

Andrea Hohmann

Vollständiger Abdruck der von der Fakultät für Maschinenwesen der Technischen Universität München zur Erlangung des akademischen Grades eines

Doktor-Ingenieurs

genehmigten Dissertation.

Vorsitzender:

Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk

Prüfer der Dissertation:

1. Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler
2. Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart

Die Dissertation wurde am 12.09.2018 bei der Technischen Universität München eingereicht und durch die Fakultät für Maschinenwesen am 08.05.2019 angenommen.

Technische Universität München
Fakultät für Maschinenwesen
Lehrstuhl für Carbon Composites
Boltzmannstraße 15
D-85748 Garching bei München

Tel.: +49 (0) 89 / 289 – 15092

Fax.: +49 (0) 89 / 289 – 15097

Email: info@lcc.mw.tum.de

Web: www.lcc.mw.tum.de

DANKSAGUNG

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner wissenschaftlichen Tätigkeit beim Fraunhofer IGCV (ehemalig Fraunhofer ICT-FIL) in Kooperation mit dem Lehrstuhl für Carbon Composites der TUM.

Mein besonderer Dank gilt meinem Doktorvater, Prof. Dr.-Ing. Klaus Drechsler, der mir stets Vertrauen entgegenbrachte und die Möglichkeit eröffnete, diese Arbeit durchzuführen sowie das Thema langfristig am Fraunhofer IGCV zu etablieren. Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Gunther Reinhart, Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Betriebswissenschaften der TUM, für die Übernahme des Korreferats bedanken. Die vertrauensvolle und intensive Zusammenarbeit in den letzten Monaten meiner Arbeit waren sehr lehrreich für mich. Vielen Dank für diese Möglichkeit. Prof. Dr.-Ing. Wolfram Volk sei an dieser Stelle für die Übernahme des Vorsitzes in der Prüfungskommission herzlich gedankt. Auch möchte ich mich bei Prof. Dr.-Ing. Natalie Rudolph und Lazarula Chatzigeorgiou für ihr Vertrauen und ihre Beharrlichkeit bedanken. Ihr beide habt immer daran geglaubt, dass ich es schaffen werde. Prof. Dr.-Ing. Iman Taha gebührt ein besonderer Dank! Als meine Bürokollegin und Freundin musstest du alle Höhen und Tiefen miterleben. Nur durch deine vielen Fragen und Diskussionen sowie deine konstruktive Kritik konnte diese Arbeit letztendlich gelingen. Danke!

Den Mitarbeitenden des Fraunhofer IGCV, insbesondere meiner Abteilung „Fabrikplanung und Bewertung“, den studentischen Hilfskräften sowie den Bachelor- und Masterstudenten danke ich für die fachliche und moralische Unterstützung. Mein Dank gilt auch dem Team von MAI Carbon für die Begleitung und Unterstützung der in dieser Arbeit behandelten Fragestellungen. Hervorheben möchte ich die großartige Zusammenarbeit mit dem Fraunhofer IBP Abteilung GaBi. Allen voran ist hier Dr.-Ing. Robert Ilg und Dr.-Ing. Stefan Albrecht zu nennen, die mich in die Welt der Ökobilanzen eingeführt haben. Nur durch die vielen Diskussionen mit euch, konnte ich mir das für diese Arbeit notwendige Know-how aneignen. Ich hoffe, dass wir uns auch künftig noch in vielen Projekte austauschen und zusammenarbeiten werden.

Weiterhin möchte ich mich bei meinem Großonkel Prof. Günther Siegel für die großartige Unterstützung bedanken. Ohne dein Engagement wäre meine Ausbildung wohl etwas anders verlaufen. Besonderer Dank gilt meinen Eltern, die mir durch ihre kontinuierliche Unterstützung und vorausschauende Förderung diesen beruflichen Werdegang, auch mit einigem persönlichen Verzicht, ermöglicht haben! Es ist großartig, dass ihr euch so intensiv an meinem Leben beteiligt und mir mit Rat und Tat zur Seite steht. Meine letzten Worte gelten Dr.-Ing. Swen Zaremba. Er hat es geschafft, dass ausgleichende Element in meinem Leben zu werden und mich in jeglicher Lebenslage zu unterstützen. Vielen herzlichen Dank, ohne dich hätte ich so einiges nicht geschafft.

Unterföhring, im Jahr 2019

Andrea Hohmann

KURZFASSUNG

Carbonfaserverstärkte Kunststoffe können je nach Bauteilbelastung und Verarbeitungsverfahren zu hohen Gewichtseinsparungen führen. Eine ganzheitliche Reduktion der Umweltbelastungen im Vergleich zu anderen Materialklassen ist aber nur unter bestimmten Randbedingungen möglich. Insbesondere in der Automobilindustrie ist das Leichtbau bedingte Einsparpotential umweltschädlicher Emissionen in der Nutzungsphase begrenzt, so dass die Herstellungsphase des Produktes an Bedeutung gewinnt.

Eine große Herausforderung bei der Identifikation von ökologischen Optimierungspotentialen, stellt die Vielfalt der Fertigungsprozesse sowie eine fehlende Datenbasis dar. Ziel dieser Arbeit ist eine umfassende ökologische Betrachtung von unterschiedlichen Fertigungsprozessketten für CFK-Strukturen in der Automobilindustrie. Die Arbeit soll ein grundlegendes Verständnis von den ökologischen Einflussgrößen generieren. Hierfür bedarf es ein Ökobilanz-Modell sowie einer Methodik, die eine systematische Abschätzung der Effekte einzelner Parameter und deren Interaktionen erlaubt.

In dieser Arbeit wurde das Modell in Form eines Baukastensystems aufgebaut. Die enthaltenen Prozess-Bausteine wurden parametrisiert, so dass die Produktionsrandbedingungen flexibel angepasst werden können. Insgesamt können über 50 Produktionsparameter entlang der Fertigungsprozessketten variiert werden. Die Haupteinflussgrößen sowie mögliche Interaktionen der Produktionsparameter wurden mithilfe von statistischen Methoden bestimmt. Eine Priorisierung der Umweltwirkungsindikatoren erfolgte anhand der Methode zur Rangbildung vom Umweltbundesamt.

Innerhalb des definierten Prozessfensters weisen für alle untersuchten Fertigungsprozessketten das Eutrophierungs- und Treibhauspotential die höchste ökologische Priorität auf. In der Carbonfaserherstellung haben die Energiequelle und -zusammensetzung sowie das Produktionsgebiet einen Einfluss auf das Treibhauspotential. Für das Eutrophierungspotential sind die Materialausbeute und die freigesetzten Emissionen in der Faserherstellung relevant. Die Detailuntersuchungen der Fertigungsprozessparameter waren überlagert von den Umweltwirkungen der Faserherstellung und dem Materialbedarf in der Bauteilherstellung. Es konnten aber keine Interaktionen zwischen den einzelnen Prozessparametern in der Bauteilfertigung festgestellt werden. Maßnahmen, die zu einer Reduktion des gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarfs führen, tragen auch zu einer Senkung der Umweltwirkungen bei. Die Umweltwirkungen von verschnittarmen duroplastischen Legetechnologien sind im Vergleich zu der Verarbeitung von textilen Halbzeugen geringfügig höher. Sobald aber eine Verschnittreduktion erzielt und/ oder die Performance des Bauteils erhöht werden kann, ist ein ökologischer Nutzen gegeben. Weiterhin konnte beim Vergleich materialeffizienter duroplastischer und thermoplastischer Legetechnologien festgestellt werden, dass die duroplastische Prozesskette ein geringeres Treibhauspotential aufweist. Der ökologische Vorteil nimmt mit steigender, für beide Prozessketten aber gleicher, Verschnitttrate zu.

ABSTRACT

Carbon fiber-reinforced plastics can lead to high weight savings depending on the component loading conditions and processing methods. However, a holistic reduction of environmental pollution compared to other material classes is only possible under certain conditions. Particularly in the automotive industry, the lightweight design induced potential for saving environmentally harmful emissions in the use phase is limited, such that the production phase of the product gains importance in this case.

A major challenge in the identification of environmental optimization potentials is represented by the variety of manufacturing processes and a missing database. The aim of this work is a comprehensive environmental analysis of different production process chains for CFRP structures in the automotive industry. The work should generate a basic understanding of the environmental key performance indicators. This requires a life cycle assessment model and a methodology that allows a systematic estimation of the effects of individual parameters and their interactions.

In this work, a modular system was chosen for the life cycle assessment. The process steps involved have been parameterized such that the production boundary conditions can be flexibly adjusted. In total, more than 100 production parameters can be varied along the production process chains. The main influencing variables as well as possible interactions of the production parameters were determined using statistical methods. The environmental impact indicators were prioritized using the ranking method of the Federal Environment Agency.

Within the defined process window, the eutrophication and global warming potentials have the highest environmental priority for all production process chains under examination. In carbon fiber production, the energy source and composition, as well as the production site have an impact on the global warming potential. For the eutrophication potential, the material yield and the released emissions during fiber production are relevant. The detailed investigations of the production process parameters were superimposed by the environmental effects of fiber production and the material amount in component manufacturing. However, no interactions between the individual process parameters in the component production could be determined. Measures, which lead to a reduction of the weight-specific process energy demand, also contribute to a reduction of the environmental impacts. The environmental impact of material-efficient thermoset layup technologies is slightly higher compared to the processing of textiles. As soon as a cut-off reduction can be achieved and/ or the performance of the component can be increased, an environmental benefit of the layup technology is given. Furthermore, when comparing material-efficient thermoset and thermoplastic placement technologies, it was found that the thermoset process chain has a lower global warming potential. The ecological advantage increases with increasing, but for both process chains the same, scrape rate.

Inhaltsverzeichnis

Nomenklatur	xiii
Abkürzungsverzeichnis	15
Abbildungsverzeichnis	19
Tabellenverzeichnis	25
1 Einleitung.....	1
1.1 Aktuelle Herausforderungen	2
1.2 Struktur der Arbeit	3
2 Stand der Technik und der verfügbaren Daten.....	5
2.1 Durchführung von Ökobilanzen	6
2.2 Datenbasis Carbonfaserherstellung.....	8
2.3 Datenbasis Faserhalbzeug- und Matrixsystemherstellung.....	17
2.4 Datenbasis CFK-Fertigungstechnologien	19
2.5 Datenbasis Nachbearbeitung.....	24
2.6 CFK-Ökobilanzen status-quo.....	26
2.7 Schlussfolgerung.....	27
3 Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens.....	29
3.1 Relevante Forschungsfragen	29
3.2 Untersuchungsrahmen.....	30
3.3 Beschreibung der Prozessketten für die ökobilanzielle Analyse	31
3.3.1 Fertigungsverfahren für die Herstellung von carbonfaserverstärkten Duroplasten	32
3.3.2 Fertigungsverfahren für die Herstellung von carbonfaserverstärkten Thermoplasten.....	35
4 Ökobilanz-Modell – Aufbau und Datenbasis.....	37
4.1 Modellierung der Bausteine verfügbar in Datenbanken	38
4.1.1 Strukturwerkstoffe	39
4.1.2 Energie.....	39
4.1.3 Fluide	40
4.1.4 Fertigungstechnologien	40

4.2	Modellierung der Bausteine auf Basis von Literaturdaten	41
4.2.1	Strukturwerkstoffe	41
4.2.2	Fertigungstechnologien.....	44
4.3	Modellierung der Bausteine auf Basis von experimentellen Daten	45
4.3.1	Vorgehensweise bei der Datenermittlung.....	45
4.3.2	Fertigungstechnologien.....	47
4.4	Übersicht des Ökobilanz-Modells.....	61
4.5	Zusammenfassung der Modellierung.....	64
5	Methoden zur Auswertung der Umweltwirkungen	65
5.1	Statistische Versuchsplanung.....	65
5.2	Bewertung der Wirkungsindikatoren	70
6	Wirkungsabschätzung relevanter Fertigungsprozesse und Prozessketten	75
6.1	Carbonfaserherstellung.....	76
6.1.1	Screening umweltrelevanter Produktionsparameter in der Carbonfaserherstellung	78
6.1.2	Einfluss der Produktionsparameter auf die resultierenden Umweltwirkungen bei der Carbonfaserherstellung	79
6.1.3	Bestimmung der Produktionsparameter für minimale und maximale Umweltwirkungen.....	85
6.2	SotA duroplastische Fertigungsprozesskette.....	87
6.2.1	Screening umweltrelevanter Produktionsparameter	89
6.2.2	Einfluss der Produktionsparameter auf die resultierenden Umweltwirkungen.....	91
6.2.3	Bestimmung der Produktionsparameter für minimale und maximale Umweltwirkungen.....	98
6.3	Verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette	101
6.3.1	Screening umweltrelevanter Produktionsparameter	102
6.3.2	Einfluss der Produktionsparameter auf die resultierenden Umweltwirkungen.....	104
6.3.3	Bestimmung der Produktionsparameter für minimale und maximale Umweltwirkungen.....	105
6.4	SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette.....	108

6.4.1	Screening umweltrelevanter Produktionsparameter	109
6.4.2	Einfluss der Produktionsparameter auf die resultierenden Umweltwirkungen	112
6.4.3	Bestimmung der Produktionsparameter für minimale und maximale Umweltwirkungen	116
6.5	Verschnittarme thermoplastische Prozesskette	119
6.5.1	Screening umweltrelevanter Produktionsparameter	121
6.5.2	Einfluss der Produktionsparameter auf die resultierenden Umweltwirkungen	122
6.5.3	Bestimmung der Produktionsparameter für minimale und maximale Umweltwirkungen	124
6.6	Erkenntnisse aus den Analysen	126
7	Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Fertigungsprozessketten	129
7.1	Vergleich SotA und verschnittarmer Fertigungsprozessketten	129
7.2	Vergleich duro- und thermoplastischer Fertigungsprozessketten	136
8	Zusammenfassung und Ausblick	139
8.1	Beantwortung der Forschungsfragen	140
8.2	Ausblick	144
	Literaturverzeichnis	147
A	Anhang	157
a	Hintergrunddatensätze	157
b	Experimentelle Daten	160
c	Produktionsparameter	166
d	Statistische Versuchspläne	173
e	Effekte der verschnittarmen Legetechnologien	199
f	Ökologische Priorität	202
g	Vergleich Umweltwirkungen Vorhersagemodell und Ökobilanz- Modell	205
B	Veröffentlichungen	207
C	Betreute studentische Arbeiten	209

Nomenklatur

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
F	N	Schließkraft
p	bar	Prozessdruck
A	m ²	Bauteilfläche
ur	-	Auslastung / Bedeckungsgrad
y	variabel	Indikatorergebnis einer Wirkungskategorie
IE	variabel	Indikatorergebnis
c_i	-	Modellkonstanten
x_i	variabel	Faktoren/ variierbare Parameter
ε	variabel	Abweichung des Modells
KF	-	Korrekturfaktor
m	kg	Masse
N	variabel	Nutzen bzw. Funktionseigenschaften

Abkürzungsverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
ADPe	Elementarer abiotischer Ressourcenverbrauch
ADPf	Fossiler abiotischer Ressourcenverbrauch
AFK	Aramidfaserverstärkter Kunststoff
AFP	Automated Fiber Placement
AIF	Arbeitsgemeinschaft Industrieller Forschungsvereinigungen
AN	Acrylnitril
AP	Versauerungspotential
Äqv.	Äquivalent
ATL	Automated Tape Laying
BeP	Break even Point
BW	Baden-Württemberg
CF	Carbonfaser
CFK	Carbonfaserverstärkter Kunststoff
CML	Centrum voor Milieukunde
cn	Konditionszahl
CNC	Computerized Numerical Control
DE	Deutscher bzw. Deutschland
DF	Anzahl der Freiheitsgrade
DFP	Dry Fiber Placement
DIN	Deutsches Institut für Normung
DoE	Design of Experiments
DRFP	Direct Roving Fiber Placement
ELCD	European reference Life Cycle Database
EN	Europäische Norm
EoL	End of Life
EP	Eutrophierungspotential
EU	Europäische Union

Abkürzung	Beschreibung
EU-28	28 Länder der EU
FAETP	Aquatisches Frischwasser Ökotoxizitätspotential
FCKW	Fluorchlorkohlenwasserstoff
FVK	Faserverstärkter Kunststoff
GaBi	Ganzheitliche Bilanzierung
Gew.-%	Gewichtsprozent
GLARE	Glass Laminate Aluminium Reinforced Epoxy
GLO	Global
GWP	Treibhauspotential
HTTP	Humantoxizitätspotential
IGCV	Fraunhofer-Einrichtung für Gießerei-, Composite- und Verarbeitungstechnik IGCV
IISI	International Iron and Steel Institute
IR	Infrarot
ISO	International Organization for Standardization
Lb	Pfund
JP	Japan
LCI	Life Cycle Inventory
LCM	Liquid Composite Molding
Lkw	Lastkraftwagen
MAETP	Aquatisches Salzwasser Ökotoxizitätspotential
MLR	Mehrfach Lineare Regression
Mmbtu	Millionen british thermal unit
NCF	Non-Crimp Fabrics
Nrr	Nicht regenerative Ressourcen
OFAT	One Factor At a Time
ODP	Ozonabbaupotential (ozone depletion potential)
PAN	Polyacrylnitrilfaser
PA6	Polyamid 6

Abkürzung	Beschreibung
Pkw	Personenkraftwagen
PE	Primärenergie (fossil)
PLS	Partial Least Square
POCP	Photochemisches Oxidantienbildungspotential
PP	Polypropylen
Prepregs	Preimpregnated
ProBas	Prozessorientierte Basisdaten für Umweltmanagementsysteme
PTP	Point to Point
PU	Polyurethan
Q ²	Vorhersagegenauigkeit
R ²	Bestimmtheitsmaß
R11	Trichlorfluormethan
RECIPE	Reduced Energy Consumption in Plastics Engineering
Reg.	Regenerativ
RELAY	Rapid, Efficient, Lay-up
RER	Region Europa
RT	Raumtemperatur
RTM	Resin Transfer Molding
Sb	Stibium (Antimon)
SLI	Single Line Injection
SMC	Sheet Molding Compound
SotA	State of the Art
TETP	Terrestisches Ökotoxizitätspotential
TFP	Tailored Fiber Placement
TP-ATL	Thermoplastisches Tapelegen
TRACI	Tool for the Reduction and Assessment of Chemical and Other Environmental Impacts
UBA	Umweltbundesamt
UD	Uni Direktional

Abkürzung	Beschreibung
u.H.	Unterer Heizwert
UK	United Kingdom
UP	Ungesättigter Polyester
US USA	Vereinigte Staaten von Amerika
UV	Ultraviolett
WCM	Wet Compression Molding
Wzg	Werkzeug
VARI	Vacuum Assisted Resin Infusion
VRA	Voith Roving Applicator

Abbildungsverzeichnis

Abb. 1-1: Struktur der Arbeit	4
Abb. 2-1: Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 [in Anlehnung an 13].....	5
Abb. 2-2: Technisches Vorder- und Hintergrundsystem bei der Datenerhebung für die Sachbilanz von CFK-Materialien [in Anlehnung an 13].....	6
Abb. 2-3: Stoff-, Energieflüsse und Emissionen bei der Carbonfaserherstellung [20].....	9
Abb. 2-4: Strom Mix in Europa (links) und der USA (rechts) im Bezugsjahr 2013 [21,22].....	9
Abb. 2-5: Primärenergiebedarf für die Herstellung von 1 MJ elektrische Energie (links) und 1 MJ thermische Energie (rechts) (vgl. Anhang A-a)	11
Abb. 2-6: Energiebedarf zur Herstellung von Prepreg nach Suzuki [43]	18
Abb. 2-7: Übersicht veröffentlichter Daten für die ökobilanzielle Bewertung von CFK-Fertigungstechnologien nach [43].....	20
Abb. 2-8: Prozessenergiekosten für die Verarbeitung von Kunststoffen nach [60]	23
Abb. 2-9: Korngrößenverteilung von CFK- und AFK-Staub beim Fräsen nach [65,67].....	25
Abb. 2-10: Primärenergiebedarf und Treibhauspotential der Bauteilvarianten Stahl, Hochleistungsstahl und Aluminium, sowie CFK quasiisotrop und unidirektional über den Lebenszyklus [6].....	27
Abb. 3-1: Übersicht der Prozessschritte für die betrachteten duroplastische und thermoplastischen Fertigungsprozessketten.....	31
Abb. 3-2: Online Befestigung bei einem verschnittarmen Legeverfahren [89].....	33
Abb. 3-3: Prozessablauf beim RTM nach [77].....	34
Abb. 3-4: Thermoplastische Tapelegetechnologie am Fraunhofer IGCV.....	36
Abb. 4-1: Übersicht der zu modellierenden Prozessschritte bzw. Bausteine (— Datenbank; - - - Literatur; ··· Experimentell)	38
Abb. 4-2: Energiezusammensetzung Strom Mix Deutschland und Europa im Bezugsjahr 2013 [21,98].....	39
Abb. 4-3: Übersicht der Umweltwirkung unterschiedlicher Energiequellen zur Bereitstellung von 1 MJ Strom in Deutschland, jeweils normiert auf	

die höchste Umweltbelastung einer Wirkungskategorie (vgl. Tab. A-1 im Anhang A-a).....	40
Abb. 4-4: Energieverbrauch IR-Strahler im Vergleich.....	41
Abb. 4-5: Prozentuale Verteilung der jährlichen Carbonfaser Produktionskapazitäten weltweit im Jahr 2016 [23]	42
Abb. 4-6: Vorgehensweise bei der Datenerhebung und -auswertung	46
Abb. 4-7: Vergleich der Daten für den Zuschnitt von textilen Halbzeugen (Literaturwert 1 [40], Literaturwert 2 [56]).....	48
Abb. 4-8: Vergleich der Daten für das Automated-Fiber-Placement	49
Abb. 4-9: Leistungsbedarf und Energieverbrauch hydraulischer Pressen.....	50
Abb. 4-10: Vergleich gewichtsspezifischer Energieverbrauch einer Presse	51
Abb. 4-11: Energieverbrauch der Vakuumpumpe in Abhängigkeit der Prozesszeit – Messwerte links und Vergleich mit Literaturdaten rechts	52
Abb. 4-12: Leistungsbedarf Hochdruckinjektionsanlage	53
Abb. 4-13: Vergleich der Leistung und des gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf von Injektionsanlagen	54
Abb. 4-14: Energiebedarf zum Erwärmen von Werkzeugen (links) sowie die Validierung des Modells (rechts)	55
Abb. 4-15: Leistungsbedarf zum Halten der Werkzeugtemperatur (links) sowie die Validierung des Modells (rechts)	55
Abb. 4-16: Vergleich gewichtsspezifischer Energieverbrauch RTM.....	56
Abb. 4-17: Vergleich der Daten für das Thermoformen	57
Abb. 4-18: Energie- und Leistungsbedarf einer öl-beheizten variothermen Presse	58
Abb. 4-19: Heizenergie und Leistungsbedarf in der isothermen Prozessphase für variotherme Pressen	58
Abb. 4-20: Ablagerate in Abhängigkeit der mittleren Tapelänge (links), gewichtsspezifischer Prozessenergiebedarf (rechts)	60
Abb. 4-21: Vergleich Ablagerate und gewichtsspezifischer Prozessenergiebedarf mit den verfügbaren Literaturwerten beim thermoplastischen Tapelgen	60
Abb. 4-22: Schematischer Aufbau des übergeordneten Ökobilanz-Modells	61
Abb. 4-23: Detailmodell Carbonfaserherstellung.....	62

Abb. 4-24: Detailmodell Subpreformherstellung für faserverstärkte Duroplaste (links) und Thermoplaste (rechts)	63
Abb. 4-25: Detailansicht Imprägnierung und Aushärtung sowie Konsolidierung und thermoplastisches Umformen	63
Abb. 5-1: Beispiel für ein Verlaufsdiagramm – Einfluss der Faktoren Faserherstellung, Energiequelle und Bauteildicke auf die entsprechende Wirkungskategorie	69
Abb. 5-2: Beispiel für ein Interaktionsdiagramm – Wechselwirkung des Produktionsgebiets mit der Energieart (links) und der Energiequelle (rechts)	69
Abb. 6-1: Anteil der Stoff- und Energieströme sowie der Emissionen für die in Tab. 6-1 gewählten Produktionsparameter, jeweils normiert auf die Gesamtumweltwirkungen einer Wirkungskategorie.....	77
Abb. 6-2: Optimierung Carbonfaserherstellung – Effekte der Produktionsparameter auf die Umweltwirkung	80
Abb. 6-3: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energieart und -quelle beim ADPe	81
Abb. 6-4: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energiequelle sowie Energieart und Energiequelle beim ADPf.....	81
Abb. 6-5: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energieart sowie Materialausbeute und Faserdatensatz beim EP	82
Abb. 6-6: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energiequelle sowie Energieart und Energiequelle beim ODP	83
Abb. 6-7: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energiequelle sowie Materialausbeute und Faserdatensatz beim POCP.....	83
Abb. 6-8: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energiequelle sowie Energieart und Energiequelle beim GWP	84
Abb. 6-9: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energieart sowie Materialausbeute und Faserdatensatz beim AP	84
Abb. 6-10: Erzielte Umweltwirkungen aller Wirkungskategorien für ein minimales, mittleres und maximales Produktionsszenario	86
Abb. 6-11: Anteil der Prozessschritte an den Umweltwirkungen von 1 kg CFK, hergestellt mit der duroplastischen SotA Fertigungsprozesskette jeweils normiert auf die Gesamtumweltwirkungen einer Wirkungskategorie	88

Abb. 6-12: Detailanalyse SotA duroplastischen CFK-Fertigungsprozesskette – Effekte der Produktionsparameter auf die Umweltwirkung.....	92
Abb. 6-13: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Energiequelle in der Produktion, Bauteildicke und Matrixreste im Vergleich beim ADPe	93
Abb. 6-14: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Energiequelle in der Produktion und Bauteilgeometrie beim ADPe	94
Abb. 6-15: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Faserherstellung und Verschnitt sowie Energiequelle in der Produktion und Bauteildicke beim ADPf.....	94
Abb. 6-16: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Energiequelle in der Produktion, der Bauteildicke und der Faserherstellung im Vergleich beim ADPf	95
Abb. 6-17: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Faserherstellung und der Verschnitttrate beim EP	96
Abb. 6-18: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Faserherstellung und Verschnitt sowie Energiequelle in der Produktion und Bauteildicke beim GWP	97
Abb. 6-19: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Faserherstellung und Verschnitt sowie Energiequelle in der Produktion und Bauteildicke beim AP	98
Abb. 6-20: Erzielte Umweltwirkungen aller Wirkungskategorien für ein minimales, mittleres und maximales Produktionsszenario	100
Abb. 6-21: Anteil der Prozessschritte an den Umweltwirkungen von 1 kg CFK, hergestellt mit der verschnittarmen duroplastischen Fertigungsprozesskette jeweils normiert auf die Gesamtumweltwirkungen einer Wirkungskategorie	102
Abb. 6-22: Verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Energiequelle in der Produktion und Aushärtezeit beim GWP	105
Abb. 6-23: Erzielte Umweltwirkungen aller Wirkungskategorien für ein minimales, mittleres und maximales Produktionsszenario	107
Abb. 6-24: Anteil der Prozessschritte an den Umweltwirkungen von 1 kg CFK, hergestellt mit der thermoplastischen SotA Fertigungsprozesskette, jeweils normiert auf die Gesamtumweltwirkungen einer Wirkungskategorie	109

Abb. 6-25: Detailanalyse SotA thermoplastischer CFK-Fertigungsprozesskette – Effekte der Produktionsparameter auf die Umweltwirkung	113
Abb. 6-26: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Produktionsparameter in der Faserherstellung und Materialbedarf in der Produktion beim Eutrophierungspotential (links) und beim POCP (rechts)	114
Abb. 6-27: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Energiequelle in der Produktion, der Faserherstellung und der Verschnittrate im Vergleich beim EP	114
Abb. 6-28: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Produktionsparameter in der Faserherstellung und Materialbedarf bzw. Energiequelle in der Produktion beim GWP.....	115
Abb. 6-29: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss des Presentyps, der Bauteildicke und der Konsolidierungszeit im Vergleich beim GWP	115
Abb. 6-30: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Energiequelle in der Produktion und eingesetzter Presentyp bzw. Bauteildicke beim ADPe.....	116
Abb. 6-31: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Energiequelle in der Produktion, des Presentyps und der Verschnittrate im Vergleich beim ADPe	116
Abb. 6-32: Erzielte Umweltwirkungen aller Wirkungskategorien für eine minimales, mittleres und maximales Produktionsszenario	118
Abb. 6-33: Anteil der Prozessschritte an den Umweltwirkungen von 1 kg CFK, hergestellt mit der thermoplastischen verschnittarmen Fertigungsprozesskette, jeweils normiert auf die Gesamtumweltwirkungen einer Wirkungskategorie.....	120
Abb. 6-34: Verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Energiequelle in der Produktion, des Presentyps bei der Tapeherstellung und die Faserherstellung im Vergleich beim ADPe.....	123
Abb. 6-35: Verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Energiequelle in der Produktion, des IR-Strahler-Materials und der Faserherstellung im Vergleich beim ADPf.....	123
Abb. 6-36: Erzielte Umweltwirkungen aller Wirkungskategorien für ein minimales, mittleres und maximales Produktionsszenario	126
Abb. 7-1: Vergleich duroplastische Fertigungsprozessketten am Beispiel des Eutrophierungspotentials	132

Abb. 7-2: Vergleich duroplastische Fertigungsprozessketten am Beispiel des elementaren abiotischen Ressourcenverbrauchs	132
Abb. 7-3: Vergleich thermoplastische Fertigungsprozessketten am Beispiel des Eutrophierungspotentials	135
Abb. 7-4: Vergleich thermoplastische Fertigungsprozessketten am Beispiel des Treibhauspotentials	135
Abb. 7-5: Vergleich verschnittarme duro- und thermoplastische Fertigungsprozesskette am Beispiel des Eutrophierungspotentials.....	137
Abb. 7-6: Vergleich verschnittarme duro- und thermoplastische Fertigungsprozesskette am Beispiel des elementaren abiotischen Ressourcenverbrauchs	137
Abb. 7-7: Vergleich verschnittarme duro- und thermoplastische Fertigungsprozesskette am Beispiel des Treibhauspotentials	138
Abb. 7-8: Vergleich verschnittarme duro- und thermoplastische Fertigungsprozesskette am Beispiel des Versauerungspotentials	138
Abb. A-1: Detailanalyse verschnittarmer duroplastischer CFK-Fertigungsprozesskette – Effekte der Produktionsparameter auf die Umweltwirkung.....	200
Abb. A-2: Detailanalyse verschnittarmer thermoplastischer CFK-Fertigungsprozesskette – Effekte der Produktionsparameter auf die Umweltwirkung.....	202

Tabellenverzeichnis

Tab. 1-1: Klimaregulierungen weltweit [4] (durchschnittlicher Flottenverbrauch und CO ₂ -Ausstoß).....	1
Tab. 2-1: Prozentuale Verteilung der jährlichen Carbonfaser Produktionskapazitäten	10
Tab. 2-2: Übersicht des in der Literatur dokumentierten Energieverbrauchs für die Herstellung von 1 kg Carbonfaser.....	11
Tab. 2-3: Übersicht freigesetzter Wärme bei der Carbonfaserherstellung nach Griffing [26]	12
Tab. 2-4: Wasserbedarf in Abhängigkeit des Elektrolytgehalts pro kg Carbonfaser bei der Oberflächenaktivierung inkl. Waschprozess nach Griffing [26]	13
Tab. 2-5: Wasserbedarf in Abhängigkeit des Schlichtegehalts pro kg Carbonfaser beim Schlichteauftrag [26,34]	13
Tab. 2-6: Kühlwasserbedarf pro kg Carbonfaser.....	14
Tab. 2-7: Sauerstoffbedarf bei der Stabilisierung [26,37]	14
Tab. 2-8: Übersicht der entstehenden Gase bei der Stabilisierung und Carbonisierung	15
Tab. 2-9: Effizienzfaktoren bei der Nachverbrennung der Stabilisierungs- und Carbonisierungsgase [37].....	15
Tab. 2-10: Reaktionsgleichungen für die Nachverbrennung in der Carbonfaserherstellung	16
Tab. 2-11: Transportwege bei der Carbonfaserherstellung	17
Tab. 2-12: Elektrischer Energiebedarf für die textile Halbzeugherstellung nach Stiller [28]	18
Tab. 2-13: Prozessdaten für die ökobilanzielle Bewertung einer AFP-Autoklav-Prozesskette nach [54] und [55].....	20
Tab. 2-14: Prozessenergiedaten für den Halbzeugzuschnitt, die Infusionsanlage und Aushärteverfahren	21
Tab. 2-15: Prozessenergiedaten für Kurzfaserauftrag, SMC und Nasspressen nach Das [18]	21
Tab. 2-16: Prozessenergiedaten für das Preforming und Injektion nach Bockelmann [58].....	22
Tab. 2-17: Leistungsbedarf hydraulischer Pressen nach [59].....	22

Tab. 2-18: Zusammenfassung der veröffentlichten Prozessenergiedaten für CFK-Fertigungstechnologien	24
Tab. 2-19: Zusammenfassung der Leistungsdaten für die CFK-Nachbearbeitung.....	25
Tab. 3-1: Definition des Untersuchungsrahmens.....	30
Tab. 4-1: Art und Menge der Stoffflüsse sowie der resultierenden Emissionen bei der Carbonfaserherstellung.....	43
Tab. 4-2: Übersicht der vermessenen Werkzeuge	54
Tab. 5-1: Kriterien zur Bewertung der Güte der statistischen Modelle	67
Tab. 5-2: Umweltwirkungskategorien nach UBA [3] und CML [110]	70
Tab. 5-3: Klassifizierung der Wirkungskategorien für die Bewertungskriterien „ökologische Gefährdung“ und „Distance-to-Target“	72
Tab. 5-4: Klassifizierung des spezifischen Beitrags	73
Tab. 6-1: Parametereinstellung in der Carbonfaserherstellung für ein durchschnittliches Produktionsszenario	76
Tab. 6-2: Carbonfaserherstellung – Übersicht der relevanten Effekte.....	78
Tab. 6-3: Prozessfenster der Wirkungskategorien für die Carbonfaserherstellung.....	85
Tab. 6-4: Produktionsparameter für eine Carbonfaserherstellung mit minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen.....	86
Tab. 6-5: SotA duroplastische Prozesskette – Parametereinstellungen für ein mittleres Produktionsszenario	87
Tab. 6-6: Variable Produktionsparameter bei der Screening-Analyse der SotA duroplastischen CFK-Fertigungsprozesskette	89
Tab. 6-7: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Übersicht der relevanten Effekte.....	90
Tab. 6-8: Prozessfenster der Wirkungskategorien für die SotA duroplastische Fertigungsprozesskette	98
Tab. 6-9: Produktionsparameter für die duroplastische SotA Fertigungsprozesskette mit minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen	99
Tab. 6-10: Verschnittarme duroplastische Prozesskette – Parametereinstellungen für ein durchschnittliches Produktionsszenario.....	101
Tab. 6-11: Variable Produktionsparameter bei der Screening-Analyse der verschnittarmen duroplastischen CFK-Fertigungsprozesskette	103

Tab. 6-12: DFP-RTM Prozesskette – Übersicht der relevanten Effekte	103
Tab. 6-13: Prozessfenster der Wirkungskategorien für die verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette.....	105
Tab. 6-14: Produktionsparameter für eine verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette mit minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen.....	106
Tab. 6-15: SotA thermoplastische Prozesskette – Parametereinstellungen für ein durchschnittliches Produktionsszenario	108
Tab. 6-16: Variable Produktionsparameter bei der Screening-Analyse der SotA thermoplastischen CFK-Fertigungsprozesskette.....	110
Tab. 6-17: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Übersicht der relevanten Effekte	111
Tab. 6-18: Prozessfenster der Wirkungskategorien für die SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette.....	117
Tab. 6-19: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Produktionsparameter für minimale, mittlere und maximale Umweltwirkungen.....	118
Tab. 6-20: Verschnittarme thermoplastische Prozesskette – Parametereinstellungen für ein durchschnittliches Produktionsszenario	120
Tab. 6-21: Variable Produktionsparameter bei der Screening-Analyse der verschnittarmen thermoplastischen CFK-Fertigungsprozesskette.....	121
Tab. 6-22: Verschnittarme thermoplast basierte Prozesskette – Übersicht der relevanten Effekte	122
Tab. 6-23: Prozessfenster der Wirkungskategorien für die verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette.....	124
Tab. 6-24: Verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette – Produktionsparameter für minimale, mittlere und maximale Umweltwirkungen.....	125
Tab. 7-1: Parametereinstellungen für den Vergleich duroplastischer SotA und verschnittarmer Fertigungsprozesskette.....	131
Tab. 7-2: Parametereinstellungen für den Vergleich thermoplastischer SotA und verschnittarmer Fertigungsprozesskette.....	133
Tab. 8-1: Übersicht der Spannweite der Wirkungskategorien mit der höchsten ökologischen Priorität pro kg gefertigtes Bauteil	142

Tab. A-1: Verwendete Hintergrunddatensätze [118,119]	157
Tab. A-2: Hilfsprozesse – Anlagendaten	160
Tab. A-3: Hilfsprozesse – Versuchsmatrix	160
Tab. A-4: Dry-Fiber-Placement – Anlagendaten	161
Tab. A-5: Dry-Fiber-Placement – Versuchsmatrix	161
Tab. A-6: IR-Strahler – Anlagendaten	162
Tab. A-7: IR-Strahler – Versuchsmatrix	162
Tab. A-8: Hydraulische Pressen – Anlagendaten	162
Tab. A-9: Hydraulische Pressen – Versuchsmatrix	163
Tab. A-10: Eigenbeheizte Werkzeuge – Werkzeug- und Anlagendaten	163
Tab. A-11: Eigenbeheizte Werkzeuge – Versuchsmatrix	163
Tab. A-12: Heißpresse - Anlagendaten	164
Tab. A-13: Heißpresse - Versuchsmatrix	164
Tab. A-14: Thermoplastisches Legen - Anlagendaten	165
Tab. A-15: Thermoplastisches Legen – Versuchsmatrix	165
Tab. A-16: Variierbare Parameter im Ökobilanz-Modell	166
Tab. A-17: Produktionsparameter für die SotA duroplastische Fertigungsprozesskette	171
Tab. A-18: Produktionsparameter für die verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette	171
Tab. A-19: Produktionsparameter für die SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette	172
Tab. A-20: Produktionsparameter für die verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette	172
Tab. A-21: Screening Carbonfaserherstellung linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV	173
Tab. A-22: Screening Carbonfaserherstellung Modellgüte – linearer teilmfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV	173
Tab. A-23: Optimierung Carbonfaserherstellung – quadratischer D-optimaler Versuchsplan	174
Tab. A-24: Optimierung Carbonfaserherstellung Modellgüte quadratischer D- optimaler Versuchsplan	175

Tab. A-25: Screening SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV	176
Tab. A-26: Screening SotA Fertigungsprozesskette für duroplast basierte CFK – Modellgüte linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV	177
Tab. A-27: Szenario-Analyse SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – quadratischer D-optimaler Versuchsplan.....	178
Tab. A-28: Optimierung SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Modellgüte quadratischer D-optimaler Versuchsplan	180
Tab. A-29: Screening verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette – linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV	181
Tab. A-30: Screening verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette – Modellgüte linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV	183
Tab. A-31: Optimierung verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette – quadratisch D-optimaler Versuchsplan	184
Tab. A-32: Optimierung verschnittarme duroplast-basierte CFK- Fertigungsprozesskette - Modellgüte quadratisch D-optimaler Versuchsplan	186
Tab. A-33: Screening SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – linearer teilfaktorieller Versuchsplanung Auflösung IV	186
Tab. A-34: Screening SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Modellgüte linearer teilfaktorieller Versuchsplanung Auflösung IV	188
Tab. A-35: Detailanalyse SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – quadratischer D-optimaler Versuchsplan.....	189
Tab. A-36: Detailanalyse SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Modellgüte quadratischer D-optimaler Versuchsplan	192
Tab. A-37: Screening verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette – linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV	192
Tab. A-38: Screening-Analyse verschnittarme thermoplastischer Fertigungsprozesskette – Modellgüte linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV	193
Tab. A-39: Detailanalyse verschnittarmer thermoplastischer Fertigungsprozesskette Strukturen – quadratischer D-optimaler Versuchsplan	194
Tab. A-40: Detailanalyse verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette – Modellgüte quadratischer D-optimaler Versuchsplan	198

Tab. A-41: Festlegung der ökologischen Priorität nach dem UBA [3]	202
Tab. A-42: Ökologische Priorität der Wirkungskategorien bei der Carbonfaserherstellung.....	203
Tab. A-43: Ökologische Priorität der Wirkungskategorien – SotA duroplastische Fertigungsprozesskette	203
Tab. A-44: Ökologische Priorität der Wirkungskategorien – Verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette	204
Tab. A-45: Ökologische Priorität der Wirkungskategorien – SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette	204
Tab. A-46: Ökologische Priorität der Wirkungskategorien – Verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette	204
Tab. A- 47: Carbonfaserherstellung – Vergleich Vorhersage- (MODDE®) und Ökobilanz-Modell (GaBi)	205
Tab. A- 48: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Vergleich Vorhersage- (MODDE®) und Ökobilanz-Modell (GaBi)	205
Tab. A- 49: Verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette – Vergleich Vorhersage- (MODDE®) und Ökobilanz-Modell (GaBi)	205
Tab. A-50: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Vergleich Vorhersage- (MODDE®) und Ökobilanz-Modell (GaBi)	206
Tab. A-51: Verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette – Vergleich Vorhersage- (MODDE®) und Ökobilanz-Modell (GaBi)	206

1 Einleitung

Leichtbaumaterialien und insbesondere carbonfaserverstärkte Kunststoffe (CFK) werden aufgrund der sehr guten gewichtsspezifischen Performance, welche beispielsweise zu einer Erhöhung der Fahragilität aber auch durch die höhere Energieaufnahme zu einer Verbesserung der Fahrzeugsicherheit führt, verwendet. Weitere Gründe für den Einsatz von carbonfaserverstärkten Kunststoffen sind die elektrische Leitfähigkeit, das sportliche Design oder auch der geringe Temperaturexpansionskoeffizient. Ein wichtiger Aspekt in der Luftfahrt- und Automobilindustrie, sowie im Maschinenbau ist die, mit dem Leichtbau einhergehende, Reduktion des Treibstoff- und Energiebedarfs in der Nutzungsphase, wodurch nicht nur Betriebskosten, sondern auch schädliche Umweltwirkungen gesenkt werden können [1].

Dieser Sachverhalt ist insbesondere vor dem Hintergrund begrenzter Rohstoffressourcen und der globalen Klimaerwärmung relevant. Nach Edenhofer et al. [2] ist das Transport- und Verkehrswesen für circa 14% der klimaschädlichen Emissionen verantwortlich. Neben den Treibhausgasen gefährden auch weitere Emissionen, wie beispielsweise Feinstäube und Stickoxide, die drei ökologischen Schutzgüter – Struktur und Funktion von Ökosystemen, die menschliche Gesundheit, sowie die natürlichen Ressourcen [3] – und sind daher in vielen Ländern durch Abgasnormen begrenzt. Eine Übersicht der gesetzlichen Rahmenbedingungen für Treibhausgasemissionen von Fahrzeugen für drei ausgewählte wirtschaftliche Großräume ist in Tab. 1-1 gegeben. Alle weiteren Abgasbegrenzungen für die Nutzungsphase sind den entsprechenden länderspezifischen Verordnungen zu entnehmen.

Tab. 1-1: Klimaregulierungen weltweit [4] (durchschnittlicher Flottenverbrauch und CO₂-Ausstoß)

	Europa	China	USA
Ab 2020	4,1 l/100km; 95 g CO ₂ /km	5 l/100km	125 g CO ₂ /km
Ab 2025	< 78 g CO ₂ /km	4 l/100km	87 g CO ₂ /km

Der angestrebte durchschnittliche Flottenverbrauch in Tab. 1-1 kann insbesondere im Premiumfahrzeugsegment nur durch den Einsatz von alternativen – elektrischen oder Brennstoffzellen betriebenen – Antrieben erreicht werden [4]. Hierdurch steigen, aufgrund der eingesetzten Materialien, die Umweltwirkungen in der Herstellungsphase [5]. Ähnliche Effekte sind auch beim Einsatz von Leichtbauwerkstoffen, wie Aluminium oder Faserverbundkunststoffe zu erkennen [6,7]. Die Gewichtsreduktion und die damit einhergehende Treibstoff- bzw. Energieeinsparungen in der Nutzungsphase konnten

dies oftmals kompensieren [6]. Durch die zunehmende Elektrifizierung bzw. Rekuperation, hat die Reduktion der Masse künftig nur noch einen geringfügigen Einfluss auf den Treibstoff- bzw. Energieverbrauch in der Nutzungsphase. Um beispielsweise die Reichweite eines elektrisch angetriebenen Fahrzeugs um 1% zu erhöhen, müssen 50 bis 70 kg Gewicht eingespart werden [8]. Der Einsatz von Leichtbaumaterialien wird jedoch weiterhin eine große Rolle spielen, da die steigenden Sicherheits- und Komfortanforderungen, die Umsetzung des autonomen Fahrens sowie alternativer Antriebskonzepte zu einer deutlichen Steigerung des Fahrzeuggewichts führen. Dies hat negative Auswirkungen auf die Fahragilität und kann indirekt zu steigenden Produktionskosten führen, da weitere Fahrzeugsysteme, wie beispielsweise die Bremsen, an das höhere Fahrzeuggewicht angepasst werden müssen [9].

Zusammenfassend ist somit festzuhalten, dass bei neuen Fahrzeug- und Transportkonzepten eine ganzheitliche Bewertung im Vordergrund stehen sollte. Zum einen muss der Untersuchungsrahmen, um die Herstellungs- und End of Life (EoL) Phase erweitert werden. Zum anderen müssen neben den Treibhausgasen weitere Emissionen betrachtet werden, die die ökologischen Schutzgüter gefährden. Für den Einsatz von Leichtbaumaterialien gewinnt dabei die Herstellungsphase an Bedeutung. Nur durch die Identifikation von Produktionsparametern, die zu einer Reduktion der Umweltwirkungen in der Herstellungsphase beitragen, können beim Verbrennungsmotor und insbesondere beim Einsatz neuer Antriebskonzepte sichergestellt werden, dass Emissionsreduktionen in der Nutzungsphase nicht durch Mehraufwendungen in der Herstellungsphase nivelliert werden.

1.1 Aktuelle Herausforderungen

Für einen effizienten Einsatz von CFK-Materialien stellen sich derzeit drei große Herausforderungen, die im Folgenden kurz diskutiert werden.

1. Ausschöpfung des Leichtbaupotentials
2. Kostengünstige Herstellung von CFK-Strukturen
3. Produktionssysteme mit geringen Umweltwirkungen

CFK bietet zwar ein hervorragendes Leichtbaupotential, um dies aber vollständig ausnutzen zu können, müssen einige Randbedingungen erfüllt sein. Neben einer anisotropen Bauteilbeanspruchung, bedarf es auch Auslegungs- und Fertigungsverfahren, die eine belastungsgerechte Gestaltung der Endlosfaserverstärkung ermöglichen. Eine Gewichtsersparnis von etwa 75% im Vergleich zur herkömmlichen Stahlbauweise ist beispielsweise nur für ein anisotrop belastetes Bauteil mit fasergerechter Auslegung erreichbar [10]. Weiterhin werden bisher, aufgrund der Relevanz von Leichtbaumaterialien, Leichtbaumehrkosten von bis zu 10 € pro eingespartes kg Gewicht akzeptiert [8,10]. CFK erreicht wegen der hohen Material- und Fertigungskosten diese Zielvorgabe

oftmals noch nicht. Intensive Forschungsaktivitäten in den letzten Jahren haben aber gezeigt, dass je nach Bauteilgeometrie und Produktionsszenario, die Produktionskosten bereits um bis zu 80% auf unter 18 €/kg gesenkt werden können [11]. Ein Transfer dieser Erkenntnisse in Serienproduktionen könnte zu einem vermehrten Einsatz von CFK-Materialien führen.

Neben einer größtmöglichen Ausschöpfung des Leichtbaupotentials und einer wirtschaftlichen Fertigung, muss auch ein ökologischer Nutzen des gesamten Lebenszyklus, einschließlich der Rohstoffbereitstellung, der Bauteilherstellung und der Verwertung von Produktionsabfällen sowie EoL-Bauteilen gegeben sein. Bisherige Studien lassen vermuten, dass der Einsatz von CFK-Materialien bei konventionellen Verbrennungsmotoren nur unter bestimmten Randbedingungen zu einer Reduktion der Umweltwirkungen im Lebenszyklus eines Automobils führt. Die Umweltbelastungen in der Herstellungsphase sind dabei um ein vielfaches höher als bei anderen Leichtbaumaterialien. Eine große Herausforderung bei der Identifikation von ökologischen Optimierungspotentialen stellt die Vielfalt der Fertigungsprozesse sowie eine fehlende Datenbasis dar. Es bedarf daher einer Methodik, die eine systematische Abschätzung der Effekte einzelner Parameter und deren Interaktionen erlaubt, so dass diese künftig bei der Bauteilherstellung berücksichtigt werden können.

1.2 Struktur der Arbeit

Im Rahmen dieser Dissertation wird daher aufbauend auf dem Stand der Technik und der verfügbaren Daten, der notwendige Handlungsbedarf für die ökobilanzielle Analyse von CFK-Strukturen identifiziert und die für diese Arbeit relevanten Forschungsfragen formuliert. Dies beinhaltet auch die Spezifikation der zu untersuchenden Fertigungsprozessketten. Anschließend wird auf die Vorgehensweise bei der Modellerstellung, auf die verwendeten Datensätze sowie auf die eingesetzten Methoden zur systematischen Auswertung des Ökobilanz-Modells eingegangen. Darauf aufbauend werden zum einen die ermittelten ökologischen Stellhebel in der Carbonfaserherstellung dargestellt, zum anderen erfolgt eine detaillierte ökobilanzielle Analyse der spezifizierten Fertigungsprozessketten. Basierend auf diesen Ergebnissen, werden die einzelnen Fertigungsverfahren systematisch miteinander verglichen. Hierbei wird auch der, aufgrund der verschiedenen Fertigungsverfahren bzw. Materialkombinationen, unterschiedliche funktionelle Nutzen der gefertigten Bauteilstrukturen berücksichtigt. Zum Schluss werden alle Ergebnisse zusammengefasst, kritisch diskutiert und die relevanten Erkenntnisse dargestellt.

In Abb. 1-1 sind die Inhalte sowie die Struktur der Arbeit übersichtlich dargestellt.

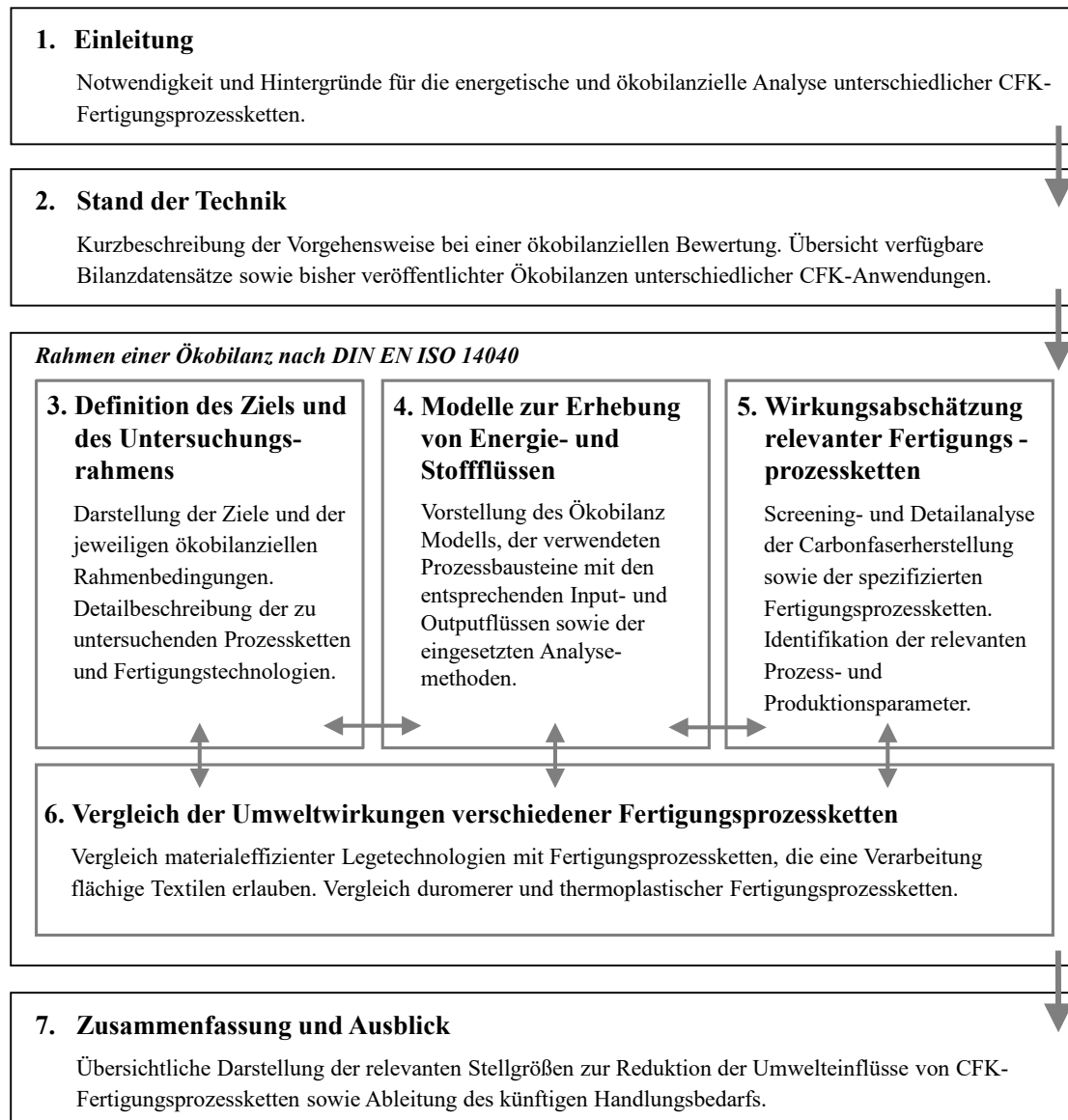


Abb. 1-1: Struktur der Arbeit

2 Stand der Technik und der verfügbaren Daten

Zur Quantifizierung des Ressourceneinsatzes sowie der Umweltwirkungen von Prozessen, Produkten oder Dienstleistungen wird üblicherweise die Methode der Ökobilanz herangezogen. Durch die Standardisierung der Methode nach DIN EN ISO14040 [12] sind der einheitliche Ansatz zur Analyse des Ressourceneinsatzes und der Bewertung der verursachten Umweltwirkungen gewährleistet. Basierend auf dem Lebensweggedanken können mit dieser Methode alle eingesetzten Ressourcen und entstehenden Umweltwirkungen über den gesamten Produktlebenszyklus von der Rohstoffbereitstellung über die Herstellung und Nutzung bis zur Verwertung am Lebensende berücksichtigt werden. Abb. 2-1 zeigt den grundsätzlichen Aufbau einer Ökobilanz nach DIN EN ISO Standard [12].

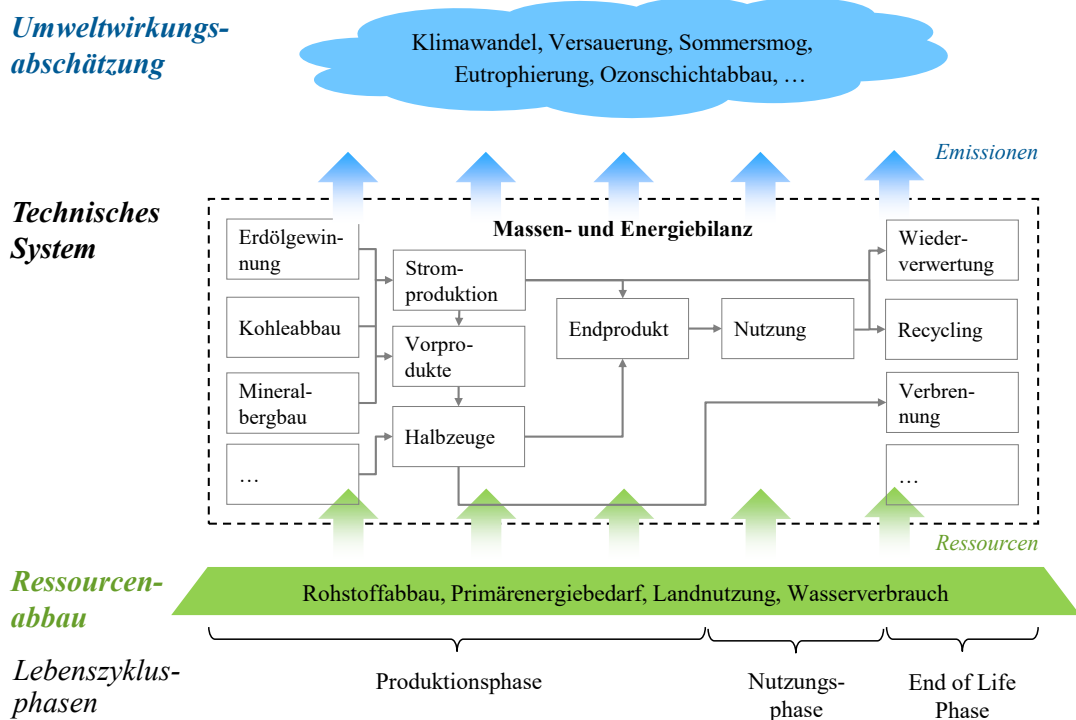


Abb. 2-1: Ökobilanz nach DIN EN ISO 14040 und DIN EN ISO 14044 [in Anlehnung an 13]

Um eine belastbare für die jeweilige Zielapplikation angepasste Ökobilanz durchführen zu können, ist neben der Aktualität auch die Transparenz der erhobenen Daten hinsichtlich der berücksichtigten Prozessschritte und -parameter zwingend notwendig. In den folgenden Abschnitten wird zuerst auf die Bewertungsmethodik eingegangen. Danach erfolgt eine übersichtliche Darstellung der verfügbaren Prozess- und Sachbilanzdaten

für die ökobilanzielle Analyse der CFK-Bauteilfertigung. Abschließend werden exemplarisch Ergebnisse veröffentlichter Studien vorgestellt und diskutiert.

2.1 Durchführung von Ökobilanzen

Eine ökobilanzielle Analyse umfasst vier übergeordnete Phasen [12]:

1. Definition des Ziels und Untersuchungsrahmens,
2. Sachbilanz,
3. Wirkungsabschätzung,
4. Interpretation der Ergebnisse.

In der ersten Phase werden das Ziel der ökobilanziellen Analyse und der Untersuchungsrahmen definiert. Hierbei ist insbesondere eine exakte Beschreibung der funktionellen Einheit und der Systemgrenzen relevant. Die funktionelle Einheit bildet die Bezugsbasis für die Ergebnisse der Analyse und entspricht einem quantifizierbaren Nutzen des Untersuchungsgegenstands. Die Systemgrenzen legen fest, welche Prozessmodule in welcher Detailgenauigkeit zu bilanzieren sind.

Die Sachbilanz umfasst die Datenerhebung und die Berechnung relevanter In-/Outputströme für jedes Prozessmodul innerhalb der Systemgrenzen. Bei der Datenbereitstellung kann zwischen einem technischen Vorder- und Hintergrundsystem [14] unterschieden werden, welches exemplarisch für eine CFK-Fertigungsprozesskette in Abb. 2-2 dargestellt ist. Während Energie- und Stoffflüsse im Vordergrundsystem durch technische Zwischenprodukte, wie beispielsweise den Energie- oder Materialverbrauch, beschrieben werden, verbindet das technische Hintergrundsystem diese Daten mit den entnommenen Ressourcen und der in die Umwelt (Luft, Wasser, Boden) entlassenen Emissionen. Für die Hintergrunddaten kann oftmals auf Datenbanken (ProBas, ELCD, GaBi Databases, ecoinvent database, PlasticsEurope, etc.) zurückgegriffen werden. Für das Vordergrundsystem sind hingegen je nach Untersuchungsgegenstand zusätzlich Literaturrecherchen, Expertenumfragen oder Messreihen erforderlich.

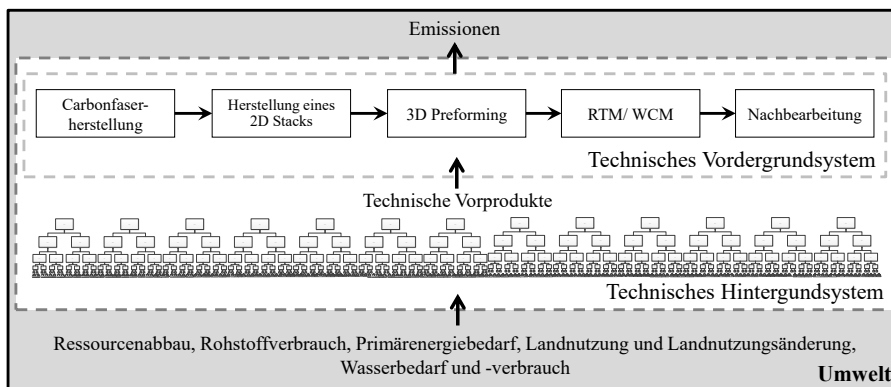


Abb. 2-2: Technisches Vorder- und Hintergrundsystem bei der Datenerhebung für die Sachbilanz von CFK-Materialien [in Anlehnung an 13]

Die Modellierung, d.h. der Aufbau des Stoffstrommodells, kann mit Hilfe einer Ökobilanz-Software, wie beispielsweise UMBERTO oder GaBi ts erfolgen.

Nach Zieldefinition und Sachbilanz ist die Wirkungsabschätzung die dritte Phase einer Ökobilanz. Es werden sowohl, die mit den Emissionen verbundenen Umweltwirkungen (z. B. Klimawandel) abgeschätzt, als auch der Ressourcenverbrauch mittels verschiedener Indikatoren, beispielsweise anhand des Primärenergiebedarfs, beschrieben. Für die Berechnung des Umweltindikators einer Wirkungskategorie, werden die für die entsprechende Wirkungskategorie relevanten Sachbilanzergebnisse mithilfe von Charakterisierungsfaktoren auf eine gemeinsame Einheit umgerechnet. Die Auswahl der in einer Ökobilanz betrachteten Wirkungskategorien orientiert sich am projektspezifischen Erkenntnisinteresse. Üblicherweise können folgende Wirkungskategorien ausgewertet werden, wobei eine detaillierte Beschreibung u. a. den Publikationen des Umweltbundesamtes [3] entnommen werden kann.

- **Verbrauch an energetischen Ressourcen** beschrieben durch den Primärenergiebedarf bzw. den kumulierten Energieaufwand. Primärenergie ist die Energie, die der Umwelt entnommen und einem technischen System zugeführt wird. Es beinhaltet den Verbrauch sowohl von nicht erneuerbaren Ressourcen wie Erdöl und Erdgas also auch von erneuerbarer Energien, wie Wind- und Sonnenenergie.
- **Abiotischer Ressourcenabbau** beschreibt die Reduktion des globalen Bestandes an Rohstoffen (Metalle, Mineralien, Stein, Kies, Erde etc.), wobei nur die in menschlichen Zeiträumen nicht erneuerbaren Stoffe betrachtet werden.
- **Treibhauseffekt** wird üblicherweise in kg CO₂-Äquivalent beschrieben. Beim Treibhauspotential werden alle Sachbilanzergebnisse zusammengefasst, die zur Erwärmung der Erde beitragen. Typische Treibhausgase sind Methan, Lachgas oder Kohlenstoffdioxid.
- **Versauerung** von Böden und Gewässern, die durch die Umwandlung von sauer wirkenden Luftschadstoffen (Stickoxide, Schwefeldioxid) in Säuren beispielsweise durch Wasser erfolgt. Eine Folge der Versauerung ist u. a. das Waldsterben, die Nährstoffauswaschung im Boden, die Schwermetallfreisetzung und die Schädigung von Organismen.
- **Ozonabbau** beschreibt den Abbau der Ozonschicht, durch die von Menschen verursachten Emissionen (FCKWs, Stickoxide). Die Folge ist eine Erwärmung der Erdoberfläche. Weiterhin wird die Durchlässigkeit der UV-A/B-Strahlung erhöht, die zu Hautkrebs und Augenerkrankungen führen kann.
- **Eutrophierung** bzw. Überdüngung ist eine Anreicherung von Nährstoffen an einem bestimmten Standort. Zur Eutrophierung tragen u. a. Luftschadstoffe und die Düngung in der Landwirtschaft bei. Es kann zu einem verstärkten Algenwachstum und einer Verringerung der Artenvielfalt in Gewässern und auf Böden führen.

- **Photooxidantienbildung**, d. h. die Bildung von bodennahem Ozon, dem sogenannten Sommersmog, ist gesundheitsschädigend für Menschen (Reizung der Atemwege) und schädigt Pflanzen und Tiere.
- **Toxizität** fasst alle Sachbilanzergebnisse zusammen, die zu einer toxischen Schädigung von Organismen und Ökosystemen führen. Es wird zwischen Human- und Ökotoxizität unterschieden. Vorhandene Charakterisierungsmodelle unterscheiden sich oftmals, da ein Vergleich bzw. Gewichtung der vielfältigen und sehr unterschiedlichen toxischen Wirkungen unterschiedlichster Substanzen schwierig ist.

Um die Signifikanz der Umweltwirkung einschätzen zu können, können die genannten Wirkungsindikatoren normalisiert, d.h. auf die Wirkungsindikatorergebnisse eines Referenzsystems bezogen werden. Weiterhin können die einzelnen Wirkungskategorien zu einem Umweltindikator zusammengefasst und zueinander gewichtet werden. Verfügbare Charakterisierungsmodelle (CML, TRACI, Lime, ReCiPe, EDIP, etc.) unterscheiden sich u. a. hinsichtlich der Wirkungskategorien bzw. -indikatoren, der Klassifizierung, den Charakterisierungsfaktoren und ob und wie eine Normierung bzw. Gewichtung vorgenommen werden kann [15]. Weiterhin kann zwischen Wirkungs- und Schadensorientierten Charakterisierungsmodellen unterschieden werden, die zu einem unterschiedlichen Zeitpunkt in der Ursachen-Wirkungskette die Sachbilanzergebnisse zusammenfassen.

Im letzten Schritt einer Ökobilanz, der Interpretation der Ergebnisse, werden die (potenziell) verursachten Umweltwirkungen des betrachteten Systems dargestellt und analysiert, wodurch Maßnahmen zur Optimierung eines Produktes abgeleitet werden können. Weiterhin wird die Qualität der Ergebnisse anhand von Vollständigkeits-, Sensitivitäts- und Konsistenzprüfungen beurteilt.

2.2 Datenbasis Carbonfaserherstellung

Bisherige Studien [6,7,11,16-19], die eine ökobilanzielle Bewertung von CFK-Produkten beinhalten, haben gezeigt, dass die Carbonfaserherstellung sowie die hierfür notwendigen Vorprodukte einen signifikanten Anteil (> 70%) an den Umweltwirkungen haben. Die PAN-Faser wird aus Erdöl, einem fossilen Rohstoff, hergestellt und auch die Weiterverarbeitung zu einer Carbonfaser beinhaltet energieintensive Prozessschritte. Die Qualität der Bilanzierung eines CFK-Produkts hängt somit eng mit der Qualität des Carbonfaserdatensatzes zusammen.

Bei der Modellierung der Carbonfaserherstellung müssen die in der Abb. 2-3 dargestellten Stoff- und Energieflüsse sowie Emissionen berücksichtigt werden. Ausgehend von der PAN-Faser erfolgt die Stabilisierung, Carbonisierung, die Oberflächenbehandlung

und der Schlichteauftrag. Eine Erhöhung der Steifigkeit ist durch eine weitere thermische Behandlung der Carbonfaser, die sogenannte Graphitierung, möglich. Zusätzlich sind für die Modellierung der Umweltwirkungen der Produktionsstandort und die damit einhergehenden Transportwege relevant. In den nachfolgenden Unterkapiteln wird auf die verfügbaren Daten für die Bilanzierung der Carbonfaserherstellung näher eingegangen.

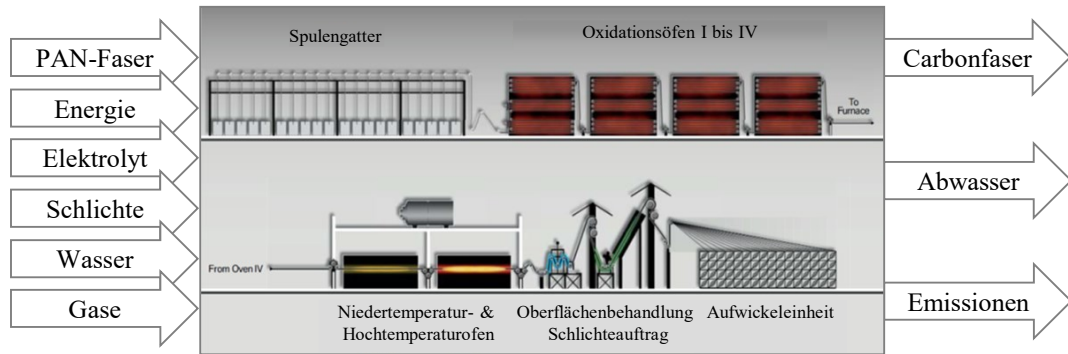


Abb. 2-3: Stoff-, Energieflüsse und Emissionen bei der Carbonfaserherstellung [20]

Produktionsstandort

Der Produktionsstandort hat insbesondere bei der Energiebereitstellung einen relevanten Einfluss auf die Umweltwirkungen. Während beispielsweise in Europa im Jahr 2013¹ Strom bereits über 20% aus erneuerbaren Energien gewonnen wurde [21], betrug dieser Anteil in den USA nur knapp 7% [22] (vgl. Abb. 2-4).

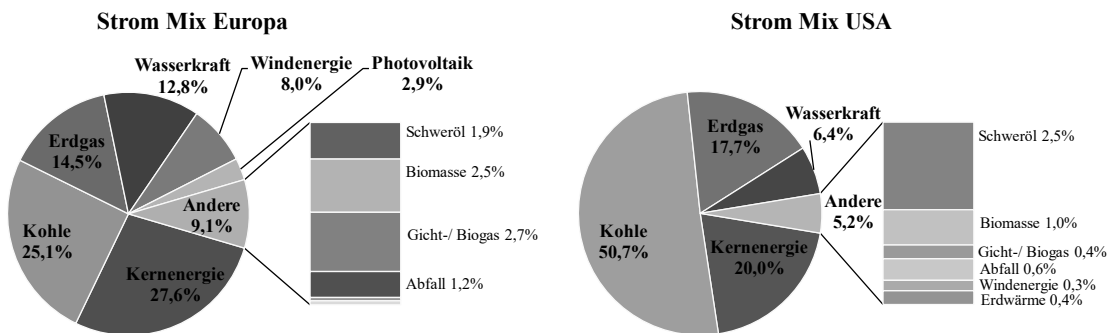


Abb. 2-4: Strom Mix in Europa (links) und der USA (rechts) im Bezugsjahr 2013 [21,22]

Neben den resultierenden Umweltwirkungen bei der Energiebereitstellung, beeinflusst der Produktionsstandort auch die Umweltwirkungen weiterer Prozessstoffe. Je nach Standort kann die Herstellung der Schlichte oder die Bereitstellung von Stickstoff zu

¹ Das Bezugsjahr 2013 wurde für die Darstellung gewählt, da die verfügbaren Datensätze in den Datenbanken einen zeitlichen Versatz aufweisen. In dieser Arbeit wurde die GaBi ts Software Version 8.1.0.29 und die Datenbank Version 8.6 SP33 verwendet, welche sich bei der Strombereitstellung auf das Jahr 2013 bezieht.

unterschiedlichen Umweltbelastungen führen. Auch ist die Nachbehandlung der freigesetzten Emissionen vom Produktionsstandort und den geltenden gesetzlichen Richtlinien abhängig. Weiterhin müssen unterschiedliche Lieferwege für den Transport der PAN-Faser und der Carbonfaser zur weiteren Verarbeitung berücksichtigt werden.

Den Literaturquellen [23,24,25] sind die weltweiten jährlichen Produktionskapazitäten zu entnehmen, deren prozentuale Verteilung auf die Gebiete Nord- und Mittelamerika, Asien und Europa in Tab. 2-1 zusammengefasst sind.

Tab. 2-1: Prozentuale Verteilung der jährlichen Carbonfaser Produktionskapazitäten

Bezugs-jahr	Nord- und Mittelamerika	Asien	Europa	Rest der Welt	Literaturquelle
2016	35%	43%	16%	6%	[23]
2014	31%	43%	19%	7%	[24]
2012	26,2%	44,7%	27,7%	1,4%	[25]
2012	21%	40%	37%	2,1%	[25]

PAN-Faserherstellung

Bei der Modellierung der PAN-Faserherstellung sind zwei Aspekte zu berücksichtigen, die direkten Umweltwirkungen bei der PAN-Faser-Herstellung und die benötigte Menge an PAN-Fasern für die Herstellung von 1 kg Carbonfaser.

Für die Charakterisierung der Umweltwirkungen einer PAN-Faser steht ein Datensatz in der GaBi Datenbank Version 8.6 SP33 zur Verfügung (vgl. Anhang A-a). Der Datensatz umfasst alle Vorketten, die bei der PAN-Faser benötigt werden, und basiert hauptsächlich auf Industriedaten.

Die benötigte PAN-Fasermenge hängt u.a. von der Prozessführung (z.B. Temperatur, Verweildauer) ab [26,27]. Die Massenreduktion resultiert aus der Abspaltung bzw. Freisetzung unterschiedlicher Verbindungen während der Oxidation und insbesondere bei der Carbonisierung. In den Literaturquellen [16,26-30] variiert die Abbaurate der PAN-Faser bei der Oxidation und Carbonisierung zwischen 41 und 55 Gew.-%, wobei nach Stiller [28] viele Studien von einem Massenverlust größer 50% ausgehen.

Energiebedarf

Dem Energieverbrauch bei der Carbonfaserherstellung kommt eine zentrale Bedeutung zu, da dieser den größten Einfluss auf die Umweltwirkungen hat [17]. Neben der Höhe des Energieverbrauchs ist auch die Energiequelle entscheidend. Verschiedene Literaturquellen lassen vermuten, dass je nach Produktionsstandort das Verhältnis und die Gesamtmenge von verbrauchter elektrischer oder thermischer Energie variieren. Thermische Energie weist einen höheren Wirkungsgrad bei der Herstellung auf (vgl. Abb. 2-5) und ist daher, sofern Strom hauptsächlich aus fossilen Energieträgern gewonnen wird, mit niedrigeren Umweltwirkungen verbunden.

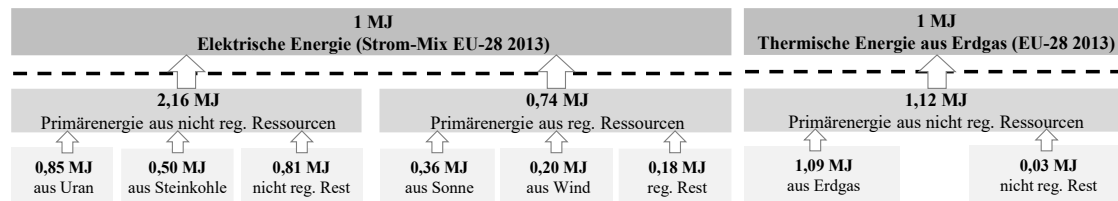


Abb. 2-5: Primärenergiebedarf für die Herstellung von 1 MJ elektrische Energie (links) und 1 MJ thermische Energie (rechts) (vgl. Anhang A-a)

Allerdings gibt es Produktionsstandorte, die elektrische Energie zu 100% aus erneuerbaren Energien gewinnen, so dass hier ein hoher Stromverbrauch zu deutlich geringeren Umweltwirkungen führt als der Einsatz von thermischer Energie.

In Tab. 2-2 ist eine Übersicht des in der Literatur genannten Energiebedarfs für die Herstellung von 1 kg Carbonfaser gegeben. Hierbei muss zwischen Daten unterschieden werden, die den Energieverbrauch für die Carbonfaserherstellung ausgehend von einer PAN-Faser nennen, welche die zusätzlich die Polymerisation der Acrylnitrilfaser (AN-Faser) miteinbeziehen oder Daten, die alle Energieflüsse ab der Erdölgewinnung berücksichtigen.

Tab. 2-2: Übersicht des in der Literatur dokumentierten Energieverbrauchs für die Herstellung von 1 kg Carbonfaser

Prozesskette	Elektrische Energie	Thermische Energie	Dampf	Literaturquelle
PAN --> Carbonfaser	72,22 MJ/kg ²	97,69 MJ Erdgas/kg ^{2,3}	-	[18]
PAN --> Carbonfaser	6,986 MJ/kg	-	3,099 MJ/kg	[26]
PAN --> Carbonfaser	7,56 MJ/kg	-	-	[29]
PAN --> Carbonfaser	32,4 MJ/kg	177,8 MJ Erdgas/kg	-	[30]
PAN --> Carbonfaser	8,26 MJ/kg	-	-	[31]
AN --> Carbonfaser	161,52 MJ/kg	191,47 MJ Erdgas/kg	33,87 kg/kg	[16]
Erdöl --> Carbonfaser	286 MJ/kg	-	[19]	
Erdöl --> Carbonfaser	280 bis 340 MJ/kg	-	[28]	
Erdöl --> Carbonfaser	200 MJ/kg	200 MJ Öl/kg	-	[32]

Im Gegensatz zu den Literaturquellen [16,18,28,30,32], bei denen die Werte von Carbonfaserherstellern bzw. Experten zur Verfügung gestellt worden sind, unterliegen die Daten der anderen Quellen entweder einer theoretischen Berechnung [26,29,31] oder die Herkunft ist nicht bekannt [19]. Die berechneten Werte weisen einen signifikanten Unterschied zu den Angaben der Hersteller bzw. Experten auf. Grund hierfür ist vermutlich die unberücksichtigten Wärmeverluste, die beispielsweise beim Aufheizen der

² Folgende Umrechnungsfaktoren wurden berücksichtigt: 1 lb = 0,4535923 kg;

³ Folgende Umrechnungsfaktoren wurden berücksichtigt: 1 mmbtu = 1055,05585262 MJ

Anlagenperipherie entstehen. Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass der elektrische Energiebedarf zwischen 32,4 und 200 MJ/kg und der thermische Energiebedarf zwischen 97,69 und 200 MJ/kg für die Herstellung einer Carbonfaser schwankt. Neben den voneinander abweichenden Systemgrenzen, sind vermutlich die verschiedenen Produktionsstandorte, Energiearten und Prozessführungen für die unterschiedlichen Datensätze verantwortlich.

Weiterhin nimmt Griffing [26] an, dass während der Carbonfaserproduktion Wärme, die zum Teil wieder als thermische Energie verwendet werden kann, freigesetzt wird. In Tab. 2-3 sind die entsprechenden Energieflüsse, welche bei der Reaktion, der Nachbehandlung der Gase und bei den Trocknungsprozessen nach der Oberflächenaktivierung und dem Schlichteauftrag entstehen, aufgelistet. Insgesamt können circa 11,16 MJ pro kg Carbonfaser an thermischer Energie zurückgewonnen und den Umweltwirkungen gutgeschrieben werden.

Tab. 2-3: Übersicht freigesetzter Wärme bei der Carbonfaserherstellung nach Griffing [26]

Prozessschritt	Freigesetzte Wärme	Wirkungsgrad	Rückgewonnene Thermische Energie
Stabilisierung	5,380 MJ/kg	60%	3,228 MJ/kg
Carbonisierung	9,351 MJ/kg	75%	7,013 MJ/kg
Oberflächenaktivierung	1,098 MJ/kg	25%	0,275 MJ/kg
Schlichteauftrag	1,443 MJ/kg	45%	0,649 MJ/kg

Elektrolyt

Nach der Stabilisierung und Carbonisierung, erfolgt die Oberflächenaktivierung der Carbonfaser, um eine bessere Benetzbarkeit mit der Schlichte und der Matrix zu erreichen [33]. In der Industrie wird üblicherweise eine elektrochemische Oberflächenbehandlung durchgeführt. Als Elektrolyt werden oftmals Ammoniumsalze eingesetzt, aber auch Schwefel-, Phosphor- oder Salpetersäure sind denkbar [33]. Das Elektrolytbad, durch das die Carbonfasern gezogen werden, enthält ca. 2 bis 3% des Carbonfasergewichts an Elektrolyt; der Rest ist Wasser [26]. Durch Anlegen einer Spannung werden auf der Carbonfaseroberfläche sauerstoffhaltige bzw. funktionelle Gruppen erzeugt, welche nach Griffing [26] circa 0,015 Gew.-% der Carbonfaser ausmachen.

Schlichte

Der Schlichteauftrag erfolgt nach der Oberflächenbehandlung, um gezielt die Oberflächeneigenschaften der Faser zu verändern. Dies hat insbesondere einen Einfluss auf die textile Weiterverarbeitung, die Benetzbarkeit mit der Matrix sowie die Faser-Matrix-Anbindung [34]. Für die Beschlichtung wird die Faser durch ein Schlichtebad gezogen, wobei eine definierte Menge an Schlichte und Wasser aufgenommen wird. Das beim anschließenden Trocknungsprozess verdampfende Wasser wird wieder zurückgewonnen und dem Kreislauf zugeführt. Die Schlichte verbleibt auf der Faser.

Je nach Literaturquelle [16,26,35] beträgt der Anteil der Schlichte auf der Carbonfaser zwischen 0,1 bis 7% des Carbonfasergewichts. In der Dissertation von Wetjen [33] wurde u. a. der Einfluss von zwei unterschiedlichen Schlichteanteilen auf die mechanische Performance untersucht. Bei einer Erhöhung der Epoxidschlichte von 1 auf 2 -Gew.-% der Faser konnte eine Reduktion der Querkzugfestigkeit von ca. 8% festgestellt werden.

Wasser

Sowohl für die Oberflächenaktivierung, den darauffolgenden Waschprozess und den Schlichteauftrag wird Wasser benötigt, welches allerdings zum größten Teil mehrfach verwendet bzw. im Kreislauf geführt werden kann. Weiterhin wird nach Griffing [26] für die Nachbehandlung der Emissionen nach der Oxidation und Carbonisierung sowie für die Wärmetauscher Kühlwasser eingesetzt.

In Tab. 2-4 sind die verfügbaren Daten für den Wasserbedarf bei der Oberflächenaktivierung aufgeführt. Hierbei ist zu beachten, dass die Konzentration des Elektrolyts im Wasser ca. 5 bis 7,5% beträgt.

Tab. 2-4: Wasserbedarf in Abhängigkeit des Elektrolytgehalts pro kg Carbonfaser bei der Oberflächenaktivierung inkl. Waschprozess nach Griffing [26]

Stoff	Zufuhr	Abwasser- zusammensetzung	Verbleib auf der Faser
Wasser	0,37 bzw. 0,38 kg für die Lösung 2 kg zum Waschen	2,369 bis 2,379 kg	0,001 kg
Elektrolyt	0,02 bis 0,03 kg	0,01985 bis 0,02985 kg	0,00015 kg

Nach Griffing [26] enthält das Schlichtebad ca. 2% Schlichte bezogen auf den Wasseranteil. Untersuchungen an der Universität Augsburg haben gezeigt, dass ein Schlichtebad mit einem niedrigeren Schlichteanteil (0,6 bis 0,8 Gew.-%) zu einer Verbesserung der textilen Weiterverarbeitung und der Faser-Matrix-Anbindung führt [34]. In Tab. 2-5 sind die entsprechenden Wassermengen für eine Carbonfaser mit einem niedrigen und hohen Schlichtegehalt sowie für die beiden Lösungsverhältnisse dargestellt.

Tab. 2-5: Wasserbedarf in Abhängigkeit des Schlichtegehalts pro kg Carbonfaser beim Schlichteauftrag [26,34]

Mischungs- verhältnis	Verbleib auf der Faser (Schlichtegehalt)	Wasser- und Schlichte- aufnahme	Abwasser
Hoher Schlichtean- teil 2%	0,01 kg Schlichte (1%)	0,5 kg Wasser 0,01 kg Schlichte	0,5 kg Wasser
	0,02 kg Schlichte (2%)	1,0 kg Wasser 0,02 kg Schlichte	1,0 kg Wasser

Mischungsverhältnis	Verbleib auf der Faser (Schlichtegehalt)	Wasser- und Schlichteaufnahme	Abwasser
Niedriger Schlichtean- teil 0,7%	0,01 kg Schlichte (1%)	1,429 kg Wasser 0,01 kg Schlichte	1,429 kg Wasser
	0,02 kg Schlichte (2%)	2,837 kg Wasser 0,02 kg Schlichte	2,837 kg Wasser

In Tab. 2-6 ist der von Griffing [26] angegebene Kühlwasserbedarf aufgeführt. Im Gegensatz zu dieser Literaturquelle wird nach Kupfer et al. [36] bei einem geschlossenen Kühlkreislauf 5% des Volumenstroms als Wasserverluste, aufgrund von Verdampfung und Leckagen, bei der Modellierung berücksichtigt.

Tab. 2-6: Kühlwasserbedarf pro kg Carbonfaser

Prozessschritt	Kühlwasserbedarf nach [26]	Verdampfte Wassermenge nach [26]	Verdampfte Wassermenge nach [36]
Stabilisierung	36,4 kg	0 kg	1,82 kg
Carbonisierung	63,3 kg	0 kg	3,165 kg
Oberflächenaktivierung	7,438 kg	0 kg	0,3719 kg
Schlichteauftrag	9,774 kg	0 kg	0,4887 kg

Luft- und Stickstoffbedarf

Für die Stabilisierung der PAN-Faser wird Sauerstoff benötigt, welcher in Form von Luft in den Oxidationsöfen bereitgestellt wird. In Tab. 2-7 ist der für eine stöchiometrische Umwandlung notwendige Sauerstoff aufgeführt.

Tab. 2-7: Sauerstoffbedarf bei der Stabilisierung [26,37]

Sauerstoffbedarf	Umwandlungsprodukte
9,60% vom PAN-Fasergewicht	Für die Entstehung von Wasserdampf
3,00% vom PAN-Fasergewicht	Für die Entstehung von Kohlendioxid
0,31% vom PAN-Fasergewicht	Für die Entstehung von Kohlenmonoxid
8,00% vom PAN-Fasergewicht	Für die Sauerstoffaufnahme der Faser

In Griffing [26] wird für die Stabilisierung ein doppelt so hoher Sauerstoffbedarf angenommen, wie für eine stöchiometrische Reaktion notwendig. Morgan [37] gibt aufgrund exothermer Reaktionen bei der Stabilisierung einen weitaus höheren Luftvolumenstrom an. Weiterhin wird für die Nachbehandlung der Abgase Sauerstoff bzw. Luft benötigt. Oftmals wird dabei von einer stöchiometrischen Verbrennung ausgegangen. Die Carbonisierung findet hingegen in einer inerten Umgebung statt. Üblicherweise wird hierfür Stickstoff verwendet, wobei nach Griffing [26] 10 kg pro kg Carbonfaser benötigt werden.

Emissionen

Sowohl bei der Stabilisierung als auch bei der Carbonisierung entstehen Emissionen, die bevor diese an die Umwelt abgegeben werden, aufgrund von umwelt- und gesundheitlichen Aspekten, nachverbrannt und gefiltert werden müssen. In der Literatur können nur für die direkten Emissionen Werte gefunden werden. Für die Abgasbehandlung muss daher eine Verbrennungsrechnung erfolgen, um die tatsächlich an die Umgebung freigesetzten Emissionen zu ermitteln.

Die nach Morgan [37] entstehenden Gase bei der Stabilisierung sind der Tab. 2-8 zu entnehmen. Griffing [26] hat für die Carbonisierung eigene Werte berechnet (Datensatz 1) und diese weiteren Literaturquellen (Datensatz 2) gegenübergestellt. Für die Carbonisierung sind in Tab. 2-8 daher zwei unterschiedliche Datensätze aufgeführt.

Tab. 2-8: Übersicht der entstehenden Gase bei der Stabilisierung und Carbonisierung

Entstehende Gase	in der Stabilisierung	in der Carbonisierung (Datensatz 1 Datensatz 2)
Ammoniak	0,105 Gew.-% ⁴	1,317 0,15 Gew.-% ⁵
Blausäure	1,19 Gew.-% ⁴	14,3 8,00 Gew.-% ⁵
Ethan	-	0,44 0,31 Gew.-% ⁵
Ethen	-	0,41 0,08 Gew.-% ⁵
Kohlenstoffdioxid	4,13 Gew.-% ⁴	3,24 2,15 Gew.-% ⁵
Kohlenstoffmonoxid	0,55 Gew.-% ⁴	2,06 1,38 Gew.-% ⁵
Methan	-	2,36 1,66 Gew.-% ⁵
Stickstoff	-	13,8 9,36 Gew.-% ⁵
Wasserdampf	10,80 Gew.-% ⁴	5,29 12,46 Gew.-% ⁵
Wasserstoff	-	0,013 1,23 Gew.-% ⁵

Im Gegensatz zu Khalil [31], der diese Werte für die ökobilanzielle Analyse verwendet hat, muss noch eine Verbrennungsrechnung erfolgen. Die hierfür notwendigen Effizienzfaktoren sind in Tab. 2-9 aufgeführt.

Tab. 2-9: Effizienzfaktoren bei der Nachverbrennung der Stabilisierungs- und Carbonisierungsgase [37]

Effizienzfaktoren	in der Stabilisierung	in der Carbonisierung
Ammoniak	95 bis 99 Gew.-%	95 bis 99 Gew.-%
Blausäure	95 bis 99 Gew.-%	95 bis 99 Gew.-%

⁴ Vom PAN-Fasergewicht

⁵ Vom Gewicht der stabilisierten PAN-Faser, welches nach Morgan [37] 97 Gew.-% des PAN-Fasergewichts entspricht

Effizienzfaktoren	in der Stabilisierung	in der Carbonisierung
Ethan	-	95 bis 99 Gew.-%
Ethen	-	100 Gew.-%
Kohlenstoffmonoxid	95 bis 99 Gew.-%	95 bis 99 Gew.-%
Methan	-	100 Gew.-%
Wasserstoff	-	100 Gew.-%

Für die Verbrennungsrechnung können die in Tab. 2-10 dargestellten idealen Reaktionsgleichungen herangezogen werden. Hierbei muss beachtet werden, dass bei der Verbrennung von Ammoniak und Blausäure, je nach vorhandenem Sauerstoff, Verweilzeit und Verbrennungstemperatur, Stickstoffdioxid (Gleichung (2-1) und (2-4)), Stickstoffmonoxid (Gleichung (2-2) und (2-5)) oder Stickstoff (Gleichung (2-3) und (2-6)) entstehen kann [38].

Tab. 2-10: Reaktionsgleichungen für die Nachverbrennung in der Carbonfaserherstellung

Verbrennung Ammoniak	
$4NH_3 + 7O_2 \rightarrow 4NO_2 + 6H_2O$	(2-1)
$4NH_3 + 5O_2 \rightarrow 4NO + 6H_2O$	(2-2)
$4NH_3 + 3O_2 \rightarrow 2N_2 + 6H_2O$	(2-3)
Verbrennung Blausäure	
$4HCN + 9O_2 \rightarrow 4CO_2 + 4NO_2 + 2H_2O$	(2-4)
$4HCN + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 4NO + 2H_2O$	(2-5)
$4HCN + 5O_2 \rightarrow 4CO_2 + 2N_2 + 2H_2O$	(2-6)
Verbrennung Ethan	
$2C_2H_6 + 7O_2 \rightarrow 4CO_2 + 6H_2O$	(2-7)
Verbrennung Ethen	
$1C_2H_4 + 3O_2 \rightarrow 2CO_2 + 2H_2O$	(2-8)
Verbrennung Methan	
$1CH_4 + 2O_2 \rightarrow 1CO_2 + 2H_2O$	(2-9)
Verbrennung Kohlenmonoxid	
$2CO + 1O_2 \rightarrow 2CO_2$	(2-10)
Verbrennung Wasserstoff	
$1H_2 + O_2 \rightarrow 1H_2O$	(2-11)

Transport

Bei der Carbonfaserherstellung finden üblicherweise alle Prozessschritte – Stabilisierung, Carbonisierung, Oberflächenaktivierung und der Schlichteauftrag – an einem Produktionsstandort statt. Bei der Bilanzierung der Carbonfaserherstellung müssen dementsprechend zwei Transportwege berücksichtigt werden:

1. Transport der PAN-Faser zum Carbonfaser Produktionsstandort
2. Auslieferung der Carbonfaser zur weiteren Verarbeitung entweder zu einem textilen Halbzeug oder zur Direktverarbeitung in ein CFK-Bauteil

Darüber hinaus müssen die Transportwege der benötigten Hilfsstoffe, wie Schlichte, Elektrolyt oder Stickstoff, berücksichtigt werden.

In Tab. 2-11 sind die Transportwege für die in Tab. 2-1 dargestellten Produktionsgebiete zusammengefasst, wobei als Produktionsstandort für die PAN-Faser, aufgrund des verfügbaren europäischen Datensatzes, Portugal gewählt worden ist. Weiterhin wurde für die Berechnung der durchschnittlichen Transportwege als Produktionsstandort für die Carbonfaserherstellung in Nord- und Mittelamerika der Bundesstaat Washington, in Asien Peking und in Europa Ungarn herangezogen.

Tab. 2-11: Transportwege bei der Carbonfaserherstellung

Transport der PAN-Faser zum Produktionsstandort der Carbonfaser			
	Nord- und Mittelamerika	Asien	Europa
Lkw	4.000 km	2.000 km	3.000 km
Schiff	5.700 km	15.740 km	-
Transport der Hilfsstoffe (Stickstoff, Schlichte, Elektrolyt) zum Produktionsstandort			
	Nord- und Mittelamerika	Asien	Europa
Lkw	200 km	200 km	200 km
Transport der Carbonfaser zur Weiterverarbeitung nach Europa			
	Nord- und Mittelamerika	Asien	Europa
Lkw	500 km (USA); 1.000 km (Europa)	2.000 km (Asien); 700 km (Europa)	1.000 km
Schiff	16.100 km	18.691 km	-

2.3 Datenbasis Faserhalbzeug- und Matrixsystemherstellung

Die Verarbeitung von Carbonfasern zu einer CFK-Struktur kann auf unterschiedliche Arten erfolgen. Ausgangsbasis für viele Formgebungsprozesse sind vorimprägnierte Halbzeuge oder textile Halbzeuge, die in einem Folgeprozessschritt mit einer Matrix

getränkt werden. Für die ökobilanzielle Bewertung dieser Halbzeuge sind in der Literatur bereits einige Daten verfügbar, die im Folgenden näher erläutert werden.

Die bei der Herstellung von **Gelegen und Geweben** benötigte elektrische Energie kann Stiller [28] entnommen werden und ist in Tab. 2-12 zusammengefasst. Stiller hat in seiner Arbeit den Ressourcenverbrauch für die Herstellung unterschiedlicher Composite Materialien untersucht. Die Daten für die Halbzeugherstellung wurden in enger Abstimmung mit der Liba Maschinenfabrik GmbH, ein Textilanlagenhersteller, generiert und werden in weiteren Veröffentlichungen [17,39,40] für die Ökobilanzierung von Composite-Materialien verwendet. Bei den angegebenen Werten handelt es sich um Durchschnittswerte, die je nach Webart bzw. Anlagengeschwindigkeit variieren können.

Tab. 2-12: Elektrischer Energiebedarf für die textile Halbzeugherstellung nach Stiller [28]

	Glasfaser	Carbonfaser	Aramidfaser
Gelegeherstellung	0,038 kWh/m ²	0,052 kWh/m ²	0,029 kWh/m ²
Gewebeherstellung	0,11 kWh/m ²	0,214 kWh/m ²	k. A.

In Achternbosch [27], werden u. a. die Umweltwirkungen, die bei der Herstellung einer CFK-Rumpfkomponeute in der Luftfahrtindustrie entstehen, analysiert. Die Energiedaten zur Herstellung der Carbonfasergelege wurden von SAERTEX zur Verfügung gestellt, werden in der Studie aber nicht explizit genannt.

Für die duroplastische und thermoplastische **Matrixherstellung** ist eine Vielzahl an Datensätzen in den Datenbanken verfügbar. Zu nennen sei hier beispielsweise die LCI-Datensätze von PlasticsEurope. Diese werden durch Umfragen bei den Mitgliedern des europäischen Wirtschaftsverbandes, die mehr als 90% der Kunststoffe in EU-Mitgliedsstaaten produzieren, nach ISO-Standards erhoben [41,42].

Die Energieaufwendungen bei der Herstellung von **duroplastischen Prepregs** kann Suzuki [43] entnommen werden.

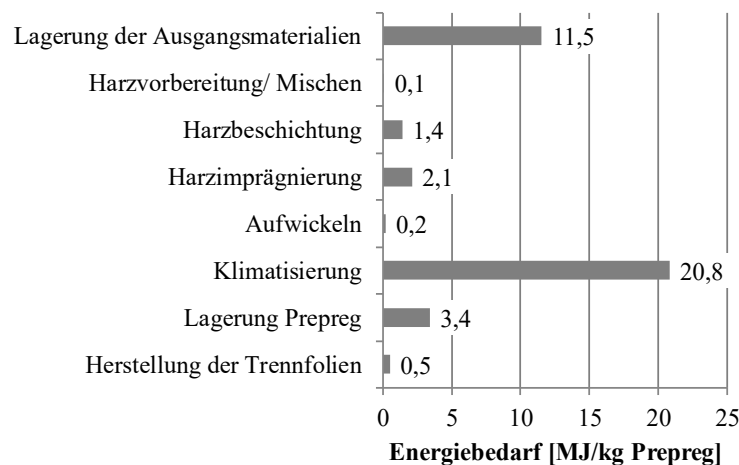


Abb. 2-6: Energiebedarf zur Herstellung von Prepreg nach Suzuki [43]

Unter welchen Randbedingungen die Daten erhoben worden sind, wird nicht angegeben. In Abb. 2-6 ist der Gesamtenergiebedarf von 40 MJ/kg Prepreg für die einzelnen Prozessschritte aufgeschlüsselt. In weiteren Ökobilanzstudien [39,40] wird auf die in Abb. 2-6 dargestellten Werte für die Prepregherstellung verwiesen, zusätzliche LCI-Daten werden nicht genannt. Für das Slitten der Prepregspulen zu Tapes oder Tows bzw. für die direkte Herstellung von TowPregs konnten keine Datensätze in der Literatur gefunden werden.

Endlosfaserverstärkte Thermoplasthalbzeuge sind sowohl Organobleche, die aus Vliesmatten, Gewebe oder Gelege hergestellt werden, also auch Tapes bzw. Tows. In Pervaiz [44] wurden die Umweltwirkungen von Naturfaser- und Glasfaserverstärkten Organoblechen analysiert. Als Matrixfilm wurde Polypropylen (PP) eingesetzt. Die Herstellung der Organobleche erfolgte in einer variothermen 50 t Heißpresse. Hierfür wurden die Matten zuerst getrocknet und danach der Matrixfilm und die Fasermatte abwechselnd aufeinandergestapelt. Für die Ökobilanzierung wird ein Energiebedarf von 11,2 MJ/kg für die Organoblechherstellung genannt. Ob dieser direkt bei den Versuchen gemessen worden ist, ist nicht beschrieben.

In Lindner [45] werden die Umweltwirkungen eines thermoplastischen Legeverfahrens im Detail analysiert. Aufgrund nicht vorhandener LCI-Daten für die Organoblech- und Tapeherstellung, werden Datensätze ähnlicher Verfahren für das Ökobilanz-Modell herangezogen. Für die Organoblechherstellung wurde ein Folienimprägnierverfahren angenommen. Die hierfür benötigte PA6-Folie wurde mithilfe des in der GaBi Datenbank verfügbaren Datensatzes für Extrusionsprofile aus PP modelliert. Der Energiebedarf für die Herstellung von 1 kg Kunststoff beträgt dabei 3,18 MJ (2,76 MJ elektrische und 0,429 MJ thermische Energie) und der Druckluftverbrauch 0,024 m³. Für die Modellierung der Folienimprägnierung wurde ein „Film Stacking“ Datensatz verwendet, wobei die genauen Energie- und Stoffflüsse nicht genannt werden. Für die Herstellung der endlosfaserverstärkten Thermoplast-Tapes wurde der Extrusionsdatensatz adaptiert. Neben PA6-Granulat werden 40 Gew.-% Carbonfasern dem Prozess zugeführt, der Energie- und Druckluftbedarf bleibt unverändert.

2.4 Datenbasis CFK-Fertigungstechnologien

Fokus vieler publizierter Ökobilanzen im Themenfeld Composites ist ein übergeordneter Vergleich von Leichtbaumaterialien oder Fertigungsverfahren. Hierzu gehören die Veröffentlichungen von [6,16,46-51]. In allen Publikationen wird der Einsatz verschiedener Leichtbaumaterialien im Fahrzeugbau bzw. im Energiesektor für unterschiedliche Bezugsgrößen (Pkw bis zu einem Demonstrator-Bauteil) betrachtet und der mögliche ökologische Nutzen dargestellt. Eine detaillierte Beschreibung der eingesetzten Fertigungsverfahren, Prozessparameter sowie Material- und Energieflüsse findet allerdings nicht statt.

In anderen Veröffentlichungen sind hingegen Prozessenergiedaten für unterschiedliche Fertigungstechnologien aufgeführt, der Hintergrund der Datenerhebung wird aber nicht genannt. Es ist somit weder bekannt, ob die Daten gemessen oder anhand der Nennleistung der Anlagen abgeschätzt worden sind. Auch die Prozessparameter (Temperatur, Zeit, Druck) sowie die Anlagengröße, die einen Einfluss auf den prozessspezifischen Energieverbrauch haben, werden nicht aufgeführt. Zu nennen ist hier beispielsweise die Veröffentlichung von Suzuki [43], dessen Angaben in Abb. 2-6 dargestellt sind und die in weiteren Ökobilanzen [39,52,53] verwendet werden.

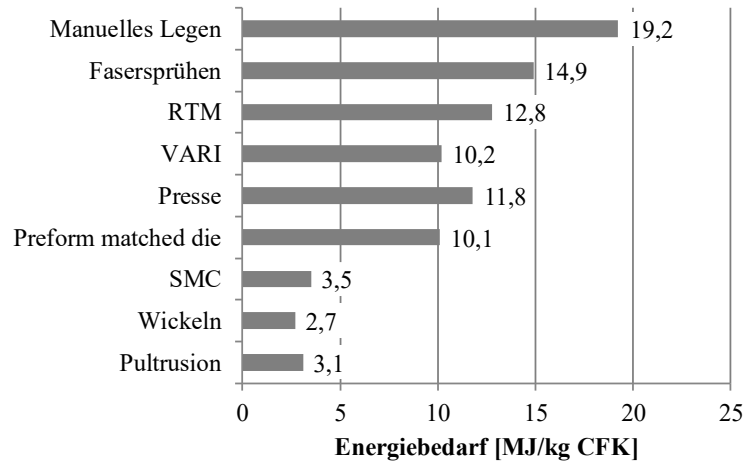


Abb. 2-7: Übersicht veröffentlichter Daten für die ökobilanzielle Bewertung von CFK-Fertigungstechnologien nach [43]

In Scelsi [54] wird ein ökobilanzieller Vergleich von unterschiedlichen Materialien (Stahl, Aluminium, GLARE und CFK) durchgeführt. Für die Bilanzierung des CFK-Bauteils werden eine manuelle und eine automatisierte Prepregablage mittels einer AFP-Anlage berücksichtigt. Die Aushärtung findet im Autoklaven statt. Die Energiedaten werden über die Nenn- bzw. Heizleistung der jeweiligen Anlagen und den gemessenen Fertigungszeiten abgeschätzt. Eine detaillierte Beschreibung der AFP-Anlage (Konfiguration, Aktivierungseinheit) sowie des Temperaturzyklus und der Autoklavgröße bzw. Anlagenbestückung findet nicht statt. In Timmis [55] wird die gleiche Prozesskette für die Fertigung einer Flugzeugrumpfsktion ökobilanziell bewertet. Für das AFP-Verfahren wird eine Portalanlage der Fa. Ingersoll herangezogen, der Temperaturverlauf bei der Aushärtung und die Anlagengröße werden nicht genannt. Eine Übersicht der berechneten Kenndaten auf Basis der Bauteilangaben beider Literaturquellen kann Tab. 2-13 entnommen werden.

Tab. 2-13: Prozessdaten für die ökobilanzielle Bewertung einer AFP-Autoklav-Prozesskette nach [54] und [55]

Berechnetes Bauteilgewicht	ca. 21,5 3.550 kg
Automated Fiber Placement	16 16,2 MJ/kg
Autoklavaushärtung	11,4 97,35 MJ/kg

Nothdurft betrachtet u. a. in seiner Diplomarbeit [56] die Umweltwirkungen einer CFK-Flügelrippen-Fertigung. Witik [40] und Jahn [57] hingegen vergleichen den Energieverbrauch und die Umweltwirkung unterschiedlicher Aushärteverfahren. In allen drei Studien wird der Leistungsbedarf für die Aushärtung von CFK im Autoklaven, Ofen, Thermoformpresse oder der Mikrowelle gemessen. Eine Ausnahme sind die Autoklavdaten aus Witik [40], welche mithilfe der Nennleistung abgeschätzt werden. In Nothdurft [56] und Witik [40] werden darüber hinaus noch die entsprechenden Stoffströme angegeben, so dass ein gewichtsspezifischer Energieverbrauch ermittelt werden kann, welcher in Tab. 2-14 dargestellt ist.

Tab. 2-14: Prozessenergiekosten für den Halbzeugzuschnitt, die Infusionsanlage und Aushärteverfahren

Prozesse	Gewichtsspezifischer elektrischer Energieverbrauch
2D-Zuschnitt	0,47 [40] bis 2,5 MJ/kg Zuschnitt [56]
Infusionsanlage	1,46 MJ/kg Harz [56]
Autoklavaushärtung	126,38 [56] bis 139,8 MJ/kg CFK [40]
Ofen	40 MJ/kg Prepreg [40]; 33 MJ/kg VAP [40]
Mikrowelle	60 MJ/kg Prepreg [40]; 30 MJ/kg VAP [40]

Neben dem Einsatz von Lignin als Precursormaterial, wird in Das [18] auch der Einfluss zweier unterschiedlicher Fertigungsprozessketten auf die Umweltwirkungen einer CFK-Bodenplatte eines Fahrzeugs untersucht. Die Fertigung erfolgt im Nasspressverfahren, wobei als Halbzeug entweder ein SMC-Material oder ein vergleichbares Halbzeug, hergestellt durch einen roboterbasierten Kurzfaserauftrag, verwendet wird. Als Harzsystem wird entsprechend Polyester oder Vinylester eingesetzt. Die bilanzierten Prozessenergiekosten wurden abgeschätzt oder anhand der Nennleistung berechnet. Eine Übersicht ist der Tab. 2-15 zu entnehmen.

Tab. 2-15: Prozessenergiekosten für Kurzfaserauftrag, SMC und Nasspressen nach Das [18]

Eckdaten / Prozessschritte	Energiebedarf
Roboterbasierter Kurzfaserauftrag inkl. Imprägnierung	1,76 MJ/kg
SMC (Produktionsrate ca. 310 kg/h)	3,81 MJ/kg
Nasspressen (3.900 t Presse; 1.500 kW; 2,5 min Prozessdauer)	8,8 MJ/kg

Auch Bockelmann [58] bewertet unterschiedliche Fertigungsverfahren, die sich für die Herstellung von CFK-Strukturen für den Fahrzeugbau eignen. Die veröffentlichten Leistungsdaten fokussieren sich auf das Preforming und die Harz Vorbereitung und basieren

auf den jeweiligen Anlagen-Nennleistungen (vgl. Tab. 2-16). Weiterhin werden die Prozessrandbedingungen für die Herstellung einer CFK-Struktur in der Automobilindustrie genannt.

Tab. 2-16: Prozessenergiekosten für das Preforming und Injektion nach Bockelmann [58]

Prozessschritte	Leistung	Prozessschritte	Leistung
Induktionsofen zur Binderaktivierung	1,4 kW	Dosieranlage WCM	8 kW
Presse fürs Preforming (176 t)	22 kW	Injektionsanlage RTM	12 kW

In einem AIF-Projekt [59] wurde der Energieverbrauch hydraulischer Pressen für das Blechumformen während des Betriebs gemessen. Diese Daten können möglicherweise für das Umformen von 2D-Halbzeugen oder für das Aufbringen der Zuhaltekräfte beim RTM- bzw. WCM-Verfahren herangezogen werden. Eine Zusammenfassung der Ergebnisse kann Tab. 2-17 entnommen werden.

Tab. 2-17: Leistungsbedarf hydraulischer Pressen nach [59]

	Presse 1	Presse 2	Presse 3
Baujahr	< 2001	< 2001	1987
Max. Pressenkraft	650 kN	3.500 kN	38.000 kN
Leistungsbedarf im Betrieb ⁶	2,16 kW	8,01 kW	167,41 kW

Für die Herstellung von Kunststoffbauteilen, wurde im Rahmen eines EU-Projekts – Reduced Energy Consumption in Plastics Engineering (RECIPE) [60] – eine Umfrage durchgeführt, um den Prozessenergiebedarf typischer Verarbeitungsverfahren zu erfassen. Insgesamt haben 165 Firmen teilgenommen, die hauptsächlich in Deutschland, Spanien und der UK fertigen. Für acht Kunststoffprozesse, welche auch zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoffen eingesetzt werden können, wurden die in Abb. 2-8 aufgeführten durchschnittlichen Daten ermittelt. Aufgrund der Datenlage wurde bei vielen Prozessen keine weitere Unterscheidung, beispielsweise hinsichtlich der Kunststoffe und der Durchsatzrate, durchgeführt. Außer beim Spritzgussprozess konnte ein Einfluss der Anlagengröße und des Anlagentyps festgestellt werden. Während kleinere Anlagen (< 150 t) einen höheren gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf aufweisen, führt der Einsatz von elektrischen i.V. zu hydraulischen Spritzgussanlagen zu einer Reduktion des gewichtsspezifischen Energiebedarfs. Dies konnte auch in Thiriez [61] nachgewiesen werden. Über 100 Energieverbrauchsmessungen für unterschiedliche Anlagentypen und Durchsatzmengen haben gezeigt, dass der durchschnittliche Energieverbrauch einer hydraulischen Spritzgussmaschine bei 3,39 MJ/kg, einer Hybriden bei 1,67 MJ/kg und einer Elektrischen bei 1,46 MJ/kg liegt. Werden neben der Spritzgussmaschine noch die

⁶ In der Literaturquelle ist der Leistungsbedarf des Hauptmotors und dessen Anteil an der Gesamtleistung angegeben. Diese beiden Angaben wurden zusammengefasst.

notwendigen Hilfs- und Vorprozesse, wie beispielsweise das Compoundieren berücksichtigt, konnte ein Gesamtprozessenergiebedarf für den Spritzgussprozess von 19 MJ/kg (hydraulisch), 13,2 MJ/kg (hybrid) und 12,6 MJ/kg (elektrisch) ermittelt werden. Darüber hinaus wird im Projekt RECIPE [60] angemerkt, dass die Art der Wärmebringung vor der Umformung einen signifikanten Einfluss auf den Prozessenergiebedarf beim Thermoformen hat. Hierfür ist in der GaBi Datenbank bereits ein Datensatz für das Diaphragma-Verfahren verfügbar (vgl. Anhang A-a Tab. A-1), der den Energiebedarf in Abhängigkeit des Strahler-Typs, der Strahlergröße, der Produktionsrate und des Kunststoffmaterials berechnet.

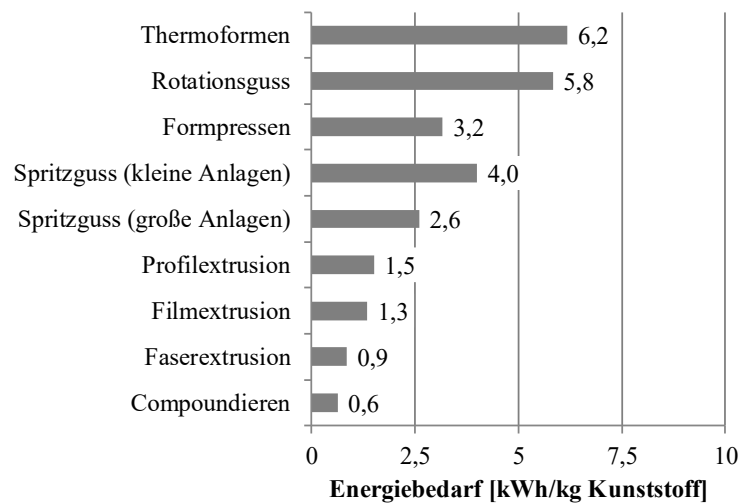


Abb. 2-8: Prozessenergiekosten für die Verarbeitung von Kunststoffen nach [60]

Weiterhin wurde von Lindner [45] ein roboterbasiertes Legeverfahren für faserverstärkte Thermoplast-Tapes untersucht. Die Fixierung der Tapes auf der Substratlage erfolgt über einen Laser. Für die Ablage von 0,5 kg Tape konnte ein Energieverbrauch von ca. 1 kWh gemessen werden. Die Prozesszeit lag bei ca. 1.500 Sekunden. Somit ergeben sich eine Legerate von ca. 1,2 kg/h und ein gewichtsspezifischer Energiebedarf von 7,53 MJ/kg.

In Tab. 2-18 sind die Bandbreiten der in den Veröffentlichungen gefundenen Prozessenergiekosten für die jeweiligen Prozessschritte zusammengefasst. Die aufgezeigten Unterschiede resultieren aus den unterschiedlichen Anlagentypen, -größen und -auslastungsgraden. Weiterhin variieren die Verarbeitungsparameter – Temperatur, Zeit, Druck – aufgrund unterschiedlicher Materialsysteme. Bei einigen Studien wurde darüberhinaus der Materialverschnitt berücksichtigt. Dieser variierte zwischen ca. 10% [27,58], 20% [40] bis über 40% [56] beim 2D-Zuschnitt und betrug nach [58] bis zu 24% beim 3D-Zuschnitt bzw. 30% bei der Nachbearbeitung.

Tab. 2-18: Zusammenfassung der veröffentlichten Prozessenergiekosten für CFK-Fertigungstechnologien

Prozessschritte	Leistungs- bzw. Energiebedarf	Literaturquelle
2D-Halbzeugzuschnitt	0,47 bis 2,5 MJ/kg	[40,56]
Vakuumpumpe	0,25 kW bis 0,5 kW	[40,56,57]
Manuelles Legen	19,2 MJ/kg	[43]
Fasersprühen	1,76 bis 14,9 MJ/kg	[18,43]
Automated-Fiber-Placement	5,6 kg/h; ca. 16 MJ/kg	[54,55]
Dosier- / Injektionsanlagen	8 bis 12 kW; 1,46 MJ/kg Harz	[56,58]
Induktionsofen	1,4 kW	[58]
Mikrowellenofen	30 bis 60 MJ/kg	[40]
Konvektionsofen	33 bis 40 MJ/kg	[40]
RTM	12,8 MJ/kg	[43]
VARI	10,2 MJ/kg	[43]
Presse	2,2 bis 167,4 kW; 8,8 bis 11,8 MJ/kg	[18,43,58,59,60]
Preform matched die	10,1 MJ/kg	[43]
SMC	3,5 bis 3,81 MJ/kg	[18,43]
Wickeln	2,7 MJ/kg	[43]
Pultrusion	3,1 MJ/kg	[43]
Autoklav	11,4 bis 6.000 MJ/kg	[39, 40,43,54,55,56]
Thermoplastische Tapelegen	1,2 kg/h; 7,53 MJ/kg	[45]
Thermoformen	22,24 MJ/kg	[60]
Rotationsguss	21 MJ/kg	[60]
Spritzguss	1,46 bis 11,22 MJ/kg	[60,61]
Profilextrusion	5,4 MJ/kg	[60]
Filmextrusion	4,8 MJ/kg	[60]
Faserextrusion	3,1 MJ/kg	[60]
Compoundieren	2,3 MJ/kg	[60]

2.5 Datenbasis Nachbearbeitung

Es sind bereits eine Vielzahl an LCI-Datensätzen für unterschiedliche Nachbearbeitungsverfahren (Drehen, Schleifen, Entgraten) für Metallbauteile in den Datenbanken verfügbar und in diversen Studien veröffentlicht [14,62,63,64].

Für die Bearbeitung von faserverstärkten Kunststoffen sind hingegen kaum Daten verfügbar. In Das [18] wird das Entgraten und Bohren eines 25,6 kg Bauteils betrachtet. De Vegt [29] stellt Daten für die Nachbearbeitung eines 300 kg Composite-Rotorblatt zur Verfügung. In Bockelmann [58] wird mithilfe der maximalen Schnittgeschwindigkeit und der Anlagen-Nennleistung der Energiebedarf zum Fräsen berechnet. Auch aus dem Abschlussbericht des öffentlich-geförderten Verbundvorhaben FlexiCut [65], sowie einer dazugehörigen Abschlussarbeit [66] können Angaben über Fertigungszeiten, Energie- und Druckluftverbrauch entnommen werden. Die Daten wurden sowohl für das konventionelle CFK-Fräsen, als auch für die im Projekt entwickelte kombinierte (Laser und Fräsen) Umrissbearbeitung erhoben. Bei einer Schnittgeschwindigkeit von maximal 250 m/min wurde für die Umrissbearbeitung des Schikanebauteils (Bearbeitungslänge 5000 mm) zwischen 150 und 250 s benötigt. Der Leistungs- und Druckluftbedarf für den konventionellen Fräsprozess wurde mit ca. 15 kW und 85 m³/h angegeben. Weiterhin wurden bei den Versuchen die Staubmassenkonzentration und die Korngrößenverteilung gemessen. Letzteres ist in Abb. 2-9 dargestellt und mit Daten aus Witten [67] für die Bearbeitung von Aramidfaser verstärkten Kunststoffen ergänzt. Es konnte eine mittlere Staubmassenkonzentration von 669 mg/m³ ermittelt werden.

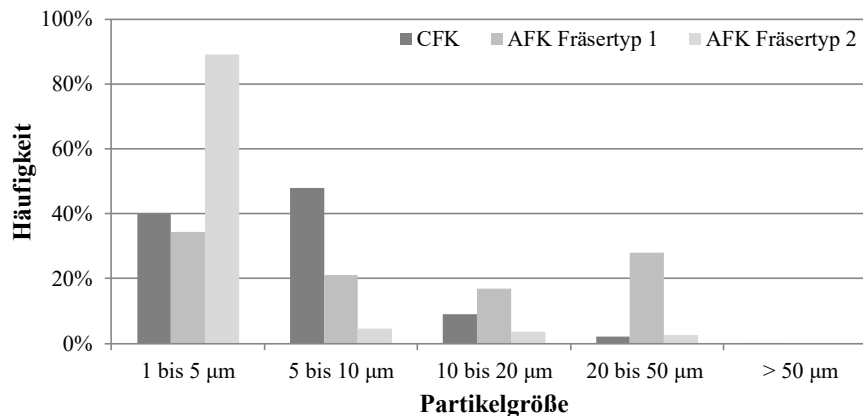


Abb. 2-9: Korngrößenverteilung von CFK- und AFK-Staub beim Fräsen nach [65,67]

Eine Zusammenfassung der in der Literatur gefundenen Leistungsdaten für die CFK-Bearbeitung kann Tab. 2-19 entnommen werden.

Tab. 2-19: Zusammenfassung der Leistungsdaten für die CFK-Nachbearbeitung

Literaturquelle	[18]	[29]	[58]	[65]
Prozesszeiten	2 min	---	800 m/min	1,2 bis 2,0 m/min
Leistungsbedarf	10 kW	---	5,6 kW	15 kW und 85 m ³ /h
Gewichtsspezifischer Energieverbrauch	0,05 MJ/kg	6 MJ/kg	---	---

2.6 CFK-Ökobilanzen status-quo

Der ökologische Impact von Hochleistungsfaserverbundstrukturen wurde in einigen Studien bereits untersucht und das mögliche Reduktionspotential im Vergleich zu alternativen (Leichtbau-)Materialien, wie Stahl oder Aluminium, ermittelt. Hierbei konnte je nach Zielapplikation und getroffenen Annahmen unterschiedliche Ergebnisse erzielt werden. In der Luftfahrtindustrie führt der strukturelle Leichtbau beispielsweise zu einer signifikanten Treibstoffeinsparung in der Nutzungsphase. So kann durch 1 kg Gewichtseinsparung der Kerosinverbrauch jährlich um durchschnittlich 200 l reduziert werden [68]. Trotz des höheren Ressourcenbedarfs bei der Herstellung, ist somit ein ökologischer Nutzen der CFK- im Vergleich zu Stahlbauweise bereits nach 10.000 km Flugstrecke gegeben [68].

Auch im Maschinenbau kann unter bestimmten Voraussetzungen eine positive Bilanz für den Einsatz von Hochleistungsfaserverbundstrukturen ermittelt werden. Der Einsatz von CFK als Werkzeugmaterial sowie die Nutzung der elektrischen Leitfähigkeit der Carbonfasern für die Beheizung der Werkzeuge, hat einige Vorteile in Bezug auf das Werkzeughandling und der Bauteilentformung [69,70]. Auch ist aufgrund der geringeren thermischen Masse, der niedrigeren Wärmeleitfähigkeit und der effizienteren Wärmeeinbringung eine deutliche Reduktion des Energieverbrauchs in der Nutzungsphase der Werkzeuge möglich. In Arikian et al. [69,70] konnte gezeigt werden, dass durch die signifikante Gewichtseinsparung von über 90% im Vergleich zu einem Aluminiumwerkzeug, die Umweltwirkungen bereits in der Herstellungsphase reduziert werden konnten. Zusätzlich wurden weitere 85% der benötigten elektrischen Energie in der Nutzungsphase des Werkzeugs eingespart.

In der Automobilindustrie ist der ökologische Nutzen von Hochleistungsfaserverbundstrukturen hingegen noch umstritten. In Duflou et al. [16] führt die Substitution der Stahl- durch eine CFK-Rohkarosse ab 132.000 km zu einer niedrigeren Umweltbelastung. Bei der ökobilanziellen Analyse in Suzuki et al. [19] wurde bereits nach ca. 92.000 km insgesamt 15% der Primärenergie i.V. zu Stahlbauweise eingespart. In Das [18] hingegen kann auch nach 200.000 km kein Break-even-Point zur Vergleichsbasis Stahl erreicht werden. Somit ist der Primärenergieeinsatz über den gesamten Lebenszyklus, trotz niedrigeren Kraftstoffverbrauchs in der Nutzungsphase, höher. Eine Erklärung für die unterschiedlichen Ergebnisse kann in einer Studie, beauftragt durch die e-mobil BW GmbH [6], gefunden werden. In dieser wurde für ein generisches Stahlbauteil der ökologische Nutzen von unterschiedlichen Leichtbaumaterialien in der Automobilindustrie untersucht. Firmen-, prozess- und produktspezifische Schwankungen der Energie- und Stoffflüsse bei der Faser- und Bauteilherstellung wurden durch ein minimales und maximales Szenario bei der Bauteilfertigung berücksichtigt. In der Nutzungsphase wurden darüber hinaus zwei unterschiedliche Leichtbaupotentiale betrachtet. Für ein

isotrop belastetes Bauteil wird eine Gewichtersparnis von 52% und für ein stark anisotrop belastetes Bauteil von 79% angenommen. In Abb. 2-10 sind die Ergebnisse der Studie dargestellt.

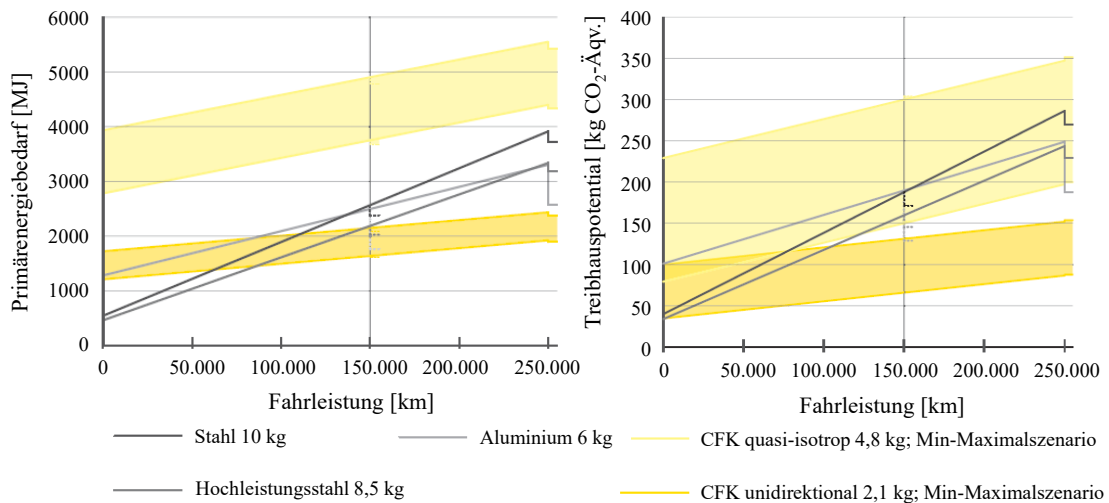


Abb. 2-10: Primärenergiebedarf und Treibhauspotential der Bauteilvarianten Stahl, Hochleistungsstahl und Aluminium, sowie CFK quasiisotrop und unidirektional über den Lebenszyklus [6]

In Abb. 2-10 (links) ist zu erkennen, dass im Vergleich zur Stahlbauweise bei einer unidirektionalen CFK-Bauweise, d.h. mit einem sehr hohen Leichtbaupotential, ab einer Fahrleistung von circa 60.000 km bzw. 120.000 km Primärenergie eingespart werden kann. Bei einem Bauteil mit einer isotropen Belastung wird hingegen über eine Fahrleistung von 250.000 km keine Reduktion des Primärenergiebedarfs im Vergleich zur Stahlbauweise erzielt. Beim Treibhauspotential (vgl. Abb. 2-10 rechts) kann aufgrund der Gewichtsreduktion bereits während der Herstellungsphase ein ökologischer Nutzen durch eine CFK-Bauweise erzielt werden. Ein niedriges Leichtbaupotential und ein hoher Ressourceneinsatz bei der Bauteilherstellung, führen allerdings zu einem Anstieg der Treibhausgase im Vergleich zur Stahlbauweise unter Berücksichtigung des vollständigen Lebenszyklus. Grundsätzlich ist der Studie zu entnehmen, dass das Ergebnis signifikant von dem erzielten Leichtbaugrad, den vorherrschenden Produktionsrandbedingungen und der ausgewerteten Wirkungskategorie abhängig ist. Weitere Gründe für die unterschiedlichen Aussagen der einzelnen Studien sind die Verwendung verschiedener Charakterisierungsmodelle für die Berechnung der Wirkungskategorien [71] und die resultierende Kraftstoffreduktion aufgrund der Gewichtseinsparung.

2.7 Schlussfolgerung

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass im Bereich der Luftfahrtindustrie und für bestimmte Anwendungen im Maschinenbau trotz der dargestellten Bilanzunsicherheiten der Einsatz von Hochleistungsfaserverbundstrukturen zu einer Reduktion der Umwelt-

wirkungen im Gesamtlebenszyklus führen kann. In der Automobilindustrie ist das Einsparpotential in der Nutzungsphase deutlich geringer, so dass hier die Herstellungsphase des Produktes, die verwendeten Charakterisierungsmodelle und ausgewerteten Wirkungskategorien sowie die angenommene Treibstoffeinsparung, welche u. a. von der erzielten Gewichtseinsparung abhängig ist, an Bedeutung gewinnen.

Eine große Herausforderung bei der ökologischen Bewertung von CFK-Strukturen ist die Vielfalt der Fertigungsprozesse sowie die fehlende Datenbasis. Für etablierte Materialien kann bereits auf qualitativ hochwertige Datenbanken (PlasticsEurope [72], International Iron and Steel Institute IISI [73]) zurückgegriffen werden, um den Lebensweg eines Produktes ökobilanziell erfassen zu können. Für die Herstellung von Hochleistungsfaserverbundstrukturen sind für den Stand der Technik allerdings nur wenige Prozessbilanzdaten verfügbar, welche weiterhin eine hohe Bandbreite an Ergebniswerten aufweisen (vgl. Tab. 2-2, Tab. 2-18, Tab. 2-19). Mögliche Ursachen hierfür sind beispielsweise unterschiedliche Prozess- und Produktionsparameter, wie Aushärtetemperaturen, Anlagengröße und -auslastungsgrad. Eine eindeutige Zuordnung ist aufgrund fehlender Angaben oftmals nicht möglich. Um die Schwankungsbreite in der Herstellungsphase zu verringern bzw. eine belastbare bauteil- und anwendungsspezifische Aussage zu ermöglichen, ist eine gewisse Transparenz der resultierenden Energie- und Stoffflüsse in Abhängigkeit von den gewählten Fertigungsprozessketten und Bauteilkomplexitäten Grundvoraussetzung. Weiterhin werden derzeit eine Vielzahl von innovativen Fertigungstechnologien für die automatisierte Herstellung von CFK-Strukturen entwickelt, die vordergründig eine gewichts- und kostenoptimierte Fertigung von Hochleistungsfaserverbundwerkstoffen ermöglichen sollen. Diese Technologien weisen darüber hinaus ein deutliches Potential zur Verbesserung des Primärenergieeinsatzes sowie der Umweltwirkungen auf. Für eine ökobilanzielle Analyse fehlen u.a. aufgrund des Innovationscharakters die notwendigen Energie- und Stoffflüsse.

3 Definition des Ziels und des Untersuchungsrahmens

Ziel dieser Arbeit ist es eine umfassende ökologische Analyse von unterschiedlichen Fertigungsprozessketten für die Herstellung von CFK-Strukturen in der Automobilindustrie durchzuführen. In Kapitel 2 konnte gezeigt werden, dass insbesondere für diese Zielapplikation die Umweltwirkungen in der Herstellungsphase entscheidend für den ganzheitlichen ökologischen Nutzen des Produktes sind. Aufgrund der dargestellten Datenbasis und den damit einhergehenden unterschiedlichen Ergebnissen verschiedener Studien, soll diese Arbeit eine transparente und detaillierte Einschätzung der ökologischen Einflussgrößen in der Bauteilfertigung wiedergeben. Eine Vielzahl an Ergebnissen, die auf den in dieser Arbeit vorgestellten Analysen und Bewertungsmethoden basieren, sind bereits in Hohmann et al. [17,74] veröffentlicht. Hierbei werden jedoch weder mögliche Wechselwirkungen von unterschiedlichen Produktionsrandbedingungen in der Carbonfaser- und Bauteilherstellung untersucht, noch findet ein detaillierter Vergleich der einzelnen Fertigungsprozessketten statt.

3.1 Relevante Forschungsfragen

In dieser Arbeit sollen daher, zusätzlich zu den veröffentlichten Ergebnissen in Hohmann et al. [17,74], Antworten auf folgende Fragestellungen gegeben werden:

1. Wie wirken sich die Produktionsrandbedingungen in der Carbonfaserherstellung auf die Umweltwirkungen aus? Welche Produktionsparameter haben dabei den größten Einfluss und wie interagieren diese miteinander?
2. In welchem Wertebereich können die Umweltwirkungen der unterschiedlichen Fertigungsprozessketten variieren? Sind Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Produktionsparametern erkennbar und wie signifikant sind diese?
3. Ab welcher Verschnitttrate ist der Einsatz einer prozessenergieaufwendigeren Legetechnologie ökologisch sinnvoller als die Verarbeitung von flächigen, textilen Halbzeugen?
4. Welchen Einfluss hat die Bauteilfunktionalität bei einem ökologischen Vergleich von duroplastischen und thermoplastischen Fertigungsprozessketten?

Der Fokus der ökobilanziellen Untersuchungen liegt somit auf der Herstellungsphase von CFK-Strukturen. Die Arbeit soll dabei ein grundlegendes Verständnis über die öko-

logischen Einflussgrößen generieren. Aufbauend auf den Erkenntnissen kann in nachfolgenden Arbeiten ein transparenter Vergleich mit anderen Leichtbaumaterialien erfolgen. Hierfür muss allerdings die Vergleichbarkeit sichergestellt werden, wofür oftmals ein konkretes Produkt betrachtet werden muss [14].

3.2 Untersuchungsrahmen

Zur Beantwortung der adressierten Forschungsfragen, werden die Umweltwirkungen bei der Carbonfaserherstellung und in der gesamten Fertigungsprozesskette analysiert. Bei einem Vergleich unterschiedlicher Prozessketten muss darüber hinaus beachtet werden, dass die hergestellte CFK-Struktur den gleichen funktionellen Nutzen [14] aufweist. Insgesamt ergeben sich daher die in Tab. 3-1 aufgeführten Rahmenbedingungen.

Tab. 3-1: Definition des Untersuchungsrahmens

Funktionelle Einheit	Carbonfaserherstellung: 1 kg Carbonfaser Fertigungsprozessketten: 1 kg CFK-Bauteil Vergleich von Fertigungsprozessketten: Definierter funktioneller Nutzen
Bezugsland	Carbonfaserherstellung: Global bzw. unterschiedliche Produktionsgebiete Matrixherstellung: Europa Halbzeugherstellung und Bauteilproduktion: Deutschland
Bezugszeit	2013 ¹
Charakterisierungsmodell	CML-Methode 2001 – Januar 2016
Wirkungskategorien	Elementarer und fossiler abiotischer Ressourcenverbrauch (ADPe und ADP _f), Eutrophierungspotential (EP), Ozonabbaupotential (ODP), Photochemisches Oxidantienbildungspotential (POCP), Treibhauspotential (GWP), Versauerungspotential (AP)
Systemgrenzen	Innerhalb der Systemgrenzen: <ul style="list-style-type: none"> • Alle relevanten Material- und Bauteilherstellungsprozesse • Transport der Materialien Außerhalb der Systemgrenzen: <ul style="list-style-type: none"> • Herstellung von Hilfsstoffen, Werkzeugen und Anlagen • Recyceln von Produktionsabfällen aufgrund der Datenunsicherheit • Nutzungsphase und EoL

¹ Vorrangig definiert über das Bezugsjahr der Strombereitstellung in der GaBi Datenbank. Die Datenerhebung für die Modellierung der Fertigungstechnologien fand in den Jahren 2014 bis 2016 statt.

3.3 Beschreibung der Prozessketten für die ökobilanzielle Analyse

Es gibt eine Vielzahl an möglichen Fertigungsprozessketten zur Herstellung einer CFK-Struktur [75]. In dieser Arbeit werden, aufgrund der adressierten Zielapplikation Automobilindustrie, nur Fertigungstechnologien untersucht, die sich für eine automatisierte Produktion von hochvolumigen Stückzahlen eignen und eine Verarbeitung einer Endlosfaser ermöglichen. Verfahren, wie die manuelle Ablage, das 3D Fiber Placement, Vakuuminfusionsverfahren, sowie das Aushärten und Konsolidieren in einem Autoklav, Ofen oder variothermen Presse, werden somit für eine ökobilanzielle Betrachtung ausgeschlossen.

Weiterhin ist dem Leitfaden für eine ressourceneffiziente und umweltgerechte Fertigung von CFK-Strukturen [74] zu entnehmen, dass bei einem durchschnittlichen Produktionsszenario hauptsächlich zwei Faktoren relevant für die Umweltwirkungen sind. Der größte Stellhebel ist der anfallende Materialverschnitt. Einen weitaus geringeren Einfluss ($< 10\%$) hat die Anzahl der notwendigen Fertigungsprozessschritte. So weist beispielsweise das Flechten geringere Umweltwirkungen als materialeffiziente Legeverfahren (TFP und DFP) auf, weil der zusätzliche Umformschritt entfällt. Das Pultrusionsverfahren verursacht die geringsten Umweltwirkungen, da die Formgebung, die Imprägnierung und die Aushärtung in einem Prozessschritt erfolgt. Bei der Verarbeitung von thermoplastischen Halbzeugen sind die Umweltwirkungen der materialeffizienten Legeverfahren (thermoplastisches Tapelegen oder Fiber-Placement) nahezu identisch [74]. Aufgrund der geringen Unterschiede zwischen den Fertigungsverfahren, werden in der vorliegenden Arbeit exemplarisch zwei duroplastische und thermoplastische Fertigungsprozessketten im Detail analysiert. Neben dem aktuellen Stand der Technik, liegt der Fokus auf der Untersuchung von verschnittarmen 2D Legetechnologien zur Herstellung von schalenförmigen Bauteilstrukturen. Die einzelnen Prozessschritte können der Abb. 3-1 entnommen werden. Nachfolgend werden die betrachteten Fertigungsverfahren kurz vorgestellt.

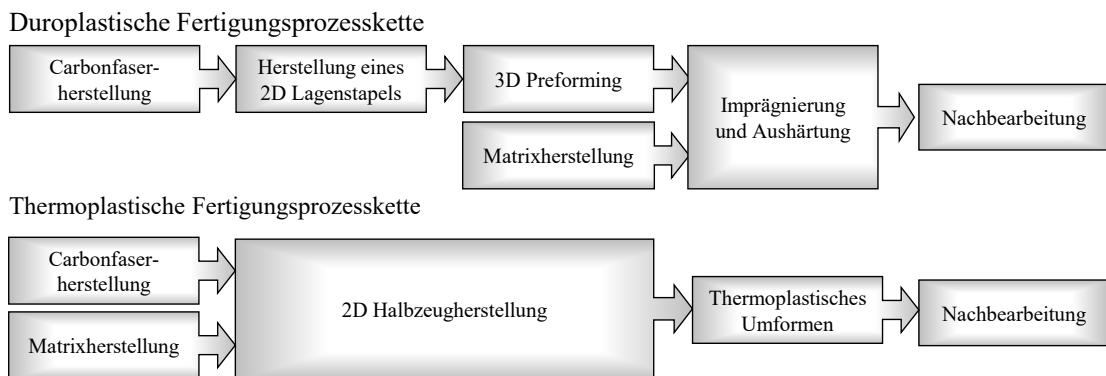


Abb. 3-1: Übersicht der Prozessschritte für die betrachteten duroplastische und thermoplastischen Fertigungsprozessketten

3.3.1 Fertigungsverfahren für die Herstellung von carbonfaserverstärkten Duroplasten

Die Herstellung von duromerbasierten CFK-Bauteilen kann oftmals, wie der Abb. 3-1 zu entnehmen ist, in die folgenden fünf Schritte unterteilt werden: Carbonfaserherstellung, Herstellung eines 2D Lagenstapels, 3D Preforming, Imprägnierung und Aushärtung sowie Nachbearbeitung. Die Carbonfaserherstellung ist ausführlich in Kapitel 2.2 diskutiert worden. In diesem Abschnitt werden die nachfolgenden Prozessschritte kurz erläutert.

Herstellung eines 2D Lagenstapels

In der Automobilindustrie werden üblicherweise textile zweidimensionale Halbzeuge für die Herstellung von schalenförmigen Faserverbundbauteilen verwendet. Die auf einem Rollengatter befindlichen Textilien mit unterschiedlichen Faserorientierungen werden parallel übereinander abgewickelt, der entsprechende 2D Geometriezuschnitt erfolgt mittels einer CNC-Schneideanlage [76-78]. Alternativ kann jede Lage separat zugeschnitten und anschließend aufeinandergestapelt werden. Letzteres ist insbesondere bei der Einbringung von lokalen Verstärkungen notwendig. Als textile Halbzeuge werden bei hohen mechanischen Anforderungen Gelege verwendet, während bei Sichtbauteilen Gewebe zum Einsatz kommen [79,80]. Ein Vorteil bei der Verarbeitung von textilen Halbzeugen ist die hohe Produktivität. Allerdings sind nur bestimmte Faserorientierungen erhältlich, so dass je nach Belastungsfall das theoretische Leichtbaupotential nur eingeschränkt erreicht werden kann. Weiterhin sind, auch wenn Nesting-Programme beim Zuschneiden eingesetzt werden, je nach Bauteilgeometrie und Halbzeugrollenbreite Verschnitttraten von bis zu 50% möglich [81].

Abhilfe kann hier der Einsatz von Legetechnologien schaffen, die eine belastungsgerechte und materialeffiziente Ablage von Faserbändchen erlauben. Automated Fiber Placement (AFP) Technologien werden heute größtenteils zur automatisierten Fertigung von Strukturbauteilen in der Luftfahrtindustrie genutzt [82-85]. Um entsprechende Legeraten für die Automobilindustrie zu realisieren, muss das Verfahren in einigen Punkten weiterentwickelt und an die Verarbeitung von kostengünstigen Ausgangsmaterialien angepasst werden. Zu nennen sei hier beispielsweise das Direct Roving Fiber Placement (DRFP) [86,87], der Voith Roving Applicator (VRA) [88] und die Ablage von trockenen Faserbändchen im Allgemeinen [17], welche nachfolgend unter dem Begriff Dry Fiber Placement (DFP) zusammengefasst werden. Je nach Anlagentyp können 8 bis 16 Bändchen (Bindergarne oder gespreizte Rovings) mit Breiten von $\frac{1}{4}$ bis 1 Zoll verarbeitet werden. In der Regel werden die Bändchen separat angesteuert und geschnitten, so dass eine deutliche Reduktion des Halbzeugverschnitts möglich ist. Je nach Bändchenbreite, Lagenaufbau und Bauteilgeometrie kann der Verschnitt auf bis zu 5% reduziert werden. Derzeitig am Markt verfügbare Legetechnologien, die trockenen Faserbändchen verar-

beiten, sind zumeist roboterbasiert. Die Fixierung der Bändchen kann durch eine kontinuierliche Aktivierung des auf den Faserbändchen aufgetragenen Binders mittels Laser oder IR-Lampe [81] erfolgen.

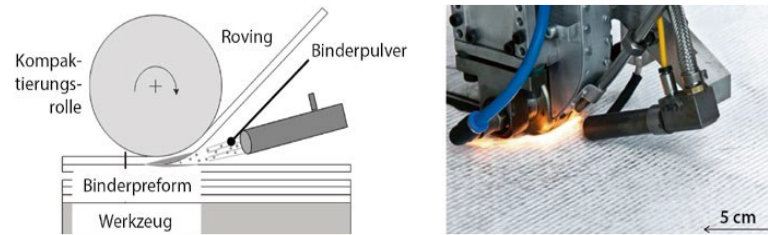


Abb. 3-2: Online Bebinderung bei einem verschnittarmen Legeverfahren [89]

Alternativ können die gespreizten Rovings am Rand, außerhalb des Bauteilbereiches, durch einen Schmelzkleber fixiert werden [17]. Die Produktivität der Anlage ist abhängig von der Legebreite, der Faserbändchen und der Bauteilgeometrie. Eine Herausforderung beim Einsatz der Technologien ist zum einen die robuste Verarbeitung der kostengünstigen Faserhalbzeuge und die anschließende Imprägnierung der kompakten Preform [74].

3D Preforming

Für eine Fixierung der 3D Geometrie sind die textilen Halbzeuge (Gelege, Gewebe, Faserbändchen) oftmals mit einem Binder versehen. Als Binder werden sowohl duroplastische als auch thermoplastische Materialien eingesetzt [89,90]. Unmittelbar vor der Umformung erfolgt eine Erwärmung der Lagenpakete bis zur Schmelztemperatur des Binders mittels einem Infrarot-Strahler oder einer Kontaktheizung. Anschließend wird das Lagenpaket in einem formgebenden Werkzeug positioniert und zumeist mithilfe einer Presse umgeformt. Durch das kalte Werkzeug (Raumtemperatur) erstarrt der Binder [17,91]. Das Trimmen der Preform nach dem Umformen ist notwendig, um eine exakte Übereinstimmung zum Imprägnier- bzw. Aushärtewerkzeug gewährleisten zu können.

Imprägnierung und Aushärtung

Für die Imprägnierung und Aushärtung wird in der Automobilindustrie häufig das Resin Transfer Molding (RTM) eingesetzt [92]. Hierbei wird die 3D Preform in ein zweiseitiges Formwerkzeug eingelegt und kompaktiert. Das Harz-/ Härtergemisch wird mit Überdruck anschließend in die geschlossene Kavität injiziert. Um ein Öffnen des Werkzeuges während der Injektions- und Aushärtephase zu verhindern, werden die beiden formgebenden Werkzeughälften oftmals durch eine Presse aufeinander fixiert. Die Vernetzung bzw. Aushärtung des Harz-/Härtergemisches erfolgt unter erhöhter Temperatur. Für die Beheizung wird ein Wärmeübertragungsmedium – (bedrucktes) Wasser oder Öl –, welches das Werkzeug durchströmt und durch ein Temperiergerät auf dem gewünschten Temperaturniveau gehalten wird, eingesetzt. Um Wärmeverluste aufgrund von Wär-

meilung zu minimieren, ist zwischen Werkzeug und Presseneinspannung eine zusätzliche Isolationsschicht angebracht [17]. In Abb. 3-3 ist der grundsätzliche Prozessablauf dargestellt.

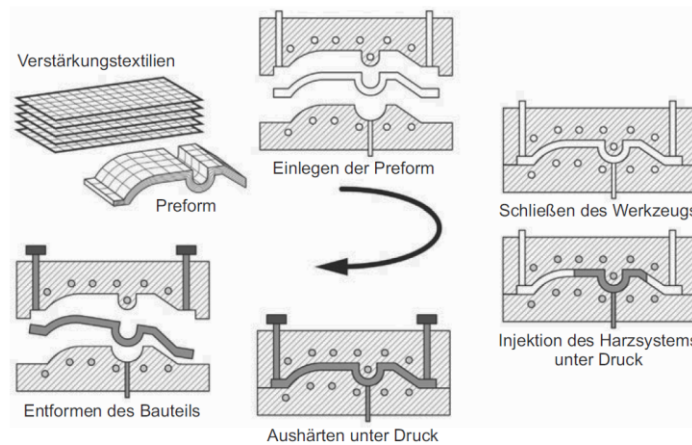


Abb. 3-3: Prozessablauf beim RTM nach [77]

Neben dem RTM-Verfahren ist das Nasspressen (WCM) ein in der Automobilindustrie oft verwendetes Imprägnier- und Aushärteverfahren für einfache Bauteilgeometrien [92,93]. Im Gegensatz zum RTM-Verfahren wird das Matrixsystem zunächst bahnförmig auf der Oberfläche des 2D Lagenstapels aufgebracht. Anschließend erfolgt die Umformung, Imprägnierung und Aushärtung in einem Prozessschritt [94]. Neben der geringeren Anzahl an Prozessschritten i. V. zum RTM-Verfahren, kann durch die Imprägnierung in Dickenrichtung der Werkzeuginnendruck gesenkt, kompaktere Preformstapel imprägniert und die Fließwege reduziert werden [58,94]. Letzteres ermöglicht die Verwendung von reaktiveren Harzsystemen und damit einhergehend die Verkürzung der Aushärtezeiten auf unter 5 min [58].

Nachbearbeitung

Trotz der meist endkonturnahen Fertigung bei CFK-Bauteilen ist nach dem RTM-Prozess zumindest eine Umrissbearbeitung erforderlich [91]. Weiterhin müssen je nach Bauteilanforderungen weitere Aussparungen eingebracht, Fehlstellen nachgebessert und die Oberfläche, teils sehr aufwendig, aufbereitet werden [81]. Für die Konturbearbeitung kommen das Wasser- oder Laserstrahlschneiden, das Umrissfräsen oder -schleifen und das Sägen oder Stanzen in Betracht [67]. Das Fräsen zählt dabei zu den häufigsten Bearbeitungsverfahren bei Faserverbundkunststoffen [67]. Bei der spanenden Bearbeitung von Faserverbundkunststoffen entstehen feine, pulverige Späne [95].

3.3.2 Fertigungsverfahren für die Herstellung von carbonfaserverstärkten Thermoplasten

Die meisten endlosfaserverstärkten Strukturbauteile werden auch heute noch mit duroplastischen Matrixsystemen hergestellt [96,97]. Allerdings weisen Thermoplaste hinsichtlich der Verarbeitung (Hinterspritzen, Fügen, etc.) einige Vorteile gegenüber Duroplasten auf, so dass in Forschungsvorhaben zunehmend thermoplastische Systeme zum Einsatz kommen [97]. Für den Einsatz in der Automobilindustrie folgen nach Abb. 3-1 nach der Carbonfaserherstellung drei weitere Fertigungsprozessschritte – 2D Halbzeugherstellung, thermoplastisches Umformen, Nachbearbeitung – um eine thermoplast-basierte CFK-Struktur herstellen zu können.

2D Halbzeugherstellung

Als 2D Halbzeug für die Herstellung von endlosfaserverstärkten Thermoplasten, werden in der Basisprozesskette Organobleche betrachtet. Diese vollständig imprägnierten Halbzeuge können auf unterschiedliche Arten hergestellt werden, wobei das Lösungsmittel- und Schmelzimprägnierverfahren am häufigsten eingesetzt wird. Während bei erst genannten die Imprägnierung in einem Lösemittelbad erfolgt und das Lösemittel anschließend verdampft, werden beim Schmelz-, Folien- und Pulverimprägnierverfahren, beide Werkstoffe in einer Doppelband- oder Intervall-Heißpresse miteinander verbunden. Organobleche werden üblicherweise als Plattenware hergestellt, die vor der Formgebung entsprechend der Bauteilgeometrie zurechtgeschnitten werden. Hierdurch sind die Faserorientierung sowie die Lagenanzahl eingeschränkt und es fallen je nach Bauteilgeometrie hohen Verschnitttraten an.

Durch den Einsatz einer verschnittarmen Legetechnologie kann hingegen ein belastungsgerechter und materialeffizienter Lagenaufbau erfolgen. Aufgrund der höheren Legeraten im Vergleich zum Automated Fiber Placement, wurde die automatisierte Ablage von faserverstärkten Thermoplast-Tapes (ATL) für die ressourceneffiziente Fertigung von CFK-Strukturbauteilen betrachtet. Für die Tapeherstellung können dabei die gleichen Verfahren, wie bei Organoblechen eingesetzt werden. Als Beispiel für eine Tapelegeverfahren wird die RELAY 2000 Anlage des Fraunhofer IGCV herangezogen (vgl. Abb. 3-4). Das ATL-Verfahren ermöglicht ein automatisiertes Ablegen von vorimprägnierten unidirektionalen Halbzeugen in Streifenform mit einer Breite von 50 bis 150 mm. Das Tapematerial wird von einem Greifer auf die gewünschte Länge abgezogen, geschnitten und auf dem Drehtisch positioniert. Mit Hilfe der Tischbewegung wird streifenweise die entsprechende Geometrie erzeugt. Um ein Verrutschen der Einzellagen zu verhindern, wird während dem streifenweisen Ablegen das Material punktuell mittels Ultraschall verschweißt. Im Anschluss werden die 2D Stacks beispielsweise in einer Doppelbandpresse konsolidiert.



Abb. 3-4: Thermoplastische Tapelegetechnologie am Fraunhofer IGCV

Umformen thermoplastischer Halbzeuge

Die Weiterverarbeitung von endlosfaserverstärkten 2D Thermoplasthalbzeugen erfolgt zumeist durch das Diaphragma-Verfahren oder dem Stempelumformprozess. Bei beiden Verfahren wird das Halbzeug bis knapp über die Schmelztemperatur erwärmt und anschließend umgeformt. Je nach Verfahren können hierfür Infrarot-, Kontakt-, Konvektions- und Induktionsheizsysteme eingesetzt werden [91]. Beim Diaphragmaverfahren wird das Halbzeug vor der Erwärmung zwischen zwei Folien gelegt und durch Vakuum fixiert. Die anschließende Umformung auf das einseitige formgebende Werkzeug erfolgt in einer Druckglocke durch Vakuum und einer zusätzliche Druckbeaufschlagung [96]. Beim Stempelumformen wird das Halbzeug nach dem Erwärmen zwischen zwei Urformen positioniert. Die Formgebung wird durch Schließen des Werkzeugs, welches in einer Presse eingespannt ist, realisiert [91]. Die Abkühlrate und damit einhergehend der Kristallisationsgrad wird bei beiden Verfahren über die isotherme Werkzeugtemperatur eingestellt.

Nachbearbeitung

Ähnlich wie bei den faserverstärkten Duroplasten erfolgt nach der Bauteilherstellung eine Umrissbearbeitung, das Einbringen von Aussparungen, das Nachbessern von Fehlstellen und sofern notwendig eine Oberflächenaufbereitung. Nach Witten et al. [67] hat der Matrixwerkstoff, aufgrund der Temperaturbeständigkeit, Auswirkungen auf die Prozessführung. Die in Frage kommenden Bearbeitungstechnologien entsprechen aber denen für faserverstärkte Duroplaste. Weitere Details zur Nachbearbeitung können daher dem Kapitel 3.3.1 entnommen werden.

4 Ökobilanz-Modell – Aufbau und Datenbasis

Für eine detaillierte ökobilanzielle Analyse sowie zur Identifikation von Produktionsrandbedingungen, die eine Verbesserung der Umweltwirkungen ermöglichen, bedarf es ein Energie- und Stoffstrommodell (vgl. Kapitel 2.1), welches eine flexible Berechnung der Sachbilanzdaten und der daraus resultierenden Wirkungskategorien für verschiedene Produktionsszenarien erlaubt. Einige der Technologien, wie beispielsweise die hydraulische Presse, werden entlang der Fertigungsprozesskette mehrmals eingesetzt. Um dies abbilden zu können und Dopplungen zu vermeiden, wurde das übergeordnete Ökobilanz-Modell in Form eines Baukastensystems aufgebaut. Die enthaltenen Bausteine wurden parametrisiert modelliert, so dass die Produktionsrandbedingungen je nach Position in der Fertigungsprozesskette flexibel angepasst werden können. Die benötigten Energie- und Stoffmengen werden entsprechend der gewählten Einstellungen automatisch berechnet. Hierdurch kann nicht nur die Anzahl der zu modellierenden Prozesse reduziert werden, sondern auch die notwendige flexible Analyse unterschiedlicher Produktionsrandbedingungen erfolgen. Eine Übersicht der Bausteine zur ökobilanziellen Bewertung der vier fokussierten Fertigungsprozessketten kann Abb. 4-1 entnommen werden. Neben den Strukturwerkstoffen, werden für die Fertigung von CFK-Bauteilen, Energie, Druckluft und Kühlwasser benötigt. Die Strukturwerkstoffe umfassen die Faser- und Matrixherstellung, sowie das Nähgarn und der Binder zur Veredelung der textilen Halbzeuge. Die Fertigungstechnologien beinhalten alle Prozessschritte, die benötigt werden um auf Basis der Strukturwerkstoffe ein CFK-Bauteil mit den vier fokussierten Fertigungsprozessketten herzustellen.

In den folgenden Abschnitten werden, die für eine ökobilanzielle Bewertung notwendige Modellierung der Energie- und Stoffflüsse für jeden Baustein vorgestellt. Hierbei kann zwischen drei verschiedenen Ausgangssituationen unterschieden werden:

1. Datensätze auf Basis der GaBi Professional Datenbank Version 8.6 SP33. Diese Bausteine sind in Abb. 4-1 schwarz umrandet und sind Inhalt von Abschnitt 4.1.
2. Datensätze auf Basis von Literaturdaten aus Kapitel 2.2 bis 2.5. Diese Bausteine sind in Abb. 4-1 mit einer schwarz gestrichelten Linie umrandet und werden in Abschnitt 4.2 diskutiert.
3. Datensätze auf Basis von experimentell ermittelten Energie- und Stoffflüssen. Diese sind in Abb. 4-1 mit einer schwarz gepunkteten Linie umrandet und werden in Abschnitt 4.3 vorgestellt.

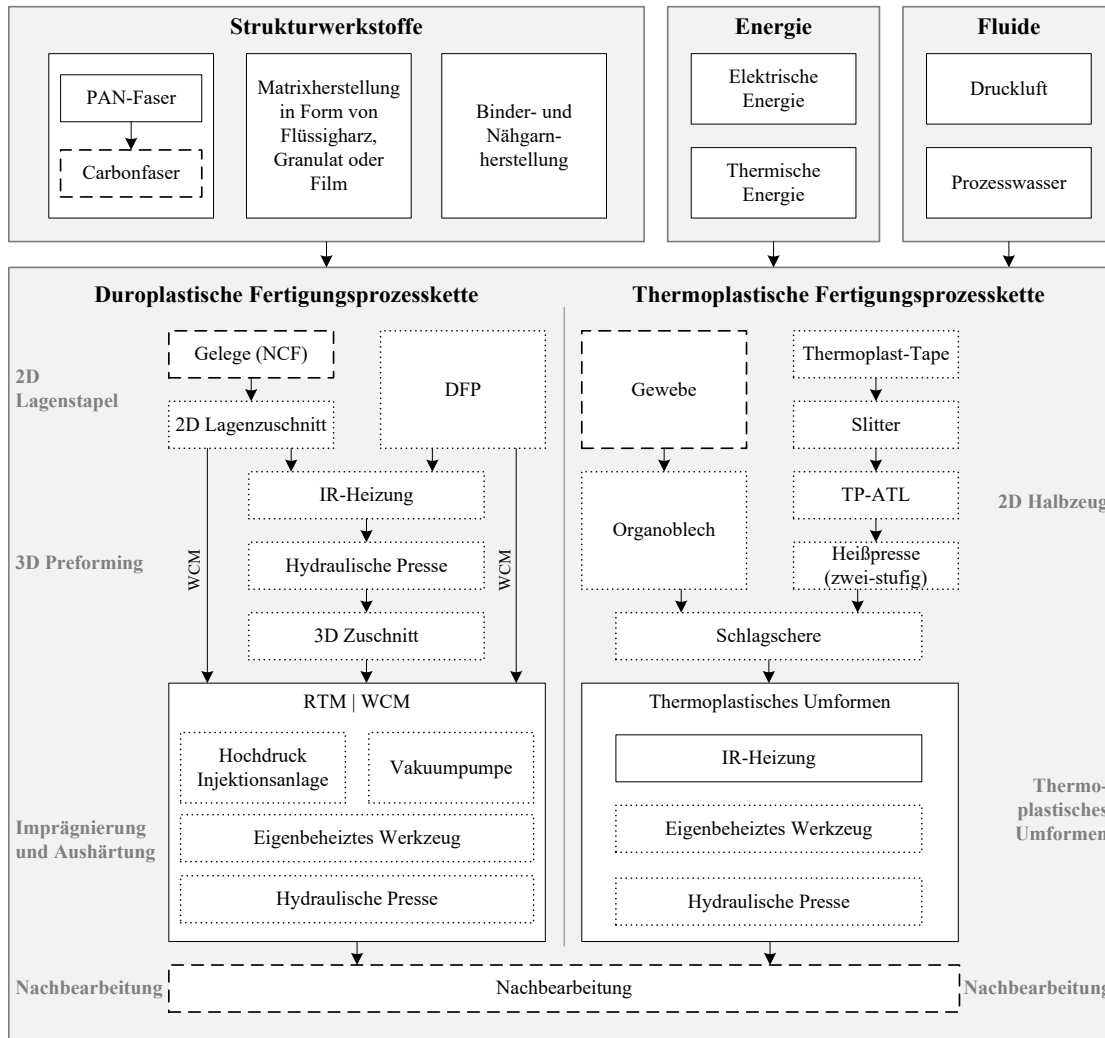


Abb. 4-1: Übersicht der zu modellierenden Prozessschritte bzw. Bausteine (— Datenbank; - - - Literatur; ··· Experimentell)

4.1 Modellierung der Bausteine verfügbar in Datenbanken

Für folgende Bausteine sind bereits qualitativ hochwertige Daten in der GaBi Professional Datenbank Version 8.6 SP33 verfügbar:

- Strukturwerkstoffe: PAN-Faserherstellung, Matrix(film)herstellung, Binder- und Nähgarnherstellung
- Energie: Elektrische und thermische Energie
- Fluide: Druckluft und Prozess- bzw. Kühlwasser
- Fertigungstechnologien: IR-Heizung als Teilprozessschritt für die Umformung thermoplastischer Halbzeuge

Die entsprechenden Hintergrunddatensätze sind in der Tab. A-1 im Anhang A-a zusammengefasst.

4.1.1 Strukturwerkstoffe

Bis auf die Carbonfaserherstellung sind alle Daten für die Bereitstellung der Strukturwerkstoffe in der GaBi Datenbank verfügbar. Je nach zu analysierender Fertigungsprozesskette, muss vom Anwender das gewünschte Matrix- und das dazu passende Bindersystem (Epoxidharz, PU, UP, PP und PA6-Granulat) über einen Auswahlparameter definiert werden. Die für die Herstellung von 1 kg Carbonfaser bzw. CFK-Bauteil benötigten Stoffmengen werden dabei in den entsprechenden nachfolgenden Technologiebausteinen festgelegt.

4.1.2 Energie

In der CFK-Bauteilfertigung wird hauptsächlich elektrische Energie benötigt. Eine Ausnahme bildet die Erwärmung von thermoplastischen Halbzeugen mithilfe einer IR-Heizung. Der hierfür verwendete GaBi Datensatz bedarf auch thermischer Energie. Als Hintergrunddatensatz wurde die thermische Energiebereitstellung aus Erdgas in Deutschland aus der GaBi Datenbank herangezogen.

Bei der elektrischen Energiebereitstellung ist neben dem Einsatz von deutschem Strom Mix, auch ein Produktionsbetrieb mit einer autarken Energieversorgung durch erneuerbaren Energien möglich. In Deutschland und in Europa wird Strom aus erneuerbaren Energien für das Bezugsjahr 2013¹ hauptsächlich aus Wasserkraft, Windenergie, Photovoltaik und Biomasse hergestellt (vgl. Abb. 4-2).

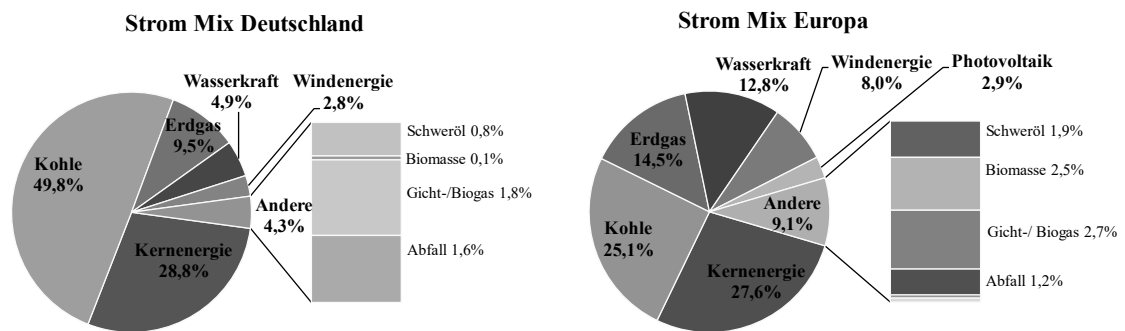


Abb. 4-2: Energiezusammensetzung Strom Mix Deutschland und Europa im Bezugsjahr 2013 [21,98]

¹ Das Bezugsjahr 2013 wurde für die Darstellung gewählt, da die verfügbaren Datensätze in den Datenbanken einen zeitlichen Versatz aufweisen. In dieser Arbeit wurde die GaBi ts Software Version 8.1.0.29 und die Datenbank Version 8.6 SP33 verwendet, welche sich bei der Strombereitstellung auf das Jahr 2013 bezieht.

In Abb. 4-3 sind die resultierenden Umweltwirkungen für die Herstellung von 1 MJ Strom aus verschiedenen Energiequellen dargestellt. Die Ergebnisse sind jeweils auf den maximalen Wert einer Wirkungskategorie normiert. Die Stromerzeugung mithilfe von Photovoltaikanlagen führt beispielsweise i. V. zu den anderen Herstellungsarten zu dem höchsten elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch. Die Gegenüberstellung aller Wirkungskategorien zeigt, dass Strom aus Wasserkraft bis auf den elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch zu der geringsten Umweltbelastung führt. Der deutsche Strom Mix, Strom aus Photovoltaik und Strom aus Biomasse verursachen hingegen die höchste Umweltbelastung in den Wirkungskategorien. Um den maximalen Wertebereich abbilden zu können, kann im Ökobilanz-Modell daher zwischen Strom Mix, Strom aus Biomasse, Wasserkraft oder Photovoltaik unterschieden werden.

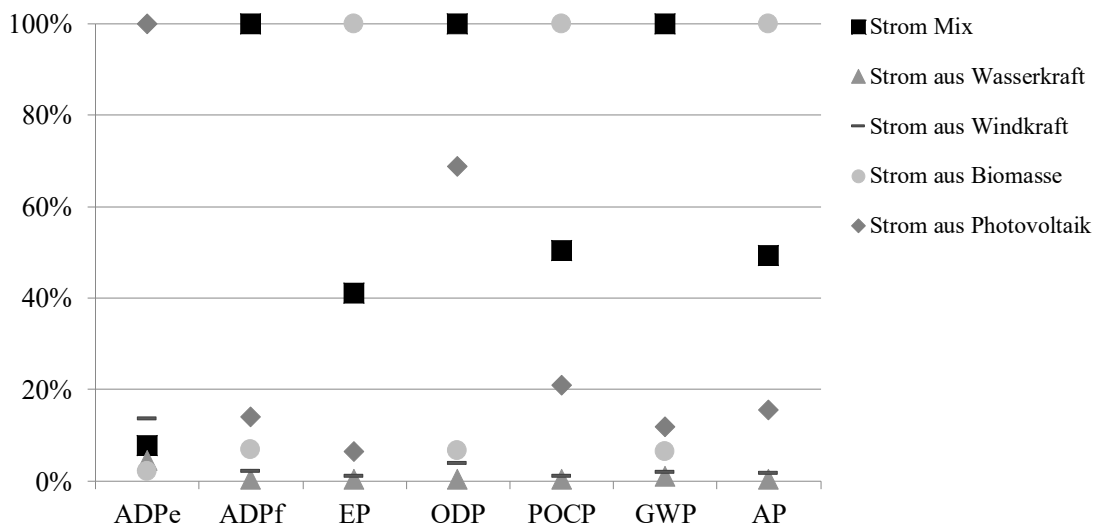


Abb. 4-3: Übersicht der Umweltwirkung unterschiedlicher Energiequellen zur Bereitstellung von 1 MJ Strom in Deutschland, jeweils normiert auf die höchste Umweltbelastung einer Wirkungskategorie (vgl. Tab. A-1 im Anhang A-a)

4.1.3 Fluide

Einige der Modellbausteine benötigen Druckluft und/ oder Prozess- bzw. Kühlwasser. Die Mengen werden durch die Bausteine der entsprechenden Fertigungstechnologien festgelegt. Die Hintergrunddaten der Druckluft- und Kühlwasserbereitstellung, d.h. die hierfür benötigten Ressourcen und freigesetzten Emissionen sind in Datensätzen der GaBi Datenbank enthalten (vgl. Tab. A-1 im Anhang A-a).

4.1.4 Fertigungstechnologien

Für das Thermoformen von unverstärkten Kunststoffen ist bereits ein parametrisierter Datensatz in der GaBi Datenbank verfügbar (vgl. Tab. A-1 im Anhang A-a). Es kann die Produktionsrate, die Strahler-Fläche und der Strahler-Typ variiert werden, um den Einfluss unterschiedlicher Produktionsszenarien auf den Energiebedarf zu untersuchen.

Allerdings enthält dieser Datensatz neben der IR-Heizstrecke auch noch Verbrauchsdaten für einen Diaphragma-Umformprozess, der nicht Bestandteil der in dieser Arbeit fokussierten Prozessketten ist [99]. Aufgrund der beiden Prozessabweichungen (Verarbeitung von unverstärkten Kunststoffen, zusätzlicher Diaphragma-Umformprozess), wurde zuerst überprüft, ob der GaBi Datensatz zur Bilanzierung des Energiebedarfs bei der Erwärmung von faserverstärkten Thermoplasthalbzeugen geeignet ist [100]. Hierfür wurde der GaBi Datensatz mit den gemessenen Daten für die Erwärmung von bebinderten Gelegen mithilfe einer IR-Heizung (vgl. Abschnitt 4.3) verglichen. In Abb. 4-4 ist der gemessene Energieverbrauch für die Binderaktivierung (Schmelztemperatur 80 bis 100 °C und Strahler-Temperatur 200 °C) und dem in der GaBi Datenbank verfügbaren Datensatz aufgetragen. Die Strahler-Fläche ist bei beiden Datensätzen auf 1 m² fixiert. Der Wertebereich für den GaBi Datensatz ist auf den berücksichtigten bzw. nicht berücksichtigten Leistungsbedarf für die anschließende Diaphragma-Umformung zurückzuführen. Wie in Abb. 4-4 ersichtlich kann der GaBi Datensatz auch für faserverstärkte Halbzeuge verwendet werden. Innerhalb des Verarbeitungsfensters von 1 bis 2 min muss keine Anpassung des GaBi Datensatzes erfolgen.

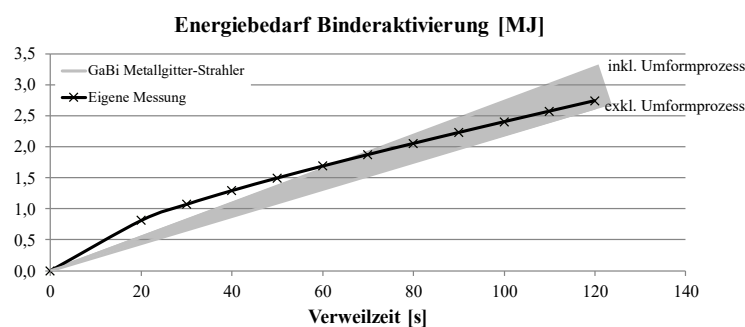


Abb. 4-4: Energieverbrauch IR-Strahler im Vergleich

4.2 Modellierung der Bausteine auf Basis von Literaturdaten

Für einige der in Abb. 4-1 dargestellten Bausteine gab es zwar noch keine Datensätze in der GaBi Datenbank, die notwendigen Energie- und Stoffflüsse konnten aber anhand von unterschiedlichen Literaturdaten belastbar ermittelt werden. Hierzu gehört neben der textilen Halbzeugherstellung (Gelege und Gewebe) auch die Nachbearbeitung von CFK-Bauteilen. Bei der Carbonfaserherstellung, war eine Anlagenvermessung nicht möglich, so dass auch hier auf Literaturwerte zurückgegriffen wurde.

4.2.1 Strukturwerkstoffe

In Kapitel 2.2 wurde die Carbonfaserherstellung und die verfügbaren Daten für eine ökobilanzielle Bewertung vorgestellt. Um die Einflussfaktoren der unterschiedlichen

Prozess- und Produktionsparameter auf die Umweltwirkung bei der Carbonfaserherstellung zu analysieren, können im Energie- und Stoffstrommodell nachfolgende Einstellungen variiert werden.

Massenverlust von der PAN- zur Carbonfaser

Der Massenverlust ist variabel zwischen 45 und 55% einstellbar, wobei der Sauerstoffbedarf und die freigesetzten Emissionen in Abhängigkeit des Massenverlusts berechnet werden (vgl. Tab. 2-7 und Tab. 2-8). Die gewählte Spannweite deckt dabei zum größten Teil die in den Literaturquellen gefundenen Angaben ab (vgl. Kapitel 2.2).

Produktionsstandort

Das gewählte Produktionsgebiet hat besonders einen Einfluss auf die Umweltwirkungen der Energiebereitstellung und die zu berücksichtigenden Transportwege. Wie in Kapitel 2.2 aufgezeigt, befinden sich die meisten Produktionsstandorte in Asien, den USA oder Europa. Daher kann zwischen diesen Gebieten im Modell unterschieden werden. Weiterhin gibt es die Möglichkeit eine weltweite durchschnittliche Produktion zu modellieren. Hierfür wird jedes Produktionsgebiet in Abhängigkeit der jährlichen Carbonfaser-Produktionskapazitäten anteilig berücksichtigt. Aufgrund der Aktualität der Daten wird die prozentuale Verteilung der Produktionskapazitäten des Composite Marktberichts 2016 [23] bei der Bilanzierung der Carbonfaserherstellung herangezogen (vgl. Abb. 4-5).

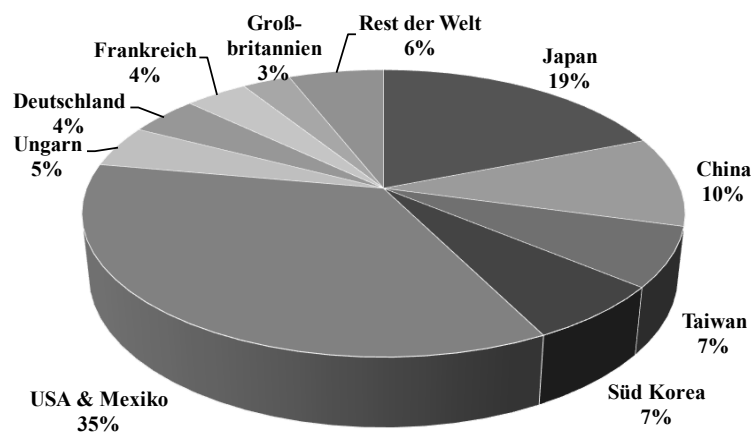


Abb. 4-5: Prozentuale Verteilung der jährlichen Carbonfaser Produktionskapazitäten weltweit im Jahr 2016 [23]

Energiebedarf

Für die Modellierung sind nur Energieflüsse für die Carbonfaserherstellung ausgehend von der PAN-Faser relevant, da für letzteres bereits auf einen qualitativ hochwertigen Datensatz zurückgegriffen werden kann. Weiterhin wird aufgrund der betrachteten Fertigungsprozessketten und der Zielapplikation der Energiebedarf für die Herstellung von

HT-Fasern betrachtet. Im Energie- und Stoffstrommodell können beim Energiebedarf in der Faserherstellung zwei verschiedene Parameter variiert werden.

1. Energieart bzw. Verhältnis von thermischer und elektrischer Energie:
Für die Produktion mit hohem thermischem Energieanteil werden die Daten aus Meng [30] für die Bilanzierung verwendet. Für einen Produktionsstandort mit einem hohen Stromverbrauch wird der Energieverbrauch von Das [18] herangezogen. Weiterhin gibt es einen durchschnittlichen Datensatz, der den Mittelwerten der beiden Literaturangaben entspricht.
2. Energiequelle:
Es ist eine Variation zwischen dem Standortspezifischen Strom Mix sowie die Verwendung von erneuerbaren Energien aus Wind- oder Wasserkraft möglich.

Elektrolyt, Schlichte, Wasser, Luft- und Stickstoffbedarf, Emissionen

Mögliche Variationen bei der Art und Menge der weiteren Stoffflüsse sowie der resultierenden Emissionen (vgl. Kapitel 2.2), wird durch die Auswahl zwischen zwei unterschiedlichen Carbonfaserdatensätzen Rechnung getragen. Für jeden Datensatz können die bisher genannten Produktionsparameter, wie beispielsweise der Produktionsstandort, variiert werden. In Tab. 4-1 sind die gewählten Einstellungen für die beiden Faserdatensätze dargestellt. Hierbei ist zu erwähnen, dass die bei der Umwandlung von Ammoniak und Blausäure verwendeten Reaktionsgleichungen zwei Extrema darstellen. Weder werden in einer Produktionsanlage bei der Abgasnachbehandlung nur Stickstoffmonoxide entstehen, noch wird nur molekularer Stickstoff gebildet. Ersteres ist oftmals nicht umsetzbar, da in vielen Ländern die erlaubten Grenzwerte überschritten werden würden und daher eine weitere Nachbehandlung der Gase notwendig wäre. Letzteres ist zwar ein mögliches Produktionsszenario, allerdings ist davon auszugehen das ein kleiner Anteil an Stickstoffmonoxiden oder -dioxiden in den Abgasen verbleibt.

Tab. 4-1: Art und Menge der Stoffflüsse sowie der resultierenden Emissionen bei der Carbonfaserherstellung

	Faserdatensatz 1	Faserdatensatz 2
Eingesetztes Elektrolyt	Schwefelsäure	Ammoniumhydrogencarbonat
Menge an Elektrolyt in der Lösung	2 Gew.-% der Carbonfaser	3 Gew.-% der Carbonfaser
Schlichte	Entspricht dem Matrixsystem der Folgeprozesse	Entspricht dem Matrixsystem der Folgeprozesse
Schlichtegehalt der Carbonfaser	1 Gew.-% der Carbonfaser	2 Gew.-% der Carbonfaser
Wasserbedarf bei der Oberflächenaktivierung inkl. Waschprozess (vgl. Tab. 2-4)	2,38 kg/kg Carbonfaser; 0,1 Gew.-% der Carbonfaser Restfeuchte auf der Carbonfaser	2,37 kg/kg Carbonfaser; 0,1 Gew.-% der Carbonfaser Restfeuchte auf der Carbonfaser

	Faserdatensatz 1	Faserdatensatz 2
Wasserbedarf beim Schlichteauftrag (vgl. Tab. 2-5)	0,5 kg/kg Carbonfaser	2,837 kg/kg Carbonfaser
Verdampfung und Leckage beim Kühlwasserkreislauf (vgl. Tab. 2-6)	Nein; 0 kg Wasserbedarf und Wasserdampf pro kg Carbonfaser	5% der zirkulierenden Wassermenge; 5,85 kg Wasserbedarf und Wasserdampf pro kg Carbonfaser
Luftbedarf bei der Stabilisierung (vgl. Tab. 2-7)	Doppelt so hoch, wie für eine stöchiometrische Reaktion notwendig	Viermal so hoch, wie für eine stöchiometrische Reaktion notwendig
Emissionsgase bei der Carbonisierung (vgl. Tab. 2-8)	Datensatz 1	Datensatz 2
Effizienzfaktor bei der Nachverbrennung (vgl. Tab. 2-9)	95% für die Verbrennung von Ammoniak, Blausäure, Kohlenmonoxid; 99,9% für die Verbrennung von Ethan; 100% für die Verbrennung von Ethen, Methan und Wasserstoff	95% für die Verbrennung von Kohlenmonoxid und Ethan; 97,5% für die Verbrennung von Ammoniak; 99,9% für die Verbrennung von Blausäure; 100% für die Verbrennung von Ethen, Methan und Wasserstoff
Reaktionsgleichung für die Verbrennung von Ammoniak und Blausäure (vgl. Tab. 2-10)	Es entsteht Stickstoffmonoxid; Reaktionsgleichung (2-2) und (2-5)	Es entsteht Stickstoff; Reaktionsgleichung (2-3) und (2-6)

Transport

Die Transportwege werden in Abhängigkeit des gewählten Produktionsstandortes automatisch im Modell berechnet (vgl. Tab. 2-11 in Kapitel 2.2). Sofern eine weltweit durchschnittliche Carbonfaserherstellung für die Bilanzierung gewählt wird, werden die jeweiligen Produktionswege anteilig berücksichtigt. Darüber hinaus besteht die Möglichkeit den Transport vollständig zu vernachlässigen, um dessen Einfluss auf die Umweltwirkungen zu ermitteln. Hierdurch kann der notwendige Detaillierungsgrad, mit dem die Produktionswege erhoben werden müssen, bestimmt werden.

4.2.2 Fertigungstechnologien

Für die **textile Halbzeugherstellung (Gelege und Gewebe)** kann auf einen qualitativ hochwertigen Datensatz von Stiller [28] (vgl. Kapitel 2.3) zurückgegriffen werden. Für die Umrechnung auf einen gewichtsspezifischen Energieverbrauchswert, ist das Flächengewicht als Variable im Energie- und Stoffstrommodell berücksichtigt. Dies gilt auch für den prozentualen Anteil des Nähgarns und Binders bei der Gelegeherstellung. Der Energiebedarf für den Binderauftrag wurde in einem ersten Schritt vernachlässigt, da die Gelegeherstellung als dominierend eingeschätzt worden ist. Sofern die textile Halbzeugherstellung einen relevanten Einfluss auf die gesamte Prozesskette hat, muss dies im Modell ergänzt werden.

Die Energie- und Stoffflüsse der **Nachbearbeitung** entsprechen einem konventionellen Fräsprozess. Bei der Modellierung wurden die Leistungsdaten aus dem Abschlussbericht von FlexiCut [65] berücksichtigt. Die Prozesszeiten werden dabei in Abhängigkeit der Bauteilgeometrie für eine durchschnittliche Bearbeitungsgeschwindigkeit von 1,4 m/min berechnet. Der Verschnitt sowie die Staubentwicklung können variabel eingestellt werden.

4.3 Modellierung der Bausteine auf Basis von experimentellen Daten

Obwohl für eine Vielzahl der in Abb. 4-1 dargestellten Bausteine Literaturdaten verfügbar sind, welche auch in Kapitel 2.2 bis 2.5 ausführlich diskutiert wurden, müssen die Energie- und Stoffflüsse für viele dieser Bausteine neu erhoben werden. Grund hierfür sind die fehlenden Produktionsdaten, die keine flexible Modellierung der Energie- und Stoffflüsse in Abhängigkeit der Prozessrandbedingungen ermöglichen.

In diesem Abschnitt wird daher zuerst auf die Vorgehensweise bei der Datenerhebung und -auswertung für die Fertigungstechnologien eingegangen. Anschließend wird die Modellierung der Energie- und Stoffflüsse für die einzelnen Bausteine vorgestellt. Die Ergebnisse werden dabei sofern möglich mit den verfügbaren Literaturdaten verglichen.

Grundsätzlich muss berücksichtigt werden, dass im Modell die Energie- und Stoffflüsse auf 1 kg hergestelltes Material in dem jeweiligen Prozess (z.B. Faser, Gelege, Preform, etc.) bezogen werden. Sofern der Prozess einen masseunabhängigen Material- und Energiebedarf aufweist, muss bei der Umrechnung auf die gewichtsspezifischen Energie- und Stoffflüsse, die zu fertigende Bauteilmasse berücksichtigt werden.

4.3.1 Vorgehensweise bei der Datenermittlung

Ziel der prozessspezifischen Anlagenvermessung ist die Ermittlung aller notwendigen Prozessbilanzdaten für eine ökobilanzielle Bewertung der definierten Fertigungsprozessketten. Die grundsätzliche Vorgehensweise bei der Datenerfassung und -auswertung ist in Abb. 4-6 dargestellt.

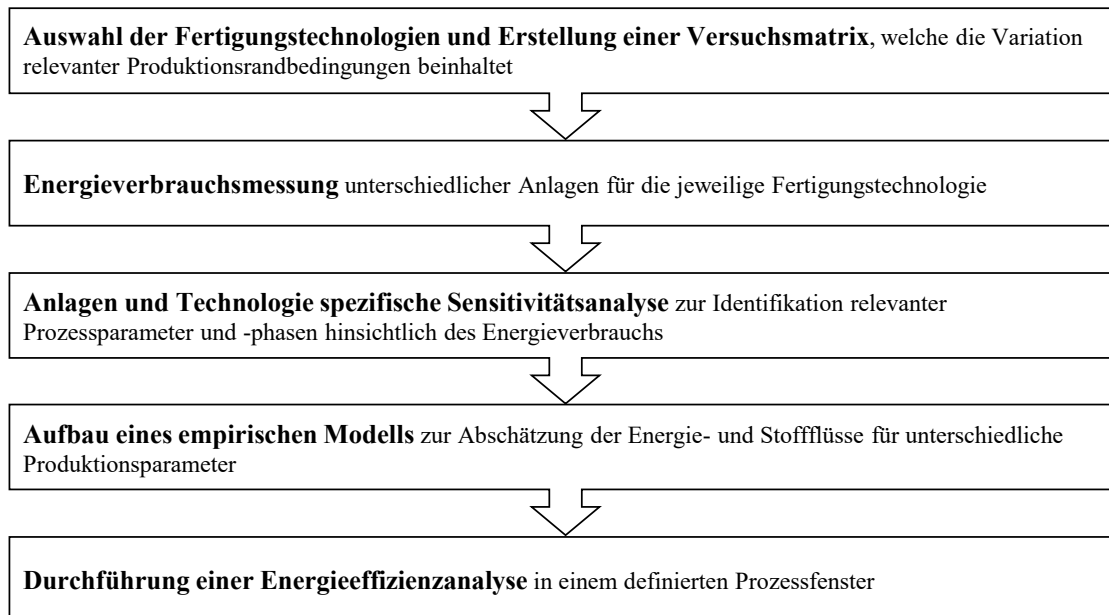


Abb. 4-6: Vorgehensweise bei der Datenerhebung und -auswertung

Unter Berücksichtigung der variierbaren Prozessparameter, wie beispielsweise Prozessdruck, Temperatur, Zykluszeit, Material, und des technologiespezifischen Prozessfensters, wurde eine Versuchsmatrix für jede Anlage erstellt. Aufgrund der Vielzahl an Parameterkombinationen, fand nur die Vermessung für die relevantesten Produktionsszenarien statt. Eine Übersicht der durchgeführten Versuchsreihen kann dem Anhang A-b entnommen werden. Zur Messung der Energie- und Stoffflüsse wurden folgende Messgeräte eingesetzt:

- Stromverbrauch: Fluke 435, Fluke 1730 und CML 1000 je nach Nennleistung
- Druckluftverbrauch: Flügelradsensor der Fa. Höntzsch
- Kühlwasserverbrauch: Ultraschall-Durchflussmessgerät KATflow230

Die Messung des Kühlwasserverbrauchs erfolgte nur bei einer aktiven Regelung des Volumenstroms. In allen anderen Fällen wurde über die Bernoulli Gleichung unter Berücksichtigung des Druckverlusts zwischen Kühlwasserein- und auslass, dem Leitungsdurchmesser und der Prozesszeit, der Verbrauch abgeschätzt. In diesem Kontext ist zu erwähnen, dass nicht der gesamte Kühlwasserbedarf bei der Bilanzierung berücksichtigt worden ist, da von einem geschlossenen Kühlkreislauf ausgegangen wird. Vielmehr wurde wie von Ökobilanzexperten vorgeschlagen [36], ein Wasserverlust von 5% des Kühlwasserbedarfs aufgrund von Leckagen im System und Verdampfung angenommen. Mögliche Emissionen und Staubpartikel wurden bei den Fertigungstechnologien nicht gemessen und beim Energie- und Stoffstrommodell dementsprechend auch nicht berücksichtigt.

Auf Basis der Messungen erfolgte für jede Fertigungstechnologie eine Sensitivitätsanalyse, um festzustellen, welche Verbraucher, Prozessphasen und -parameter relevant sind

bzw. vernachlässigt werden können. Unter Berücksichtigung der gewonnenen Erkenntnisse wurde jeweils ein technologiespezifisches empirisches Modell entwickelt, welches die Abschätzung der Energie- und Stoffflüsse für unterschiedliche Produktionsszenarien ermöglicht und dementsprechend die Grundlage des übergeordneten Ökobilanz-Modells bildet. Bei der abschließenden Validierung der Modelle, d.h. beim Vergleich der berechneten und gemessenen Energie- und Stoffflüsse, konnte eine maximale Abweichung von 10% festgestellt werden. Die auf diesen Modellen basierenden Energieeffizienzanalysen sind in Hohmann et al. [74] veröffentlicht. Ziel war hierbei unter Anwendung der OFAT Methode [101] den Einfluss unterschiedlicher Prozessparameter auf den gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf zu quantifizieren und mögliche Stellhebel für eine Optimierung zu identifizieren. Weiterhin ist die Datenerhebung und -auswertung für einige Fertigungstechnologien bereits veröffentlicht [15]. Auf eine ausführliche Darstellung für diese Fertigungstechnologien wird daher in dieser Arbeit verzichtet.

4.3.2 Fertigungstechnologien

Insgesamt wurden für 12 Fertigungstechnologien die Energie- und Stoffflüsse für unterschiedliche Produktionsparameter vermessen. Die entsprechenden Anlagendaten sowie die gewählten Parametereinstellungen bei der Durchführung der Versuche sind im Anhang A-b zu finden. Eine Gegenüberstellung mit verfügbaren Literaturdaten findet unter Berücksichtigung der veröffentlichten Energieeffizienzanalysen aus Hohmann et al. [74] statt. Diese basieren auf den Energie- und Stoffflussmodellen, die in den nachfolgenden Abschnitten vorgestellt werden. Hierbei wurde ausgehend von einem definierten durchschnittlichen Produktionsszenario jeder Parameter einzeln entlang des Prozessfensters variiert und der Einfluss auf den gewichtsspezifischen Energieverbrauch bestimmt. Eine positive prozentuale Änderung entspricht dabei einer Steigerung, eine negative eine entsprechende Reduktion des Energiebedarfs. Die gewählten Parameter für ein durchschnittliches Produktionsszenario wurden von einem Expertengremium aus der Automobilindustrie festgelegt [17,74].

2D Lagenzuschnitt

Für den Lagenzuschnitt wurde der Leistungsbedarf eines Digital Cutter der Fa. Zünd mit einer Zuschnittsfläche von ca. 1,3 m auf 2,5 m gemessen. Als relevanter Parameter konnte der Bedeckungsgrad der Zuschnittsfläche identifiziert werden, so dass dieser im Rahmen der Messreihen variiert wurde und im Energie- und Stoffstrommodell frei einstellbar ist. Abgesehen davon ist der Leistungsbedarf nach der Anlaufphase konstant, so dass der Energieverbrauch nur von der Prozesszeit, die wiederum durch die Schnittgeschwindigkeit und der Schnittlänge definiert ist, abhängig ist. Die Schnittgeschwindigkeit ist im Energie- und Stoffstrommodell auf 10 m/min fixiert. Die Schnittlänge wird über die im Modell einzugebende Bauteillänge und -breite definiert, wobei der Materialverschnitt mit eingerechnet wird. Geometrieabwicklungsbedingte Änderungen wurden nicht berücksichtigt und müssen, sofern der Prozessschritt relevant ist, in das Modell

integriert werden. Auch ein separates Stacking wurde energetisch vernachlässigt. Ein Abgleich mit den verfügbaren Literaturdaten in Abb. 4-7 zeigt, dass diese eine ähnliche Spannweite aufweisen, sich vermutlich, aufgrund eines anderen Anlagentyps, aber ein höherer gewichtsspezifischer Verbrauchswert ergeben hat.

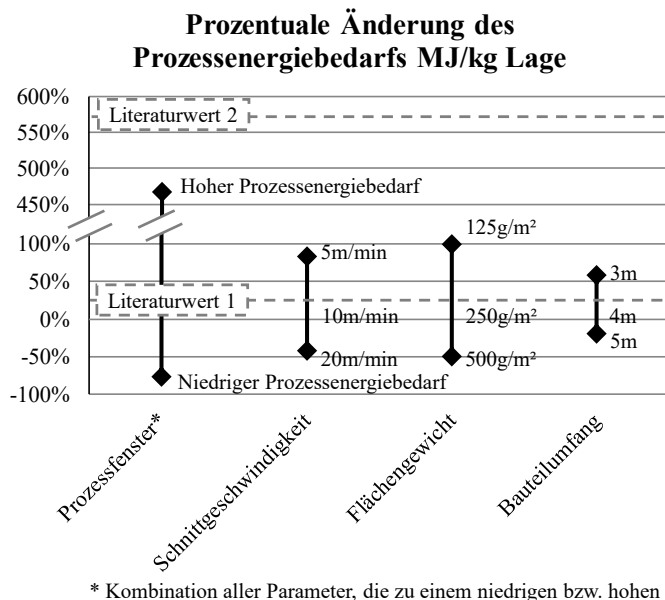


Abb. 4-7: Vergleich der Daten für den Zuschnitt von textilen Halbzeugen (Literaturwert 1 [40], Literaturwert 2 [56])

Verschnittarme Legeverfahren – DFP

Für die Ablage von trockenen Bändchen wurden zwei unterschiedliche Anlagensysteme betrachtet, die im Modellbaustein DFP zusammengefasst sind (vgl. Abb. 4-1). Zum einen wurde das DRFP Verfahren der Fa. Compositence GmbH und zum anderen die Ablage von Bindergarnen mit der Coriolis Composites Legetechnologie untersucht. Eine ausführliche Beschreibung der Messergebnisse kann Hohmann et al. [17] entnommen werden.

Hauptunterschied bei diesen beiden Anlagentypen ist die Ausführung des Spulengatters, die zu verarbeitenden Halbzeuge und die Aktivierungseinheit am Legekopf. Im Energie- und Stoffstrommodell kann daher beispielsweise zwischen einem bedruckten und nicht bedruckten Spulengatter sowie zwischen drei Fixierungsmöglichkeiten (Klebstoff, Binderaktivierung durch IR-Lampe oder Laser) ausgewählt werden. Weiterhin ist die Ablagerate als Eingangsgröße einzugeben. In Hohmann et al. [17,74] wird gezeigt, dass der prozessspezifische Energiebedarf insbesondere bei der Klebstofffixierung vom Druckluftverbrauch dominiert wird. Die Ablagerate hat hierbei kaum einen Einfluss, vielmehr sind die Anzahl der parallel zugeführten Rovings bzw. der Rovingtyp und die abgelegte Rovinglänge entscheidend. Die Anzahl der Rovings kann im Modell über den Rovingtyp und die Legekopfbreite variiert werden. Die Rovinglänge wird über die einzugebende durchschnittliche Lagenorientierung und die Bauteilgeometriedaten berechnet.

In Kapitel 2.4 wurden Literaturwerte für AFP Technologien zur Ablage von duromeren Prepregs vorgestellt. Ein Vergleich mit dem Energie- und Stoffstrommodell zeigt, dass trotz niedriger Legerate (Literaturquelle [54,55]: 5,6 kg/h; durchschnittliches Produktionsszenario: 25 kg/h) der gewichtsspezifische Energieverbrauch innerhalb des Prozessfensters liegt. Die hohe Abweichung des Literaturwerts zum durchschnittlichen Produktionsszenarios kann vermutlich auf den eingesetzten Anlagentyp (Literaturquelle [54,55]: Portalanlage; durchschnittliches Produktionsszenario: roboterbasiert), auf die niedrigere Legerate und den damit einhergehenden höheren Prozesszeiten sowie auf den Rovingtyp bzw. ein niedrigeres Flächengewicht zurückgeführt werden.

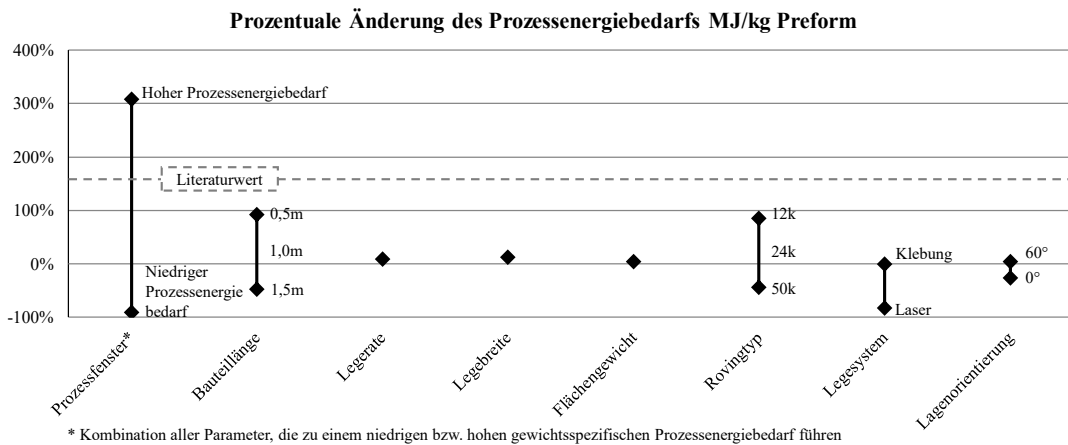


Abb. 4-8: Vergleich der Daten für das Automated-Fiber-Placement

IR-Heizung

Zur Aktivierung des Binders auf einem textilen Halbzeug, wurde der Leistungsbedarf eines IR-Strahlers für unterschiedliche Prozessparameter gemessen, welche im Anhang A-b in der Tab. A-7 zu finden sind. In Hohmann et al. [17] ist eine ausführliche Herleitung der Formel zur Berechnung des Leistungsbedarfs auf Basis der Messreihen zu finden. Dieser ist vom Abstand zwischen Preform und Strahler, der Strahler-Fläche, der Strahler-Temperatur und der Prozesszeit abhängig. Die ersten beiden Parameter sind im Energie- und Stoffstrommodell aufgrund des geringen Einfluss (vgl. Energieeffizienzanalyse [74]) auf 100 mm bzw. 6 m² fixiert. Die Strahler-Temperatur und die Prozesszeit können variiert werden. Die Umrechnung auf einen gewichtsspezifischen Energieverbrauch MJ pro kg erwärmte Preform, erfolgt dabei über die im Modell einzugebende Bauteildicke, -länge und -breite sowie dem Faservolumengehalt. Bei den Geometriedaten ist der Materialverschnitt der Folgeprozesse berücksichtigt, mögliche Änderungen aufgrund von Bauteilabwicklungen werden vernachlässigt.

Das Energie- und Stoffstrommodell ist nicht für die Bewertung von thermoplastischen Fertigungsprozessketten geeignet. Die maximale Strahler-Temperatur war bedingt

durch den Versuchsaufbau² auf 200 °C bei den Messreihen fixiert [100]. Thermoplastbasierte 2D Halbzeuge müssen vor der Umformung knapp über die Schmelztemperatur erwärmt werden, welche je nach Kunststoff höher als 200 °C ist. Hierfür wurde ein Datensatz aus der GaBi Datenbank herangezogen (vgl. Kapitel 4.1).

Hydraulische Presse

Unter Berücksichtigung der Literaturangaben, stehen für insgesamt acht hydraulische Pressen Leistungsdaten zur Verfügung. Eine Übersicht der wichtigsten Eckdaten sowie die für die Anlagenvermessung entsprechenden Versuchspläne sind im Anhang A-b in der Tab. A-8 und Tab. A-9 zu finden.

Die Auswertung aller Ergebnisse hat gezeigt, dass neben der Grundleistung zum Halten der Pressenkraft der zusätzliche Energiebedarf zum Schließen und Öffnen der Presse berücksichtigt werden muss. Diese macht mind. 15% am Gesamtverbrauch aus.

Eine Übersicht der Energie relevanten Kennzahlen ist in Abb. 4-9 dargestellt. Hierbei kann festgestellt werden, dass die Literaturwerte relativ gut mit den Messwerten übereinstimmen bzw. sich ein linearer Zusammenhang zwischen Pressenkraft und Leistungsbedarf ergibt. Lediglich der Literaturwert aus dem Jahr 1987 (38.000 kN Nennschließkraft) [59] weicht hiervon ab, was auf eine Effizienzsteigerung der aktuellen Anlagensysteme hindeutet. Auch ist der Literaturwert aus Bockelmann [58] geringfügig höher, was darauf zurückzuführen ist, dass es sich hierbei um die Anlagen-Nennleistung und nicht um den tatsächlichen Verbrauch handelt.

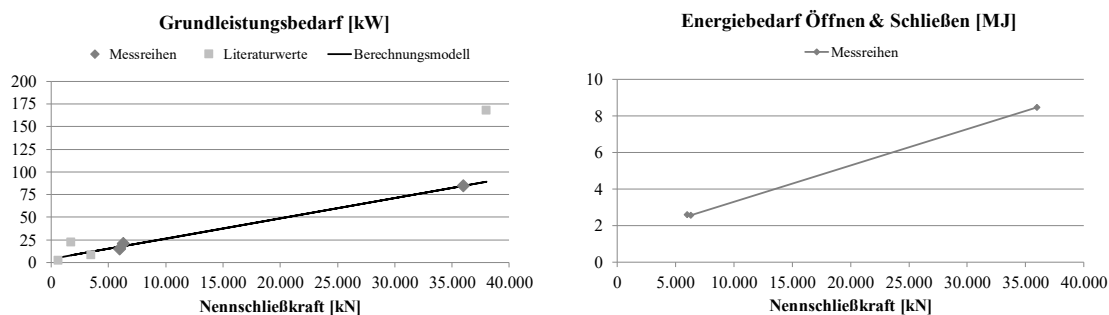


Abb. 4-9: Leistungsbedarf und Energieverbrauch hydraulischer Pressen

Im Ökobilanz-Modell wird zuerst anhand des einstellbaren Prozessdrucks p , der flächigen Pressenauslastung ur und der Bauteilfläche A die notwendige Nennschließkraft F bestimmt (vgl. Formel 4-1). Bei der Bauteillänge und -breite ist der Materialverschnitt der Folgeprozesse berücksichtigt, mögliche Geometrieänderungen aufgrund von Bauteilabwicklungen werden vernachlässigt.

$$F = \frac{p * A}{ur} \quad (4-2)$$

² Die eingesetzte Isolierung, um Wärmeverluste zu vermeiden, durfte max. auf 200 °C erwärmt werden.

Mithilfe der in Abb. 4-9 dargestellten Zusammenhänge kann bei bekannter Nennschließkraft der entsprechende Leistungsbedarf in der Zuhaltphase und der Energiebedarf beim Öffnen und Schließen berechnet werden. Unter Berücksichtigung der Prozesszeit inkl. der Entformungsdauer sowie der gepressten Bauteilmasse kann der gewichtsspezifische Prozessenergiebedarf bestimmt werden. Die Bauteilmasse wird dabei über die Bauteilfläche, -dicke und der Materialdichte berechnet.

Da der Datensatz für unterschiedliche Prozessschritte herangezogen wird, sind die Parameter Prozessdruck, -zeit, Pressenauslastung, Bauteildicke, -fläche und -dichte variabel einstellbar. Die Parameter können für die Umformung trockener Preforms bzw. thermoplastischer Halbzeuge und für den Imprägnier- und Aushärteprozess im übergeordneten Ökobilanz-Modell (vgl. Abb. 4-1) angepasst werden.

Ein Abgleich des Energie- und Stoffstrommodells mit den verfügbaren Literaturdaten von Das [18] (Literaturwert 1) und Suzuki [43] (Literaturwert 2) in Abb. 4-10 zeigt, dass beide Werte innerhalb des definierten Prozessfensters liegen. Beide Literaturquellen geben allerdings einen deutlich höheren gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf im Vergleich zum durchschnittlichen Produktionsszenario an. Eine mögliche Ursache hierfür können abweichende Produktionseinstellungen sein, da die Bauteildicke, die Prozesszeiten, der Prozessdruck und die Pressenauslastung einen signifikanten Einfluss auf den Energiebedarf haben. In Suzuki [43] werden diese nicht explizit genannt, so dass kein eindeutiger Vergleich möglich ist. Die Prozessparameter aus Das [18] (Prozesszeit 2,5 min; Bauteilfläche ca. 3,5m²; Bauteildicke ca. 5 mm) ergeben im Energie- und Stoffstrommodell allerdings einen viel geringeren Wert. Die Abweichung ist daher auf den unterschiedlichen Leistungsverbrauch der Presse zurückzuführen, welche vermutlich bei Das [18] der Anlagen-Nennleistung entspricht.

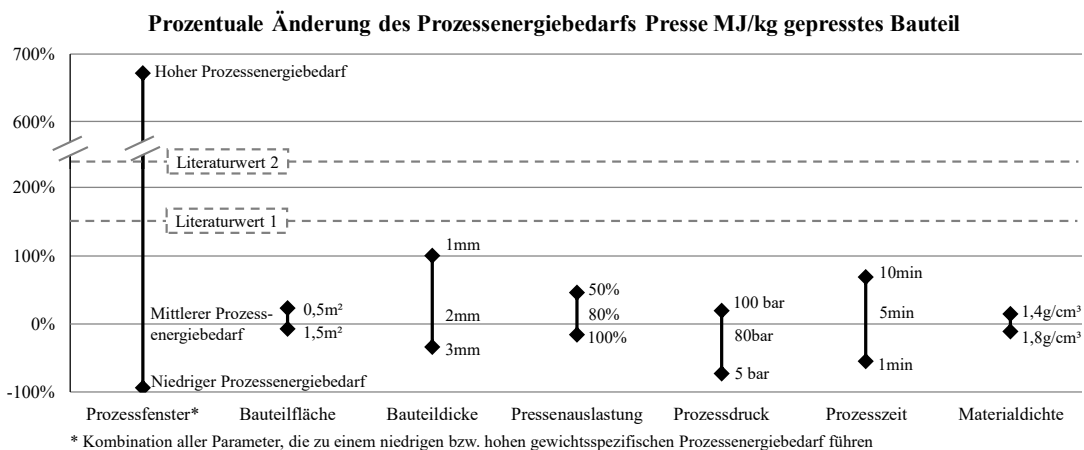


Abb. 4-10: Vergleich gewichtsspezifischer Energieverbrauch einer Presse

3D Zuschnitt

Das Trimmen der 3D Preform wird durch eine roboterbasierte Schneideinheit abgebildet. Für die Energie- und Stoffstrommodellierung wurden dabei zwei Annahmen getroffen. Zum einen hat der Roboter einen deutlichen höheren Leistungsbedarf als die Schneideinheit, so dass letztere vernachlässigt werden kann. Zum anderen wird aufgrund des geringen Gewichts der Schneideinheit, der Energieverbrauch eines Roboters mit geringer Traglast (KR 180 L130-2) verwendet. Der hierfür gemessene Leistungsbedarf in Abhängigkeit der Prozessgeschwindigkeit ist in Hohmann et al. [17] dokumentiert. Basierend auf diesen Werten, wird der Energiebedarf mithilfe der Schnittlänge und der Prozessgeschwindigkeit, welche im Energie- und Stoffstrommodell auf 10 m/min fixiert ist, berechnet. Die Umrechnung auf einen gewichtsspezifischen Energieverbrauch erfolgt über die Bauteilfläche, -dicke und den Faservolumengehalt sowie der Faserdichte.

Vakuumpumpe

In den Versuchsreihen wurde der Energieverbrauch von fünf unterschiedlichen Vakuumpumpen für einen definierten Zeitraum gemessen [102]. Wie in Abb. 4-11 links dargestellt, ist der Prozessenergiebedarf im Wesentlichen vom Saugvermögen der Vakuumpumpe abhängig. Es ergibt sich ein nahezu linearer Zusammenhang zur Prozesszeit, d.h. bei Vernachlässigung der Anlaufphase weisen die Vakuumpumpen einen konstanten Leistungsbedarf auf. Weiterhin war kein signifikanter Zusammenhang zwischen Differenzdruck und Energiebedarf erkennbar. Beim Energie- und Stoffstrommodell wird darüber hinaus davon ausgegangen, dass der Energiebedarf unabhängig von der Bauteilgeometrie ist. Der gewichtsspezifische Energiebedarf ist daher vom Saugvermögen, von der Prozesszeit und der vakuumierenden Masse abhängig.

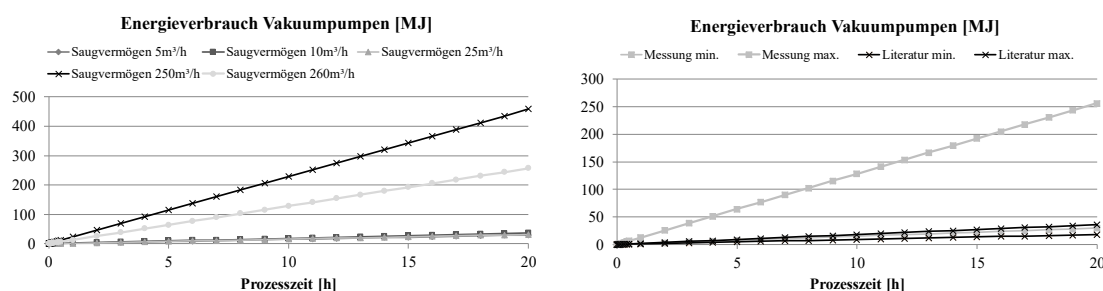


Abb. 4-11: Energieverbrauch der Vakuumpumpe in Abhängigkeit der Prozesszeit – Messwerte links und Vergleich mit Literaturdaten rechts

Auch für Hilfsprozesse, wie das Vakuumziehen, sind Literaturdaten verfügbar. Bei der Vakuumpumpe befinden sich diese im unteren Bereich der Messwerte (vgl. Abb. 4-11 rechts), was vermutlich auf das geringe Saugvermögen der Laborpumpen in den Literaturdaten zurückzuführen ist.

Hochdruckinjektionsanlage

Die zwei vermessenen Hochdruckinjektionsanlagen waren hinsichtlich des maximalen Betriebsdrucks, des Fassungsvermögens für das Harzsystem sowie der maximal möglichen Austragsmenge sehr ähnlich, so dass bei den Versuchsreihen keine relevanten Unterschiede festgestellt werden konnten (vgl. Anhang A-b Tab. A-2 und Tab. A-3). Auch der eingestellte Injektionsdruck hat auf den Leistungsbedarf der Injektionsanlage einen vernachlässigbaren Einfluss. Vielmehr sind, wie in Abb. 4-12 ersichtlich, die Temperierung des Harzsystems und der Injektionsvorgang selbst für den Leistungsbedarf relevant. Hierbei muss berücksichtigt werden, dass in einem Serienprozess, die Injektionsanlage über den vollständigen Härtungsprozess in Betrieb ist (Grundleistung), aber nur bei der direkten Einspritzung einen höheren Leistungsbedarf aufweist. Für die Berechnung des gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarfs sind daher neben der Bauteilgeometrie bzw. -gewicht, auch die Prozesszeiten notwendig. Letzteres wird über die im Energie- und Stoffstrommodell variable durchschnittliche Austragsmenge, Aushärtezeit, Prozessdruck- bzw. Pressenkraft abhängige Öffnungs- und Schließzeit der Presse und Entformungszeit berechnet.

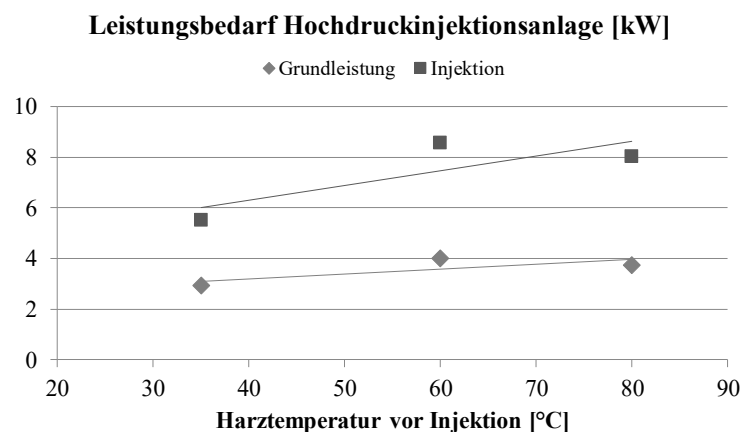


Abb. 4-12: Leistungsbedarf Hochdruckinjektionsanlage

Weiterhin wurden die Messergebnisse mit verfügbaren Literaturdaten verglichen, wobei alle Angaben in Abb. 4-13 auf den maximal gemessenen Wert normiert sind. In Bockelmann [58] (Literaturwert 1 und 2 in Abb. 4-13 links) wurde die Nennleistung einer Nieder- und Hochdruckinjektionsanlage veröffentlicht, welche üblicherweise höher als der reale Verbrauch ist (vgl. Abb. 4-13 links). Bei der Gegenüberstellung des in Nothdurft [56] angegebenen Verbrauchswert (vgl. Abb. 4-13 rechts) ist zu erkennen, dass dieser im Vergleich zu den Messergebnissen sehr niedrig ist. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass bei Nothdurft eine Niederdruckinjektionsanlage eingesetzt wurde, die im Vergleich zu einer Hochdruckinjektionsanlage einen viel geringeren Leistungsbedarf aufweist.

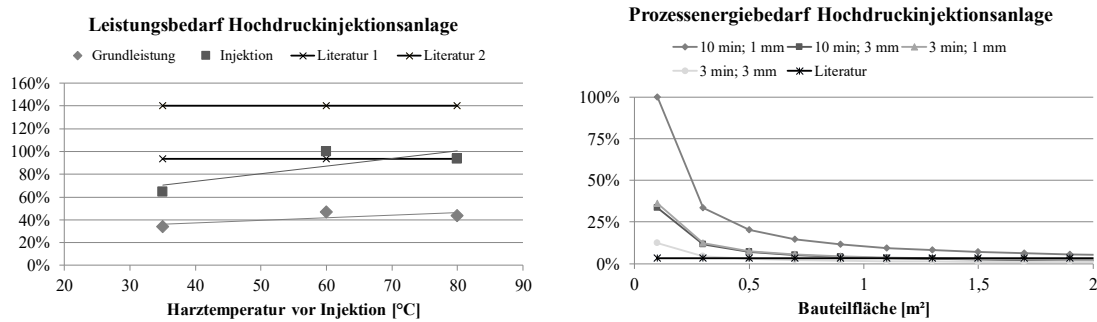


Abb. 4-13: Vergleich der Leistung und des gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf von Injektionsanlagen

Eigenbeheiztes Werkzeug

Bei den eigenbeheizten Werkzeugen muss zwischen dem Energiebedarf zum Heizen des Werkzeuges auf die Zieltemperatur und den Leistungsbedarf zum Halten dieser unterschieden werden. Für beide Verbrauchsarten wurde anhand von Messdaten ein Energie- und Stoffstrommodell entwickelt, welches in Abhängigkeit der Zieltemperatur und der Werkzeugmasse die Bestimmung des Energie- bzw. Leistungsbedarfs ermöglicht.

Obwohl für fünf Werkzeuge Daten erhoben wurden, konnten für die Erstellung des Berechnungsmodells nur zwei Datensätze für die Heizphase (Wzg. 1 und 2) und drei für die Haltephase (Wzg. 1 bis 3) verwendet werden. Grund hierfür ist u.a., dass Werkzeug 4 und 5 eine andere Beheizungsart aufweisen (vgl. Tab. 4-2).

Tab. 4-2: Übersicht der vermessenen Werkzeuge

Werkzeug	1	2	3	4	5
Grundmaße [mm x mm x mm]	500 x 900 x 180	1140 x 1020 x 430	1200 x 1150 x 400	700 x 500 x 210	1200 x 670 x 215
Fläche [m²]	0,16	0,6	1,0	0,24	0,39
Gewicht [t]	1,15	ca. 6,0	4,33	1,55	3,0
Wärmeübertragung	Wasser	Wasser	Wasser	Wasser	Öl
Beheizungsart	eigenbeheizt	eigenbeheizt	eigenbeheizt	Heizplatten	Heizplatten
Material	Stahl	Stahl	Stahl	Stahl	Stahl
Isolationsschicht zur Presse /seitliche Isolation	Ja / Nein	Ja / Ja	Ja / Ja	Ja / Nein	Ja / Nein

In Abb. 4-14 links sind die für das Energie- und Stoffstrommodell relevanten Kennlinien bzw. Messdaten³ zur Berechnung des Energiebedarfs des Werkzeuges in der Heizphase dargestellt. Sofern Aushärtetemperatur und Werkzeugmasse bekannt ist, kann über die

³ Für Werkzeug 3 und 5 war es nicht möglich in der Heizphase den Energieverbrauch zu messen.

Kennlinien der Energiebedarf bestimmt werden. Im Modell wurde die Annahme getroffen, dass das Werkzeug nur einmal am Tag vor Schichtbeginn auf die Aushärtetemperatur aufgeheizt werden muss. Der Energiebedarf wird daher anteilig pro Bauteil in Abhängigkeit der gefertigten Menge pro Tag berücksichtigt.

In Abb. 4-14 rechts sind die Ergebnisse der Modellvalidierung dargestellt. Das Werkzeug 4 wird nur indirekt über wasserbeheizte Heizplatten erwärmt, was zu einer Abweichung des Energie- und Stoffstrommodells von bis zu 40% führt. Das Modell kann daher nur den Energiebedarf von Stahlwerkzeugen ermitteln die direkt mit Wasser temperiert werden. Die Abweichung der Berechnung ist hierfür kleiner 10%.

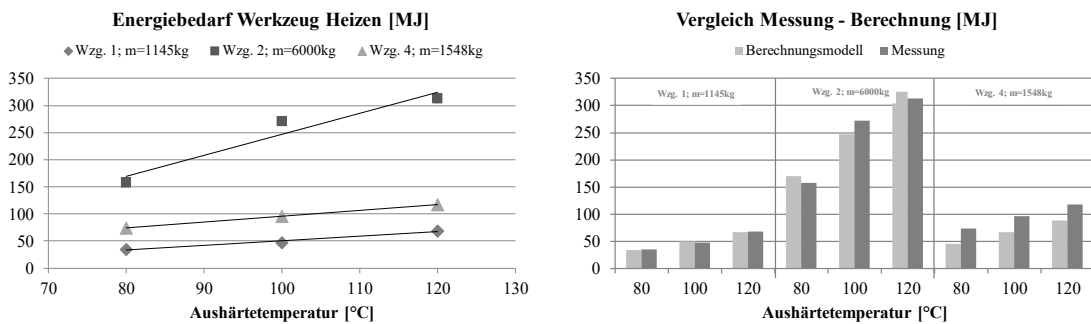


Abb. 4-14: Energiebedarf zum Erwärmen von Werkzeugen (links) sowie die Validierung des Modells (rechts)

Der Leistungsbedarf für das Halten der Werkzeugtemperatur ist in Abb. 4-15 links dargestellt. Auch hier kann anhand der Kennlinien der Leistungsbedarf in Abhängigkeit der Werkzeugmasse und Aushärtetemperatur bestimmt werden. Wird dieser mit der Aushärtezeit multipliziert ergibt sich der notwendige Energiebedarf.

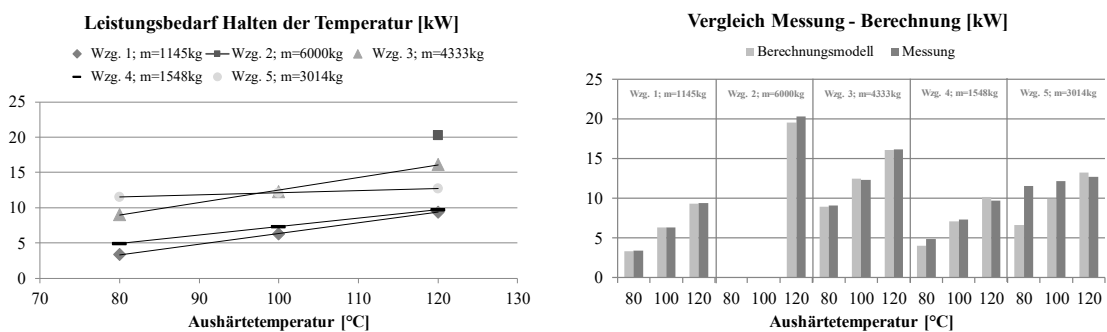


Abb. 4-15: Leistungsbedarf zum Halten der Werkzeugtemperatur (links) sowie die Validierung des Modells (rechts)

Beim Vergleich der berechneten Werte mit den Messergebnissen in Abb. 4-15 rechts ist ersichtlich, dass das Modell auch bei einer indirekten Beheizung über Heizplatten (Werkzeug 4) ähnliche Werte ermittelt. Für dieses und die direkt beheizten Werkzeuge (Werkzeug 1 bis 3) konnte eine Abweichung des Modells von den Messungen kleiner 5% festgestellt werden. Öl-beheizte Werkzeuge (Werkzeug 5) weichen insbesondere für niedrige Temperaturen signifikant davon ab.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass der Energieverbrauch für das Heizen der Werkzeuge und zum Halten der Temperatur von der Werkzeugmasse, der Aushärtetemperatur und -zeit abhängig ist. Es wird davon ausgegangen, dass sich bei einem größeren Bauteil die Werkzeugmasse geringfügig verändert, dies aber nicht proportional zur Bauteilfläche erfolgt. Bei einer Änderung der Bauteildicke ist keine Änderung des Prozessenergiebedarfs bei gleicher Aushärtetemperatur, -zeit und Werkzeugmasse zu erwarten. Bei der Umrechnung in einen gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf muss daher eine auf die Bauteilfläche angepasste Werkzeugmasse und das in einem Zyklus ausgehärtete Bauteilgewicht berücksichtigt werden.

In der Literatur sind keine Werte für den Energieverbrauch von eigenbeheizten Werkzeugen zu finden, Suzuki [43] hat aber einen Datensatz für das RTM-Verfahren veröffentlicht, der für einen Vergleich herangezogen werden kann. In der in Abb. 4-16 dargestellten Energieeffizienzanalyse, wurden dafür die Energie- und Stoffstrommodelle der hydraulischen Presse, der Hochdruckinjektionsanlage, der Vakuumpumpe und des eigenbeheizten Werkzeugs miteinander kombiniert (vgl. Abb. 4-1). Es ist zu erkennen, dass der gewichtsspezifische Prozessenergiebedarf für ein durchschnittliches Produktionsszenario im Vergleich zu dem veröffentlichten Datensatz von Suzuki [43] einen niedrigeren Wert ergibt. Unter welchen Randbedingungen die Literaturdaten erhoben wurden, ist nicht bekannt. Da der Literaturwert aber innerhalb des Prozessfensters liegt, ist davon auszugehen, dass bei Suzuki andere Produktionsrandbedingungen gewählt worden sind.

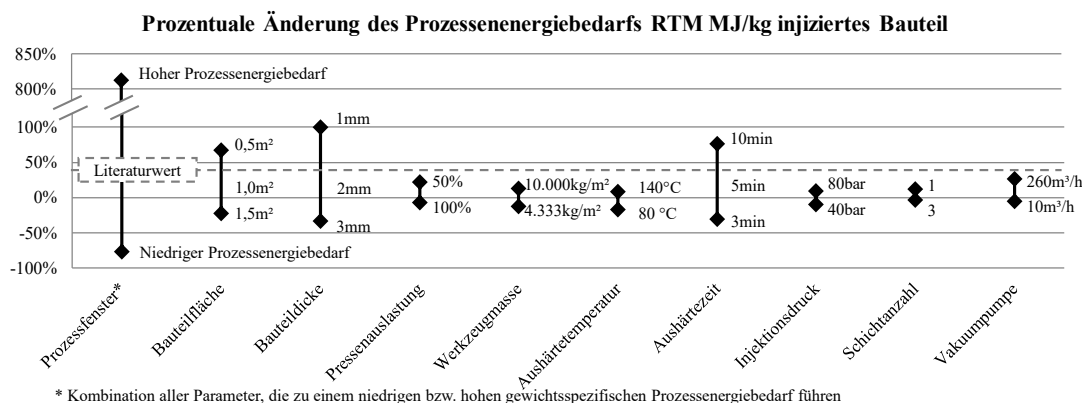


Abb. 4-16: Vergleich gewichtsspezifischer Energieverbrauch RTM

Im EU-Projekt RECIPE [60] wurden u.a. Daten für das Thermoformen erhoben. In der Energieeffizienzanalyse in Abb. 4-17 wurden daher die Energie- und Stoffstrommodelle der IR-Heizung, der hydraulischen Presse und des eigenbeheizten Werkzeugs miteinander kombiniert (vgl. Abb. 4-1). Ein Vergleich mit den Messdaten zeigt, dass der durchschnittliche Datensatz innerhalb des Prozessfensters liegt, aber einen um ca. 50% höheren Verbrauch aufweist als das bei der Energieeffizienzanalyse definierte durchschnittliche Produktionsszenario. Gründe hierfür können u.a. andere Kunststoffmaterialien,

Bauteilflächen und -dicken sein. Die berücksichtigten Produktionsparameter und Verbraucher für den entsprechenden Datensatz in RECIPE [60] sind nicht veröffentlicht.

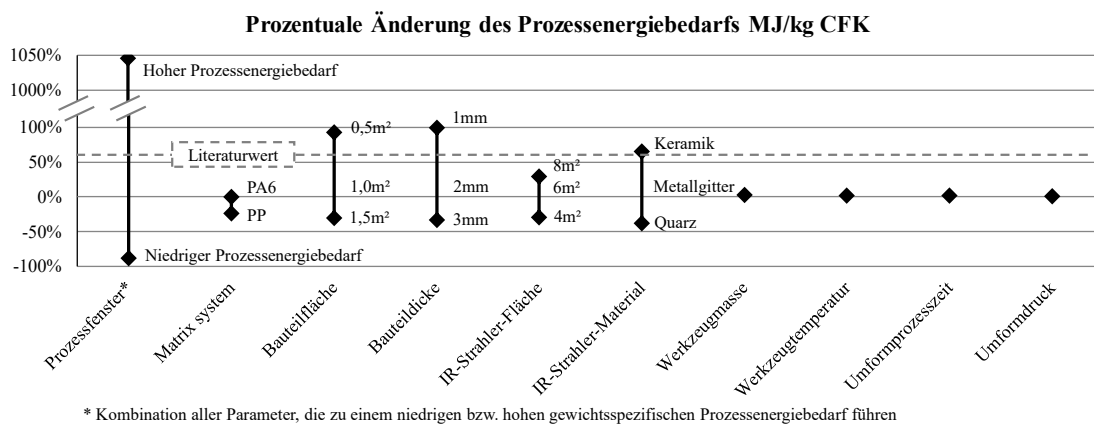


Abb. 4-17: Vergleich der Daten für das Thermoformen

Zweistufige Intervall Heißpresse

Eine zweistufige Intervall Heißpresse⁴ wird an mehreren Stellen der thermoplastischen Fertigungsprozesskette eingesetzt. Zum einen wird diese Technologie für die Modellierung der Faserhalbzeugherstellung (Organoblech, Thermoplast-Tape) herangezogen. Zum anderen erfolgt die Konsolidierung der, mit dem ATL-Verfahren hergestellten, Platten mit einer zweistufigen Intervall Heißpresse. Zur Erfassung des Energieverbrauchs wurden zwei variotherme Pressen bei verschiedenen Temperaturen und Schließkräften vermessen. Anhand der Leistungskurven wurde der Energiebedarf für eine zweistufige Intervall Heißpresse berechnet. Der Energiebedarf zum Heizen auf die Heizzonentemperaturen wird dabei nur einmalig pro Produktionstag berücksichtigt. Der Energiebedarf zum Halten der entsprechenden Temperaturen wird anhand der Leistungskurve in der Haltephase der variothermen Presse und mithilfe der Prozesszeit bestimmt. Um eine gewisse Belastbarkeit des Datensatzes zu gewährleisten, wurden zwei unterschiedliche Anlagentypen (elektrisch und öl-beheizt) analysiert.

Sowohl bei der elektrisch-beheizten als auch bei der öl-beheizten variothermen Presse stellt die Temperierung den größten Verbraucher dar. Bei beiden Anlagen sind der Energiebedarf zum Aufheizen der Presse sowie der Leistungsbedarf zum Halten der Pressentemperatur linear abhängig von dieser. Bei der öl-beheizten Presse wurden zusätzlich zwei verschiedene Presswerkzeuge (Transferblech und Plattenwerkzeug) mit unterschiedlichen Dicken vermessen. Hierbei waren keine relevanten Unterschiede hinsichtlich des Leistungs- und Energiebedarfs zu erkennen (vgl. Abb. 4-18). Eine Sensitivitätsanalyse ergab darüber hinaus, dass der einmalige Aufwand zum Heizen der Presse auf

⁴ hintereinander geschaltete Presse mit zwei unterschiedlichen isothermen Temperatur- und isobaren Druckstufen bzw. -zonen

die Zieltemperatur vor Schichtbeginn anteilig mitberücksichtigt werden muss. Dieser entspricht 3,3% (80 °C) bis 10% (280 °C) des Gesamtverbrauchs.

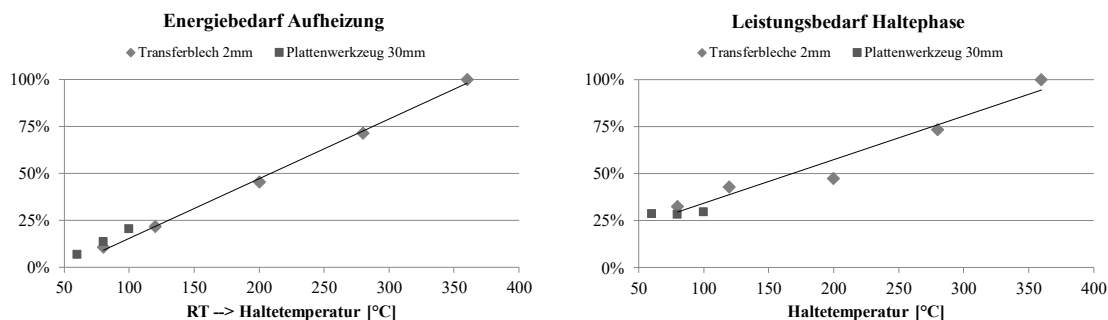


Abb. 4-18: Energie- und Leistungsbedarf einer öl-beheizten variothermen Presse

Ein Vergleich der beiden Pressentypen hat weiterhin gezeigt, dass die öl-beheizte Variante trotz geringerer Pressenkraft und Nutzfläche einen deutlich höheren Energie- bzw. Leistungsbedarf aufweist (vgl. Abb. 4-19). Im Ökobilanz-Modell kann daher zwischen diesen beiden Beheizungsarten unterschieden werden.

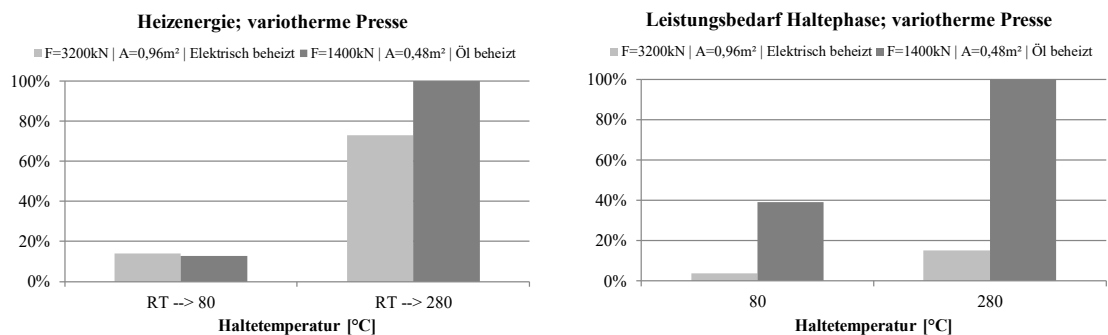


Abb. 4-19: Heizenergie und Leistungsbedarf in der isothermen Prozessphase für variotherme Pressen

Im Gegensatz zu hydraulischen Pressen wurde bei der variothermen Presse für jeden Pressentyp nur eine Presse mit einer definierten Nutzfläche und Nennschließkraft vermessen. Daher kann derzeit kein Zusammenhang zwischen Nennschließkraft bzw. Nutzfläche und Energieverbrauch hergestellt werden. Für das Energie- und Stoffstrommodell hat dies zur Folge, dass die Berechnung unabhängig von der einzugebenden Bauteilfläche erfolgt. Vielmehr legen der Prozessdruck und die Pressenauslastung fest, wieviel Bauteilfläche mit dem jeweiligen Pressentyp gefertigt werden kann (vgl. Formel (4-2)). Die Umrechnung auf einen gewichtsspezifischen Energieverbrauch erfolgt dann unter Berücksichtigung der Tape- bzw. Bauteildicke und der Materialdichte. Im Energie- und Stoffstrommodell kann weiterhin die Prozesszeit beider Zonen und der Prozessdruck für die Organoblechherstellung variiert werden, die Prozessstemperatur ist sofern PA6 als Matrixsystem ausgewählt wird auf 280 °C in Zone 1 und 80 °C in Zone 2 und bei PP auf 205 und 50 °C fixiert. Bei der Tapeherstellung ist hingegen neben der Aushärtetemperatur auch die Prozesszeit und der Druck definiert. Aufgrund der deutlich geringeren

zu verpressenden Materialdicken wird davon ausgegangen, dass bei der Imprägnierung ein Prozessdruck unabhängig vom Matrixsystem von 1 bar und bei der Abkühlung von 10 bar notwendig ist. Die Prozesszeiten beider Zonen wurden so festgelegt, dass bei der Fertigung eines carbonfaserverstärkten Tapes, welches eine mittlere Dicke von 0,16 mm aufweist, genauso viel Energie pro kg Material verbraucht wird, wie bei der Herstellung eines 2 mm dicken Organoblechs. Im Gegensatz zur Organoblechdicke kann diese aber im Energie- und Stoffstrommodell nur geringfügig über das Tapeflächengewicht variiert werden. Der gewichtsspezifische Prozessenergiebedarf bei der Organoblechherstellung ist daher mit einer größeren Schwankungsbreite als bei der Tapeherstellung verbunden. Die Heizenergie wird anteilig auf die an einem Tag herstellbare Masse umgerechnet.

Slitter

Der Energieverbrauch des Tapezuschnitts wurde für Schnittgeschwindigkeiten von 3 bis 20 m/min gemessen, wobei das geschnittene Material am Ende sowohl aufgespult als auch aufgewickelt (Kreuzwicklung) wurde [102]. Letzteres hat kaum einen Einfluss auf den Energiebedarf. Der gewichtsspezifische Energiebedarf ist hauptsächlich von der Schnittgeschwindigkeit, der Rollenbreite, der Materialdicke und -dichte abhängig. Während die Materialdicke über das variable Flächengewicht im Modell berechnet wird, ist die Geschwindigkeit auf 17 m/min und die Rollenbreite auf 300 mm fixiert. Beide Werte entsprechen einem durchschnittlichen Produktionsszenario. Die Ergebnisse der Energieeffizienzanalyse sind in Hohmann et al. [74] veröffentlicht.

Thermoplastisches Tapelegen (TP-ATL)

In Hohmann et al. [17] konnte gezeigt werden, dass das Gebläse zur Fixierung der Lagen auf dem Legetisch sowie die Anlagengrundleistung die Hauptenergieverbraucher des ATL-Prozesses darstellen. Der Verbrauch des Linear- und Rotationsmotors des Tisches, der Greiferbewegung und der Ultraschallschweißgeneratoren sind entweder aufgrund des niedrigen Leistungsbedarfs oder aufgrund der kurzen aktiven Betriebsdauer im Prozess vernachlässigbar [103]. Der Leistungsbedarf ist daher hauptsächlich von der Anzahl der aktiven Gebläse, die über die entsprechende Bauteilfläche definiert wird, abhängig. Zur Berechnung des gewichtsspezifischen Prozessenergieverbrauchs ist darüber hinaus die Legerate entscheidend. Im Gegensatz zum DFP konnte hierfür eine Korrelation zur Tapelänge durch die Ablage unterschiedlicher Plattengrößen hergestellt werden. In Abb. 4-20 links ist zu erkennen, wie die Ablagerate aufgrund von Beschleunigungs- und Abbremsseffekte, mit der Tapelänge korreliert.

Zusammenfassend haben folgende Produktions- und Prozessrandbedingungen einen relevanten Einfluss auf den gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf:

- Die Bauteilgröße legt fest, wieviel Sauggebläse im Betrieb sind
- Die mittlere durchschnittliche Tapelänge ist entscheidend für die erreichte Legegeschwindigkeit

- Die Tapebreite und -dicke legt fest, wieviel Material mit einer Tapelänge abgelegt werden kann

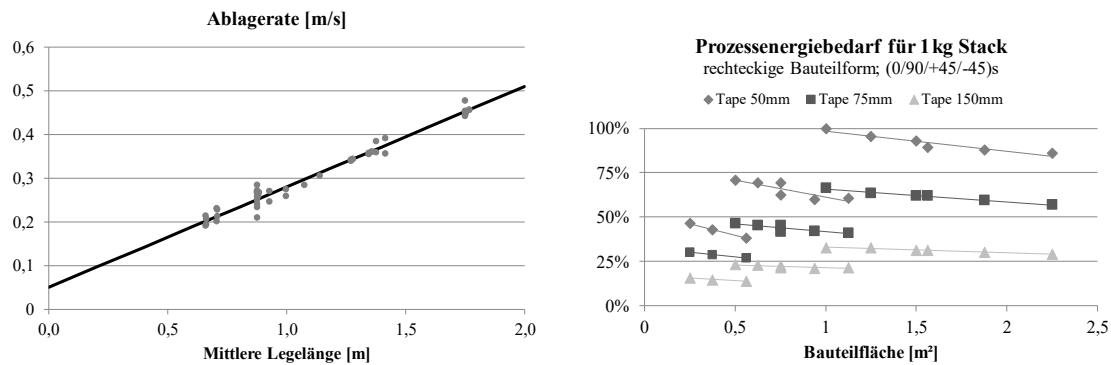


Abb. 4-20: Ablagerate in Abhängigkeit der mittleren Tapelänge (links), gewichtsspezifischer Prozessenergiebedarf (rechts)

Die Interaktion dieser drei Faktoren hinsichtlich des Prozessenergiebedarfs für die Ablage von 1 kg Material ist der Abb. 4-20 rechts zu entnehmen, wobei alle Angaben auf den maximalen Energiebedarf normiert sind. Der Leistungssprung innerhalb einer Tapebreite ist mit dem Erreichen einer kritischen Bauteilfläche und dem damit einhergehenden Zuschalten eines weiteren Sauggebläses zu begründen.

Für einen Vergleich der gemessenen und in der Literatur verfügbaren Werte, werden sowohl die Legeraten als auch die Energieverbrauchsdaten gegenübergestellt.

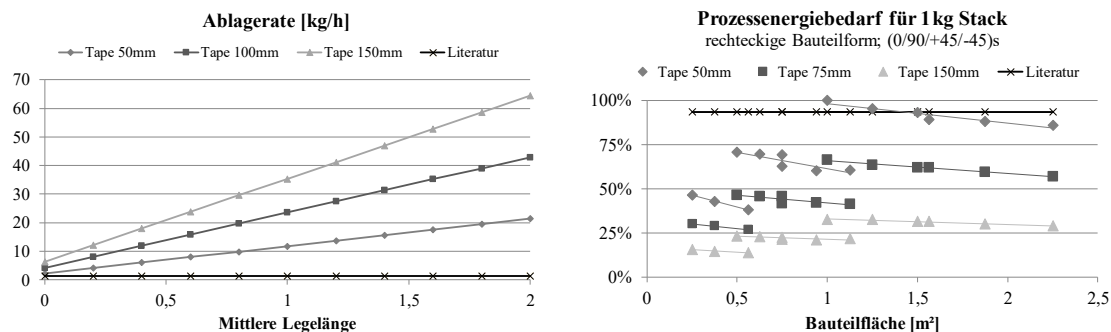


Abb. 4-21: Vergleich Ablagerate und gewichtsspezifischer Prozessenergiebedarf mit den verfügbaren Literaturwerten beim thermoplastischen Tapelgen

In Abb. 4-21 links ist zu erkennen, dass die in der Literatur [45] angegebene Ablagerate im Vergleich zu den eigenen Messwerten sehr gering ist. Hierbei ist auch zu erkennen, dass bei den eigenen Versuchen die Ablagerate signifikant von der Tapebreite und der abzulegenden Bauteilfläche abhängig ist. Weitere beeinflussende Größen wie die Materialdicke (0,16 mm) und die Materialdichte ($1,46 \text{ g/cm}^3$) wurden nicht variiert. In der Literaturquelle wird keiner dieser Randbedingungen genannt, so dass zu vermuten ist, dass eine geringere Tapebreite und niedrigere Tapelänge gewählt worden ist. Diese führt, wie in Abb. 4-21 rechts dargestellt, zu einem durchschnittlich höheren Prozessenergiebedarf als bei der vermessenen Anlage. In diesem Kontext muss aber erwähnt

werden, dass es sich bei Lindner et al. [45] um ein roboterbasiertes Ablagesystem mit einer Laseraktivierung handelt. Ein direkter Vergleich mit einem Gantry-System und einer punktuellen Verschweißung der Lagen ist daher nicht möglich.

Schlagschere

Für den Zuschnitt der faserverstärkten Thermoplast-Platten vor der Umformung ist im Ökobilanz-Modell eine Schlagschere berücksichtigt (vgl. Abb. 4-1). Bei der Energie- und Druckluftverbrauchsmessung wurden sowohl die Plattendicke (0,5 bis 2 mm) und die Schnittlänge (8 bis 50 cm) variiert. Es konnten keine Zusammenhänge zwischen diesen Parametern und dem Energiebedarf festgestellt werden [102]. Der Verbrauch ist daher nur von der Schnittanzahl abhängig, die im Modell auf vier Schnitte fixiert ist. Die Umrechnung auf einen gewichtsspezifischen Energieverbrauch erfolgt unter Berücksichtigung der Bauteilfläche, der Bauteildicke und der Materialdichte.

4.4 Übersicht des Ökobilanz-Modells

Für die systematische Analyse der Umweltwirkungen wurden die in Abb. 4-1 dargestellten Bausteine und die dazugehörigen parametrisierten Energie- und Stoffstrommodelle in ein übergeordnetes Ökobilanz-Modell mithilfe der Ökobilanz GaBi ts Software Version 8.1.0.29 überführt. In Abb. 4-22 ist zu erkennen, dass das Modell die Herstellung mehrerer Subpreforms ermöglicht, die vor der Imprägnierung und Aushärtung bzw. dem thermoplastischen Umformen in ein gemeinsames Werkzeug eingelegt werden. Hierdurch kann eine Kombination von unterschiedlichen Preformverfahren, wie beispielsweise die lokale Verstärkung von textilen Halbzeugen mithilfe des DFP, flexibel modelliert werden. Die entsprechenden Massenverhältnisse können dabei variabel für die Subpreforms eingestellt werden. Nachfolgend wird auf die Modellierung der einzelnen Elemente (Carbonfaserherstellung, Matrixauswahl, etc.) der Abb. 4-22 eingegangen.

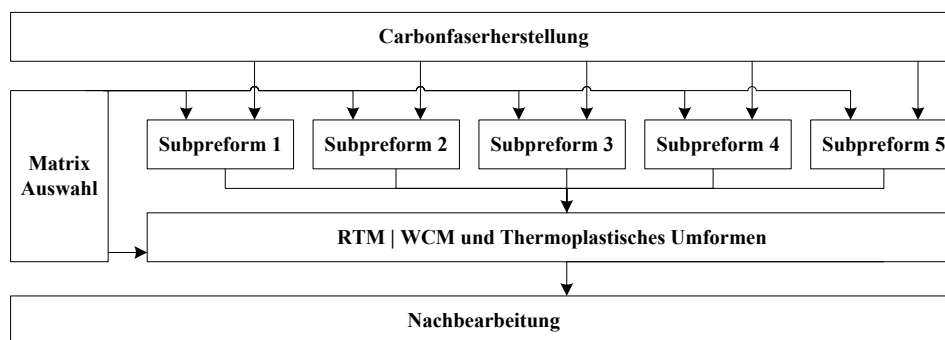


Abb. 4-22: Schematischer Aufbau des übergeordneten Ökobilanz-Modells

Die Modellierung der Carbonfaserherstellung ist im Detail in der Abb. 4-23 dargestellt. Das im Kapitel 4.2.1 vorgestellte Energie- und Stoffstrommodell der Faserherstellung

ist mit den in der GaBi Datenbank verfügbaren Hintergrunddatensätzen für die Energiebereitstellung, die Kraftstoffherstellung für den Transport sowie der hieraus entstehenden Emissionen, die Elektrolyt-, Schlichte- und Stickstoffherstellung und das Prozesswasser verbunden. Die Hintergrunddatensätze werden dabei passend zum definierten Produktionsstandort und der festgelegten Energiequelle ausgewählt. Die exakte Bezeichnung der Datensätze kann dem Anhang A-a entnommen werden. Die entsprechenden Stoffmengen, Transportwege und die bei der Carbonfaserherstellung freigesetzten Emissionen sind dem Kapitel 4.2.1 zu entnehmen. In der Carbonfaserherstellung können die im Kapitel 4.2.1 definierten Produktionsparameter variiert werden.

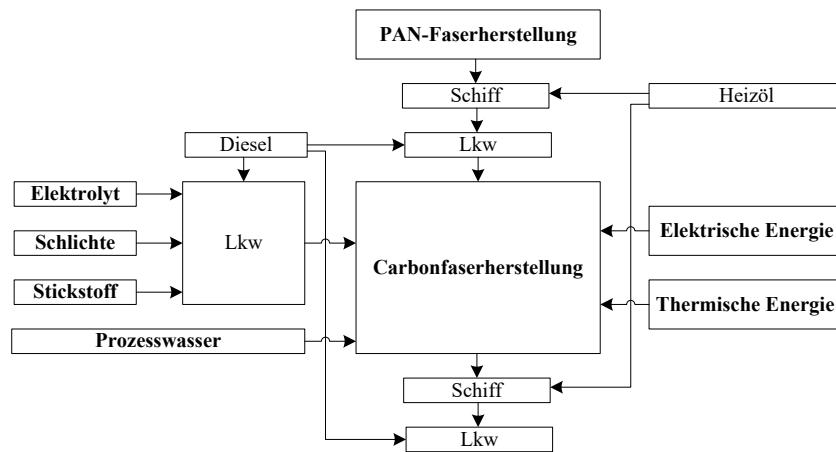


Abb. 4-23: Detailmodell Carbonfaserherstellung

Die Matrixherstellung wird separat modelliert, wobei wie in Kapitel 4.1.1 beschrieben zwischen fünf unterschiedlichen Kunststoffmaterialien ausgewählt werden kann. Diese sind mit den entsprechenden Datensätzen in der GaBi Datenbank (vgl. Anhang A-a) verknüpft. Die für den ausgewählten Matrixtyp passende Materialdichte muss separat in die Prozessvariablenliste eingetragen werden. Hierdurch kann mithilfe des einstellbaren Faservolumengehalts, zum einen der notwendige Matrixbedarf für die Herstellung von 1 kg CFK-Bauteil berechnet werden. Zum anderen wird bei vielen Energie- und Stoffstrommodellen der Fertigungstechnologien, die Materialdichte benötigt, um anhand der Bauteilgeometrie einen gewichtsspezifischen Energiebedarf zu ermitteln.

Für die Modellierung der Subpreformherstellung wurden die in den vorangegangenen Abschnitten vorgestellten Energie- und Stoffstrommodelle entlang der Fertigungskette miteinander verknüpft. Die im übergeordneten Ökobilanz-Modell dargestellten fünf Subpreform Elemente sind dabei alle Baugleich und sind im Detail in Abb. 4-24 dargestellt.

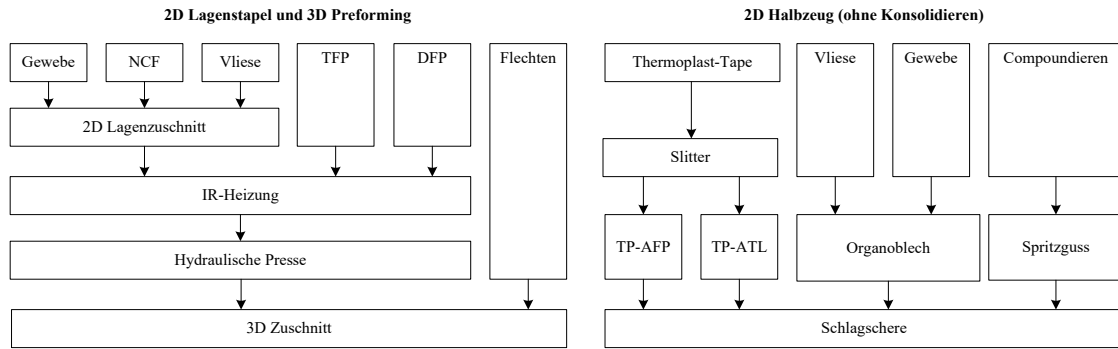


Abb. 4-24: Detailmodell Subpreformherstellung für faserverstärkte Duroplaste (links) und Thermoplaste (rechts)

Neben den für diese Arbeit relevanten Fertigungsprozessen, wurden auch noch andere Technologien, die in Hohmann et al. [74] analysiert worden sind, wie beispielsweise das TFP-Verfahren [69,70], in das Modell integriert. Bei der Bilanzierung kann über einen Parameter das entsprechende Preforming Verfahren, passend zum zuvor definierten Matrixsystem, ausgewählt werden. Viele der Energie- und Stoffstrommodelle der einzelnen Bausteine weisen weiterhin gleiche Prozessvariablen auf. Beispielsweise wird die Verschnitttrate einerseits bei den Schneidprozessen (2D Lagenzuschnitt und 3D Zuschnitt, Slitter, Schlagschere) benötigt, um die Stoffmengen berechnen zu können. Andererseits hat diese einen Einfluss auf die zu verarbeitende Fläche des Zwischenprodukts, was bei vielen Bausteinen einen Einfluss auf den gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf hat. Diese Parameter werden übergeordnet definiert, so dass sichergestellt ist, dass alle Energie- und Stoffstrommodelle die gleichen Produktionseinstellungen verwenden.

Die anschließenden Folgeprozessschritte müssen durch den Anwender passend zum Matrixsystem ausgewählt werden.

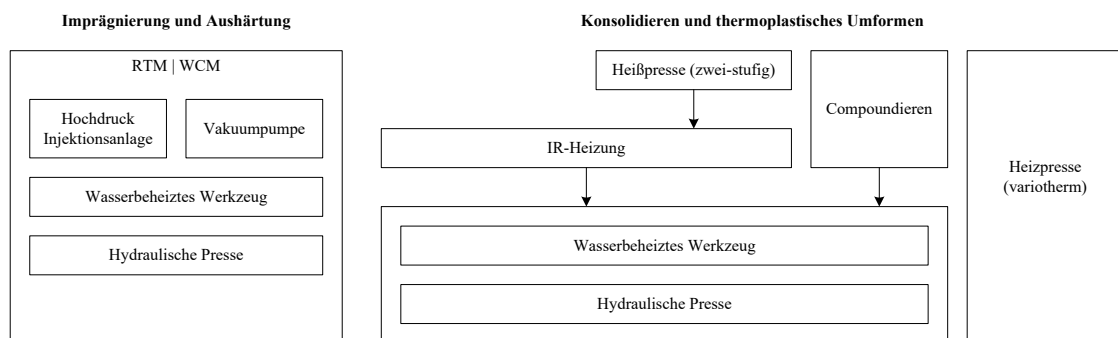


Abb. 4-25: Detailansicht Imprägnierung und Aushärtung sowie Konsolidierung und thermoplastisches Umformen

Für duroplastische LCM-Verfahren kann das RTM- und WCM-Verfahren bilanziert werden. Bei letzterem entfallen bei der Modellierung der Subpreformherstellung in Abb. 4-24, die Prozessschritte Binderaktivierung mittels IR-Heizung und die Umformung durch eine hydraulische Presse. Für die Injektion und Aushärtung wurden die gleichen

Bausteine miteinander verküpft. Bei der Verarbeitung von faserverstärkten thermoplastischen 2D Halbzeugen kann zwischen mehreren Prozessketten unterschieden werden. Beispielsweise kann eine Konsolidierung vor der Umformung erfolgen, was beim thermoplastischen Tapelegen normalerweise üblich ist. Auch ist ein Hinterspritzen der Stacks während dem Umformen möglich. Hierfür wird vor dem Umformen ein Compoundierungsprozess mithilfe eines GaBi Datensatzes, der dem Anhang A-a zu entnehmen ist, modelliert.

Als finaler Prozessschritt ist die Nachbearbeitung durch einen Fräsprozess berücksichtigt, wobei die in Kapitel 4.2.2 beschriebenen Parameter variiert werden können.

4.5 Zusammenfassung der Modellierung

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass für die ökobilanzielle Bewertung der vier fokussierten Prozessketten alle relevanten Energie- und Stoffflüsse verfügbar sind. Die Messung des Energieverbrauchs für unterschiedliche Produktionsrandbedingungen und Anlagentechnologien ermöglicht darüberhinaus eine systematische Analyse des Prozessenergiebedarfs. Die Ergebnisse können der Veröffentlichung Hohmann et al. [74] entnommen werden. Viele der in der Literatur verfügbaren Verbrauchsdaten liegen innerhalb des ermittelten Wertebereichs des gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarfs. Das für die Energieeffizienzanalyse in Hohmann et al. [74] definierte durchschnittliche Produktionsszenario weist allerdings oftmals einen niedrigeren Verbrauch auf. Eine mögliche Erklärung hierfür ist, dass die Veröffentlichungen die Anlagen-Nennleistung beinhalten oder der Energieverbrauch für andere Produktionsrandbedingungen erhoben wurde. Letzteres konnte oftmals nicht überprüft werden, weil die entsprechenden Angaben in den Literaturquellen fehlen.

Auf Basis der parametrisierten Energie- und Stoffstrommodelle wurde ein übergeordnetes Ökobilanz-Modell aufgebaut, was die Analyse der Umweltwirkungen für unterschiedlichste Produktionsrandbedingungen ermöglicht. Insgesamt können über 50 Prozessvariablen und Entscheidungsparameter vom Anwender spezifiziert werden, welche im Anhang A-c in Tab. A-16 aufgelistet sind. Um den Einfluss der unterschiedlichen Produktionsrandbedingungen auf die Umweltwirkungen sowie mögliche Interaktionen zu ermitteln, bedarf es einer Methodik, die eine belastbare Analyse und übersichtliche Darstellung der Ergebnisse erlaubt.

5 Methoden zur Auswertung der Umweltwirkungen

Sowohl bei der Faserherstellung als auch bei den darauffolgenden Fertigungsprozessen kann eine Vielzahl an umweltrelevanten Prozessparametern und Produktionsrandbedingungen variiert werden (vgl. Tab. A-16 im Anhang A-c). Eine zielgerichtete Analyse der verfügbaren Bilanzmodelle kann daher nur mithilfe von statistischen Methoden erfolgen. Design of Experiments (DoE) wird häufig für eine effiziente Analyse von komplexen Experimenten eingesetzt und erlaubt eine systematische Identifikation relevanter Einflussgrößen und deren Wechselwirkung. Die Herleitung der mathematischen Berechnungsmodelle und Analysefunktionen sind in unterschiedlichen Fachliteraturen [104-109] beschrieben. In diesem Abschnitt werden daher nur Aspekte der Methode erläutert, die für eine Interpretation der Ergebnisse benötigt werden. Die Vielzahl an Wirkungskategorien (ADPe, ADPf, EP, ODP, POCP, GWP und AP, vgl. Kapitel 3.2) erschwert weiterhin eine eindeutige Bewertung der Produktionsparameter. Es ist möglich, dass sich die Wirkungskategorien bei Änderung der Parameter gegenläufig verhalten. Dies erfordert letztendlich eine Priorisierung der Umweltwirkungen, um die Prozess- und Parametereinstellungen zu identifizieren, die insgesamt zu einer Reduktion des ökologischen Schadpotentials führen. Das UBA hat für diese Problematik eine Methode zur Normalisierung und Rangbildung der Wirkungskategorien erarbeitet [3], deren Vorgehensweise auf die Problemstellung in dieser Arbeit adaptiert wird.

5.1 Statistische Versuchsplanung

Für die Analyse der unterschiedlichen Prozess- und Parametereinstellungen wurde die DoE-Software MODDE® Version 10.1.1 verwendet. Die Versuchsplanung und -analyse kann dabei in Abhängigkeit der Anzahl der Faktoren und Faktorstufen mit unterschiedlichen Modellen erfolgen. Sofern viele verschiedene freie Parameter vorhanden sind und bisher wenig über deren Einfluss bekannt ist, wird üblicherweise ein Screening durchgeführt, um die Relevanz des jeweiligen Parameters bzw. Faktors zu bestimmen. Folgende Produktionsparameter werden in dieser Arbeit in der Screening-Analyse berücksichtigt:

- Produktionsparameter, die einen Einfluss auf den Materialbedarf haben
- Produktionsparameter, die einen Einfluss auf die Energiebereitstellung haben

- Produktionsparameter, die zu einer Änderung des Prozessenergiebedarfs von mind. 10% in den fokussierten Fertigungsprozessketten ausgehend von einem definierten durchschnittlichen Produktionsszenario führen (vgl. Hohmann et al. [74])

Darauf aufbauend kann für die wichtigsten Faktoren eine detailliertere Untersuchung erfolgen sowie ein Vorhersagemodell zur Abschätzung der Wirkungsindikatoren für unterschiedliche Parametereinstellungen aufgebaut werden. Im Gegensatz zum Ökobilanz-Modell in der GaBi ts Software erlaubt dieses Vorhersagemodell die direkte Berechnung der Produktionsszenarien, die zu minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen führen.

Erstellung des Versuchsplans

MODDE® verfügt über eine Vielzahl an Versuchsplänen [104], welche sich je nach Untersuchungsziel, Anzahl der Faktoren und Faktorstufen eignen. Beim Screening steht die Identifikation relevanter Faktoren im Vordergrund. Eine möglichst exakte mathematische Beschreibung der Faktorinteraktionen ist oftmals erst zu einem späteren Zeitpunkt notwendig. Für Screening-Analysen werden daher üblicherweise lineare Versuchspläne mit einer moderaten Auflösung gewählt. In dieser Arbeit kamen ausschließlich teilfaktorische Versuchspläne mit einer Auflösung von IV zum Einsatz. Versuchspläne für eine Optimierungsrechnung bzw. für den Aufbau eines Vorhersagemodells verfügen hingegen über eine geringere Anzahl an Faktoren, allerdings über eine höhere Stufenanzahl. Werden wie in dieser Arbeit qualitative Faktoren¹ untersucht, wird in MODDE® automatisch ein D-optimaler Versuchsplan verwendet [104]. Alle für diese Arbeit verwendeten Versuchspläne können dem Anhang A-c entnommen werden. Die Reihenfolge entspricht dabei den in Kapitel 6 und 7 untersuchten Prozessketten. Eine detaillierte Erklärung zur Versuchsplanerstellung sowie den mathematischen Hintergründen sind beispielsweise in Siebertz et al. [108] oder Kleppmann [109] zu finden.

Modellerstellung

Für die Analyse der Daten steht in MODDE® sowohl eine mehrfach lineare Regressionsanalyse (MLR) als auch die Partial Least Square (PLS) Methode zur Verfügung. In der vorliegenden Arbeit wurde für alle Analysen eine mehrfach lineare Regressionsanalyse herangezogen. Das mathematische Modell kann hierbei wie folgt beschrieben werden:

$$y = c_0 + \sum_{i=1}^n c_i * x_i + \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n c_{ij} * x_i * x_j + \sum_{i=1}^{n-2} \sum_{j=1+1}^{n-1} \sum_{k=1+2}^n c_{i,j,k} * x_i * x_j * x_k + \dots + \varepsilon \quad (5-1)$$

¹ Qualitative Faktoren sind Faktoren, die keinem natürlichen numerischen Wert entsprechen [107]

Die Antwort der Gleichung entspricht in dieser Arbeit das Indikatorergebnis einer Wirkungskategorie, c_0 bis n entspricht den Modellkonstanten bzw. den Regressionskoeffizienten, die mithilfe der Ergebnisse des aufgestellten Versuchsplans zu ermitteln sind, wobei n die Anzahl der variierten Parameter bzw. Faktoren ist. Weiterhin repräsentiert x den jeweiligen Faktor und Epsilon ε die Abweichung des Modells, welche bei einem guten Model entsprechend klein ist. Sofern die Antwort von den Einflussgrößen nicht linear abhängig ist, führt das lineare Berechnungsmodell zu keiner qualitativ hochwertigen Vorhersage der Antwort. In solch einem Fall kann das Modell beispielsweise um die quadratischen Terme der Haupteffekte ergänzt werden. Es ist weiterhin möglich die Antwort y zu transformieren, um die Berechnung der Modellkonstanten mathematisch zu vereinfachen und damit einhergehend die Genauigkeit des Modells zu erhöhen [108].

Überprüfung der Modellgüte

Bei der Auswertung werden von der DoE-Software, die in Tab. 5-1 dargestellten fünf Kennwerte ermittelt [104], die zur Bewertung der Qualität des berechneten mathematischen Modells herangezogen werden.

Tab. 5-1: Kriterien zur Bewertung der Güte der statistischen Modelle

Kriterium	Bedingung
Bestimmtheitsmaß R^2	$R^2 > 0,5$ und $ R^2 - Q^2 < 0,2$
Abschätzung der Vorhersagegenauigkeit Q^2	$Q^2 > 0,5$ und $ R^2 - Q^2 < 0,2$
Konditionszahl	$cn < 3$ bei Screening-Analysen; $cn < 10$ bei Szenario-Analysen
Anzahl der Modellterme	Plausibel
Anzahl der Freiheitsgrade	$DF > 5$

R^2 und Q^2 sind beispielsweise ein Maß für die Modellgenauigkeit. Die Anzahl der Freiheitsgrade entsprechen Versuchsergebnisse, die nicht für die Koeffizientenberechnung verwendet wurden und daher zur Überprüfung der Modellgenauigkeit herangezogen werden können. Die Gültigkeit des Modells und die Reproduzierbarkeit der Ergebnisse werden nicht ausgewiesen. Bei letzterem wird die Variation der Ergebnisse gleicher Versuchseinstellungen im Vergleich zur Variation aller durchgeführten Ergebnisse gegenübergestellt und die Reproduzierbarkeit ermittelt. Da es sich in der vorliegenden Arbeit, um die Analyse empirischer Modelle und Simulationen handelt und die Ergebnisse berechnet werden, beträgt die Reproduzierbarkeit 100%. Bei der Gültigkeit des Modells wird die Abweichung der modellierten von den realen Ergebnissen verglichen und diese der Reproduzierbarkeit gegenübergestellt. Bei einer sehr guten Reproduzierbarkeit, wie es in dieser Arbeit der Fall ist, werden oftmals Artefakte berechnet. Selbst kleinste Abweichungen führen aufgrund der Reproduzierbarkeit zu einer schlechten Modellgüte. Sofern R^2 , Q^2 und die Konditionszahl die empfohlenen Kriterien erfüllen, kann das Modell unabhängig von diesem Wert als hochwertig angesehen werden.

Zur Optimierung der fünf Kennwerte werden die Ergebnis- und Residuenverteilung mithilfe von Histogrammen und Normalwahrscheinlichkeitsdiagrammen untersucht und sofern notwendig eine Transformation der Antwort durchgeführt. Eine Übersicht der Modellgüte bzw. der erfassten Kennwerte kann für jede durchgeführte Analyse im Anhang A-c nach den entsprechenden Versuchsplänen gefunden werden.

Modellinterpretation und Optimierungsrechnung

Die Regressionskoeffizienten c_0 bis c_n in Formel 6-1 beschreiben im Modell die Änderung der Antwort vom Gesamtmittelwert und entsprechen bei normierten Wertebereichen dem halben Effekt eines Faktors, der in dieser Arbeit dargestellt wird. Sowohl der Effekt als auch der Regressionskoeffizient eines Faktors sind ein Maß für dessen Einfluss auf die Antwort. Ein Faktor wird als signifikant erachtet, wenn der Regressionskoeffizient bzw. der Effekt größer als dessen Zufallssteuerung, d.h. die Breite seines Vertrauensbereichs ist [109]. Um die Genauigkeit des Vorhersagemodells zu erhöhen werden schrittweise alle nicht-signifikanten Effekte aus dem Modell entfernt und die Signifikanz der übrigen Faktoren neu ermittelt [104].

Bei der Darstellung der Regressionskoeffizienten bzw. Effekte ist zu beachten, dass diese eine Änderung vom Gesamtmittelwert der dem Versuchsplan hinterlegten Ergebnisse und nicht von einem definierten durchschnittlichen Produktionsszenario darstellen. Das sowie die Transformation der Ergebnisse kann in manchen Fällen zu einer Fehlinterpretation der Effekte führen². Daher wird in dieser Arbeit die Relevanz der Faktoren als Absolutwert dargestellt. Die Änderung der Umweltwirkung in Abhängigkeit der jeweiligen Faktorstufen wird entweder in einem Interaktionsdiagramm oder als Verlaufsdigramm angezeigt. Beispiele hierfür können Abb. 5-1 und Abb. 5-2 entnommen werden. Bei den Verlaufsdigrammen in Abb. 5-1 können die übrigen Parameter definiert werden, wobei als Standardeinstellung in dieser Arbeit ein durchschnittliches Produktionsszenario gewählt worden ist. Bei Interaktionsdiagramme in Abb. 5-2 werden für die freien Variablen Ergebnismittelwerte verwendet. Bei beiden Diagrammtypen ist auf der y-Achse der in dieser Arbeit maximal mögliche Wertebereich einer Wirkungskategorie prozentual dargestellt; 100% entspricht dem höchsten und -100% dem niedrigsten Wert einer Wirkungskategorie bei dem in dieser Arbeit untersuchten Prozessfenster.

² Die Verwendung von thermischer Energie aus Erdgas führt im Vergleich zu elektrischer Energie aus einem Strom Mix, zu einer Reduktion der Treibhausgase. Strom aus erneuerbaren Energien verursacht hingegen ein niedrigeres Treibhauspotential als thermische Energie aus Erdgas. Wenn im statistischen Modell neben dem Strom Mix, mehrere unterschiedliche erneuerbare Energien untersucht werden, ist der Gesamtmittelwert des Treibhauspotentials niedriger als die bei Verwendung von thermischer Energie. Der Effekt Energieart würde daher bei der Wahl von thermischer Energie eine durchschnittliche Steigerung des Treibhauspotentials vorhersagen, die allerdings nur unter bestimmten Randbedingungen zu treffen würde.

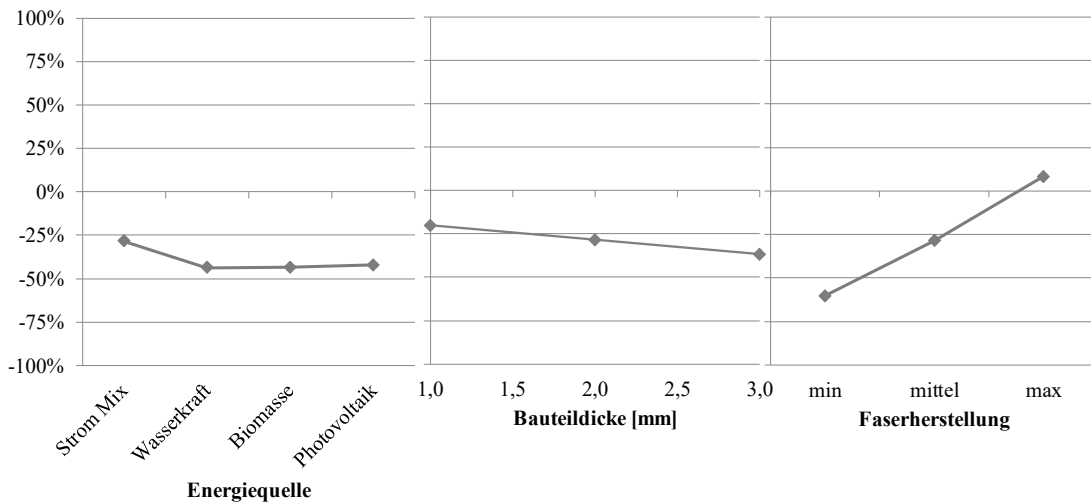


Abb. 5-1: Beispiel für ein Verlaufsdiagramm – Einfluss der Faktoren Faserherstellung, Energiequelle und Bauteildicke auf die entsprechende Wirkungskategorie

Ein Verlaufsdiagramm zeigt die Änderung der Umweltwirkung durch die Variation eines Faktors für ein durchschnittliches Produktionsszenario an. Da die y-Achse den maximal möglichen Wertebereich innerhalb des untersuchten Prozessfensters wiedergibt, können anhand der Diagramme schon erste Rückschlüsse bzgl. der Relevanz einzelner Faktoren getroffen werden. Allerdings werden in diesen Diagrammen keine Parameterwechselwirkungen untersucht, die möglicherweise zu einer Verstärkung oder Schwächung des jeweiligen Effekts führen können. In Abb. 5-1 ist auch zu erkennen, dass ein als durchschnittliches deklariertes Produktionsszenario nicht zwangsweise zu den mittleren Umweltwirkungen einer Wirkungskategorie führen muss.

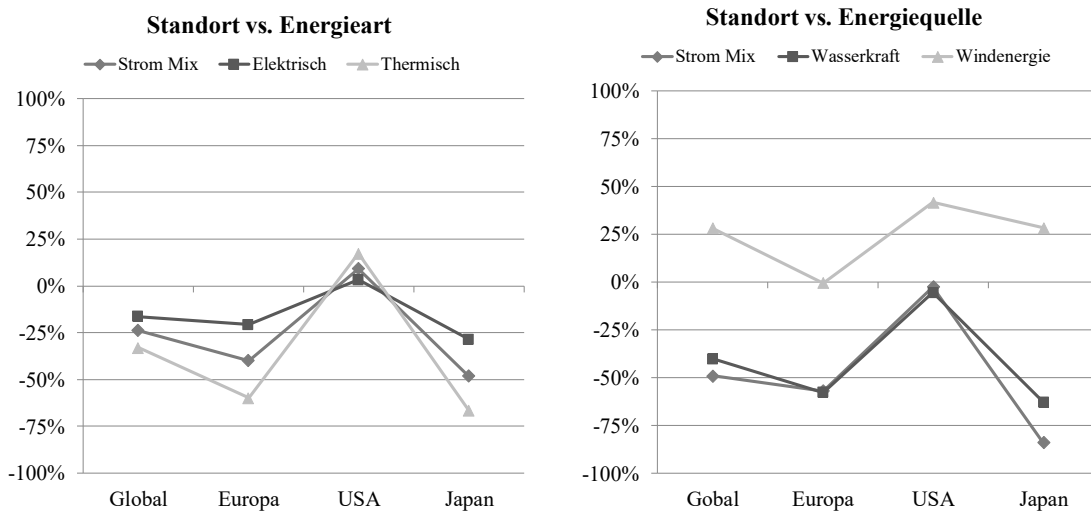


Abb. 5-2: Beispiel für ein Interaktionsdiagramm – Wechselwirkung des Produktionsgebiets mit der Energieart (links) und der Energiequelle (rechts)

Interaktion- bzw. Wechselwirkungsdiagramme zeigen nicht nur die Änderung von einem Parameter, sondern auch deren Abhängigkeit zu einem anderen Parameter an. In

Abb. 5-2 links zum Beispiel ist ersichtlich, dass eine Produktion in den USA zu einer Steigerung der Umweltwirkung i.V. zu einem europäischen oder japanischen Produktionsgebiet führt. In Kombination mit der Verwendung von thermischer Energie werden die maximalen Umweltwirkungen erzielt. Die Verwendung von thermischer Energie, die bei allen anderen Standorten zu geringeren Umweltwirkungen führt, weist in den USA in dieser Wirkungskategorie das höchste Potential auf. Auch die resultierende Umweltwirkung durch die Strombereitstellung ist vom Produktionsgebiet abhängig (vgl. Abb. 5-2 rechts). Während beispielsweise in Europa und USA Wasserkraft und Strom Mix die gleichen Umweltwirkungen aufweisen, sind diese in einem globalen Produktionsszenario und in Japan für den Strom Mix niedriger.

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wird mithilfe des Vorhersagemodells eine Optimierungsrechnung durchgeführt und die Produktions- und Parametereinstellungen für minimale, mittlere und maximale Umweltwirkungen ermittelt. Um die Modellgüte des Vorhersagemodells zu überprüfen, werden für die ermittelten Produktionseinstellungen die Umweltwirkungen in dem in Kapitel 4.4 vorgestellten Ökobilanz-Modells berechnet und diese mit dem statistischen Modell verglichen. Die Gegenüberstellung für jede ausgewertete Fertigungsprozesskette kann Anhang A-g entnommen werden.

5.2 Bewertung der Wirkungsindikatoren

In dieser Arbeit sollen u.a. die Produktionsparameter identifiziert werden, die zu niedrigen Umweltwirkungen führen. Hierbei gilt es zu beachten, dass das mögliche Schadpotential der übergeordneten Schutzgüter durch mehrere Wirkungskategorien beschrieben wird. In der Regel empfiehlt das UBA bei einer ökobilanziellen Bewertung die in Tab. 5-2 links aufgelisteten Wirkungskategorien zu berücksichtigen. Die in dieser Arbeit aufgrund der Aktualität eingesetzte Methode zur Wirkungsabschätzung CML der Universität Leiden, berechnet die in der rechten Spalte der Tab. 5-2 dokumentierten Wirkungskategorien. Eine Erläuterung der Wirkungskategorien kann dem Kapitel 2.1 und der Veröffentlichung des UBA [3] entnommen werden.

Tab. 5-2: Umweltwirkungskategorien nach UBA [3] und CML [110]

Wirkungskategorie nach UBA	Wirkungskategorie nach CML
Direkte Gesundheitsschädigung	Humantoxizitätspotential (HTTP)
Direkte Schädigung von Ökosystemen	Aquatisches Frischwasser Ökotoxizitätspotential (FAETP) Aquatisches Salzwasser Ökotoxizitätspotential (MAETP) Terrestisches Ökotoxizitätspotential (TETP)
Naturraumbeanspruchung	
Aquatische Eutrophierung	Eutrophierungspotential (EP)
Terrestische Eutrophierung	

Wirkungskategorie nach UBA	Wirkungskategorie nach CML
Photochemisches Oxidantienbildung/ Sommersmog	Photochemisches Oxidantienbildungspotential (POCP)
Ressourcenbeanspruchung	Abiotischer Ressourcenverbrauch elementar (ADPe) Abiotischer Ressourcenverbrauch fossil (ADPf)
Stratosphärischer Ozonabbau	Ozonabbaupotential (ODP)
Treibhauseffekt	Treibhauspotential (GWP 100 Jahre) Treibhauspotential (GWP 100 Jahre), ohne biogenes C
Versauerung	Versauerungspotential (AP)

Sowohl die Screening-Analyse als auch die Szenario-Analyse zur Entwicklung des Vorhersagemodells beinhaltet die Auswertung aller Wirkungskategorien. Bei der Screening-Analyse ist keine Priorisierung der Wirkungskategorien erforderlich. Sobald ein Produktionsparameter einen relevanten Effekt (vgl. hierzu Kapitel 5.1) in einer Wirkungskategorie aufweist, wird dieser bei der nachfolgenden Szenario-Analyse mitberücksichtigt. In der Szenario-Analyse wird ein Vorhersagemodell entwickelt, welches für jede Wirkungskategorie die Parametereinstellungen für einen minimalen und maximalen Wert sowie für eine bestimmte Zielgröße ermittelt. Die Bestimmung der Produktionsparameter, die zu minimalen bzw. maximalen Umweltwirkung aller Wirkungskategorien führen, kann sich dabei schwierig gestalten. So kann eine Parameterkombination in einigen Wirkungskategorien zu einer Mehrbelastung und in anderen zu einer Reduktion der Umweltwirkung führen. Weiterhin lassen sich die einzelnen Wirkungskategorien untereinander weder quantitativ noch qualitativ vergleichen. Für die Ermittlung der Prozess- und Produktionsparameter, die insgesamt zu einer Reduktion der Umweltwirkung führen, muss daher eine Normierung und Hierarchisierung bzw. Ordnung der Wirkungsindikatorergebnisse erfolgen.

In Anlehnung an die vom UBA vorgeschlagene Methode [3], wird zuerst die maximal mögliche Mehrbelastung für jede Wirkungskategorie innerhalb des untersuchten Prozessfensters berechnet, indem die Differenz zwischen dem vorhergesagten Maximum und Minimum jeder Wirkungskategorie gebildet wird.

Die weitere Hierarchisierung der Mehrbelastung wird nach dem UBA [3] anhand von drei Kriterien durchgeführt:

- **Ökologische Gefährdung**
Hier erfolgt eine Einschätzung, welche Wirkungskategorie zu einer schwerwiegenden Beeinträchtigung der Schutzgüter führt.
- **Distance-to-Target**
Dieses Kriterium beschreibt den Unterschied zwischen aktuellen und angestrebten Zustand. Je größer das quantifizierte Umweltqualitätsziel entfernt ist desto höher wird die Wirkungskategorie priorisiert.

- Spezifischer Beitrag
Der spezifische Beitrag beinhaltet, den Vergleich der im betrachteten System entstandenen Wirkungen mit einem Referenzsystem.

In den drei genannten Kriterien wird jeder Wirkungskategorie eine Wichtigkeit zugewiesen, wobei die Klassifizierung A die höchste Priorität und E die niedrigste Priorität bedeutet und alle drei Kriterien gleichgewichtet zu einer ökologischen Priorität zusammengefasst werden. Die Priorisierung der zwei erst genannten Kriterien sind vom untersuchten System unabhängig und nach dem UBA wie in Tab. 5-3 dargestellt klassifiziert. Begründungen für die Priorisierung kann Schmitz et al. [3] entnommen werden.

Tab. 5-3: Klassifizierung der Wirkungskategorien für die Bewertungskriterien „ökologische Gefährdung“ und „Distance-to-Target“

Wirkungskategorien des UBA	Ökologische Gefährdung	Distance-to-Target
Aquatische Eutrophierung	B	C
Terrestrische Eutrophierung	B	B
Naturraumbeanspruchung	A	B
Photochem. Oxidantienbildung	D	B
Ressourcenbeanspruchung	C	B
Stratosphärischer Ozonabbau	A	D
Treibhauseffekt	A	A
Versauerung	B	B

Hierbei ist zu berücksichtigen, dass die methodische Bewertung des Human- und Ökotoxizitätspotentials bei der Einführung des Leitfadens zur Bewertung der Umweltwirkungen noch große Schwierigkeiten bereitet hat [3]. Daher stehen hierfür keine Einschätzungen des UBA hinsichtlich der Kriterien „ökologische Gefährdung“ und „Distance to Target“ zur Verfügung. Für die Ermittlung der minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen werden diese Wirkungskategorien nicht berücksichtigt. Die übrigen Klassifizierungen werden entsprechend auf die in Tab. 5-2 dargestellten Wirkungskategorien von CML übertragen. Beim Eutrophierungspotential wird die Einschätzung des UBA für die terrestrische Eutrophierung herangezogen.

Der spezifische Beitrag wird in Anlehnung an die Methode des UBA [3] berechnet. Um den Berechnungsaufwand zu minimieren, wird anstatt dem Vergleich jedes einzelnen Sachbilanzergebnisses mit dem definierten Referenzsystem, der Beitrag pro Wirkungskategorie gegenübergestellt. Als Referenzsystem können aufgrund der Verfügbarkeit in CML nur durchschnittliche Werte für Europa aus dem Jahr 2000 herangezogen werden [110]. Der spezifische Beitrag wird für jede Wirkungskategorie i unter Berücksichtigung des minimalen Indikatorergebnisses IE wie folgt bestimmt:

$$\text{spez. Beitrag}_i = \frac{IE_{i,min}}{IE_{i,Europa\ 2000}} \quad (5-2)$$

Die Rangordnung der Wirkungskategorien untereinander erfolgt relativ zum maximal berechneten spezifischen Beitrag (vgl. Tab. 5-4).

Tab. 5-4: Klassifizierung des spezifischen Beitrags

Klassifizierung	Wert
A	80 – 100% des maximalen spezifischen Beitrags
B	60 – 80% des maximalen spezifischen Beitrags
C	40 – 60% des maximalen spezifischen Beitrags
D	20 – 40% des maximalen spezifischen Beitrags
E	0 – 20% des maximalen spezifischen Beitrags

Aus der Addition aller drei Kriterien – ökologische Gefährdung, Distance-to-target, spezifischer Beitrag – ergibt sich die ökologische Priorität, welche sich in fünf Stufen – sehr groß, groß, mittel, gering, sehr gering – unterteilen lässt. Die Umrechnungstabelle nach dem UBA [3] ist dem Anhang A-f Tab. A-41 zu entnehmen. Hier sind auch die für die untersuchten Fertigungsprozessketten berechneten Prioritäten zu finden. Die Klassifizierung der Umweltwirkungen – Minimum, Mittel, Maximum – sowie die Berechnung der dafür notwendigen Prozess- und Produktionseinstellungen erfolgt gleichgewichtet anhand den Wirkungskategorien mit der höchsten ökologischen Priorität.

6 Wirkungsabschätzung relevanter Fertigungsprozesse und Prozessketten

Zur Beantwortung der adressierten Forschungsfragen in Kapitel 0, werden zuerst die resultierenden Umweltwirkungen der Carbonfaserherstellung im Detail vorgestellt. Ziel hierbei ist, die Produktionsparameter zu benennen, die einen signifikanten Einfluss auf die Umweltwirkungen haben und deren Wechselwirkungen aufzuzeigen.

Danach werden die Ergebnisse der ökobilanziellen Analyse der in Kapitel 0 definierten exemplarischen Prozessketten dargestellt:

1. SotA duroplastische Fertigungsprozesskette:
Umformung eines bebinderten Geleges mit anschließender Epoxidharz-Tränkung
2. Verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette:
Verschnittarme Herstellung eines 2D Lagenstapels, Umformung und anschließende Tränkung mit einem Epoxidharz
3. SotA Thermoplastische Fertigungsprozesskette:
Umformung eines gewebeverstärkten PA6-Organoblechs
4. Verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette:
Verschnittarme Herstellung eines endlosfaserverstärkten 2D Halbzeugs mit anschließender Konsolidierung und Umformung

Wobei aufgrund der unterschiedlichen Verschnitttraten für alle vier Prozessketten, die Herstellung der Vorprodukte mitbetrachtet wird.

Das für die Analysen verwendete Ökobilanz-Modell ist dem Kapitel 4 zu entnehmen. Aufgrund der Vielzahl an unterschiedlichen Kombinationsmöglichkeiten im Modell, wurde die in Kapitel 5 systematische Vorgehensweise zur ökobilanziellen Analyse gewählt. Um die Prozessschritte zu identifizieren, welche den größten Einfluss auf die Umweltwirkungen haben, wurde für die Carbonfaserherstellung und für die vier exemplarischen Prozessketten zuerst ein durchschnittliches Produktionsszenario ökobilanziell bewertet. Die hierfür relevanten Produktionsparameter werden in den Kapiteln 6.1 bis 6.5 jeweils genannt. Alle übrigen Einstellungen sind im Anhang A-c in den Tabellen Tab. A-17 bis Tab. A-20 aufgeführt. In den anschließenden Screening-Analysen wurden die ökologischen Haupteinflussgrößen mithilfe von teilfaktoriellen Versuchsplänen in der DoE Software MODDE® bestimmt. Die Auswahl der zu untersuchenden Produktionsparameter fand dabei wie in Kapitel 5.1 beschrieben statt. In den darauf aufbauenden Szenario-Analysen wurde mithilfe eines D-optimalen Versuchsplans ein Vorhersagemodell erstellt, welches eine detaillierte Untersuchung der Haupteinflussgrößen und

möglicher Wechselwirkungen ermöglichte. Die Versuchspläne sowie die entsprechenden Modellgütern der Screening und Szenario-Analysen sind dem Anhang A-d zu entnehmen. Neben der Detailanalyse, wurde das Vorhersagemodell zur Bestimmung der Parameter, die minimale, mittlere und maximale Umweltwirkungen verursachen, herangezogen. Welche Wirkungskategorien die höchste ökologische Priorität haben und daher für diese Klassifizierung verwendet worden sind, ist dem Anhang A-f zu entnehmen.

6.1 Carbonfaserherstellung

Bei der Carbonfaserherstellung wird die PAN-Faserherstellung, die anschließende Stabilisierung und Carbonisierung sowie die Oberflächenaktivierung und der Schlichteauftrag betrachtet. Im Ökobilanz-Modell können hierfür insgesamt sechs Produktionsparameter – Produktionsgebiet, Energieart, Energiequelle, Faserdatensatz, PAN-Faserausbeute, Transportwege – variiert werden. Die gewählten Parameter für ein durchschnittliches Produktionsszenario können der Tab. 6-1 entnommen werden.

Tab. 6-1: Parametereinstellung in der Carbonfaserherstellung für ein durchschnittliches Produktionsszenario

Carbonfaserherstellung	Produktionsparameter
Produktionsgebiet	Globaler Produktionsmix
Energieart	Durchschnittlicher elektrischer und thermischer Energieanteil
Energiequelle	Strom Mix
Faserdatensatz	Faserdatensatz 1 (CF 1 in Abb. 6-1) und Faserdatensatz 2 (CF 2 in Abb. 6-1) ¹
Materialausbeute	50%
Transport ja/nein	Wird berücksichtigt

In Abb. 6-1 sind die Anteile der Stoff- und Energieflüsse sowie Emissionen an den betrachteten Umweltwirkungen für beide Faserdatensätze dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die PAN-Faserherstellung mit einem Anteil von jeweils ca. 40% den größten Einfluss auf die Wirkungskategorien ADP elementar und fossil sowie dem Treibhauspotential für beide Faserdatensätze hat. Der zweit- und drittgrößte Anteil wird von der elektrischen und thermischen Energie in den genannten Wirkungskategorien verursacht. Beim ADPe ist eine geringfügig unterschiedliche Zusammensetzung zwischen den Faserdatensätzen zu erkennen, was auf den unterschiedlichen Schlichte-, Elektrolyt- und Wasserbedarf zurückzuführen ist. In Faserdatensatz 2 wird für die Carbonfaserherstellung

¹ Faserdatensatz 1 und Faserdatensatz 2 sind in Kapitel 4.2.1 exakt erläutert

mehr Schlichte, Elektrolyt und Wasser benötigt (vgl. Tab. 4-1). Letztendlich haben diese Stoffflüsse aber nur einen sehr geringen Einfluss auf alle Wirkungskategorien.

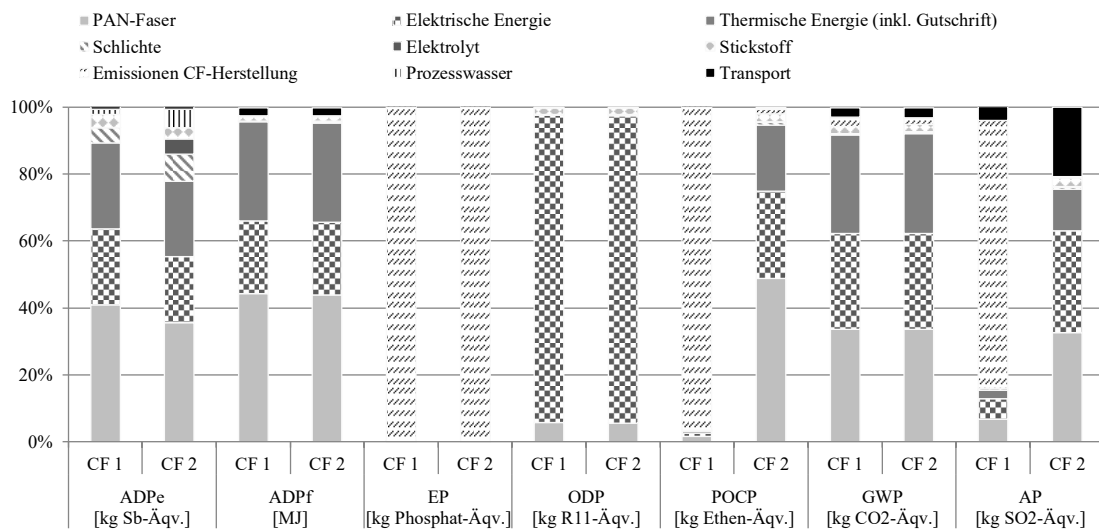


Abb. 6-1: Anteil der Stoff- und Energieströme sowie der Emissionen für die in Tab. 6-1 gewählten Produktionsparameter, jeweils normiert auf die Gesamtumweltwirkungen einer Wirkungskategorie

Weiterhin sind für das Eutrophierungspotential (EP) bei beiden Datensätzen hauptsächlich die freigesetzten Emissionen während der Carbonfaserherstellung verantwortlich. Dies lässt sich auf die Stickstoffemissionen zurückführen. Zum einen resultieren diese aus der Carbonisierung bzw. der hierfür notwendigen Inertgas-Umgebung und zum anderen entstehen, allerdings zu einem weitaus geringeren Teil, bei der Nachverbrennung Stickstoffemissionen. Hierbei ist zu erwähnen, dass aufgrund der unsicheren Datenlage bei der Nachverbrennung (vgl. Kapitel 2.2) davon ausgegangen wurde, dass es sich bei den freigesetzten Stickstoffemissionen nicht um Luftstickstoff sondern um unterschiedliche Stickstoffverbindungen handelt. Das Ozonabbaupotential (ODP) wird weitestgehend von der elektrischen Energie beeinflusst. Wobei ca. 85% der Umweltwirkung durch den amerikanischen Strom Mix und die bei der Energiebereitstellung freigesetzten FCKWs verursacht werden. Große Unterschiede zwischen den beiden Carbonfaserdatensätzen sind bei den Wirkungskategorien Photochemisches Oxidantienbildungs- (POCP) und Versauerungspotential (AP) ersichtlich. Während beim 2. Faserdatensatz die PAN-Faserherstellung und die Energiebereitstellung den größten Einfluss haben, sind es beim 1. Faserdatensatz die Emissionen, die während der Stabilisierung und Carbonisierung freigesetzt werden. Grund hierfür sind die unterschiedlichen Reaktionsgleichungen, die bei der Verbrennung von Ammoniak und Blausäure berücksichtigt worden sind. Bei Faserdatensatz 1 entsteht vorrangig Stickstoffmonoxid während bei Faserdatensatz 2 molekularer Stickstoff freigesetzt wird. Stickstoffmonoxid hat eine positive Wirkung auf den Sommersmog und führt somit zu einer Verringerung dieser Umweltwirkung. Im Gegensatz hierzu steigt das Versauerungspotential an.

6.1.1 Screening umweltrelevanter Produktionsparameter in der Carbonfaserherstellung

Abb. 6-1 lässt vermuten, dass Produktionsparameter, die einen Einfluss auf den PAN-Faserbedarf und die Energiebereitstellung haben, zu Änderungen in den Umweltwirkungen führen. Auch konnte gezeigt werden, dass die zwei verfügbaren Carbonfaserdatensätze unterschiedliche Ergebnisse bei manchen Kategorien bewirken. Im Rahmen der Screening-Analyse wurden die relevanten Produktionsparameter für die jeweilige Wirkungskategorie systematisch ermittelt. Diese sind in Tab. 6-2 mit einem Kreuzchen gekennzeichnet.

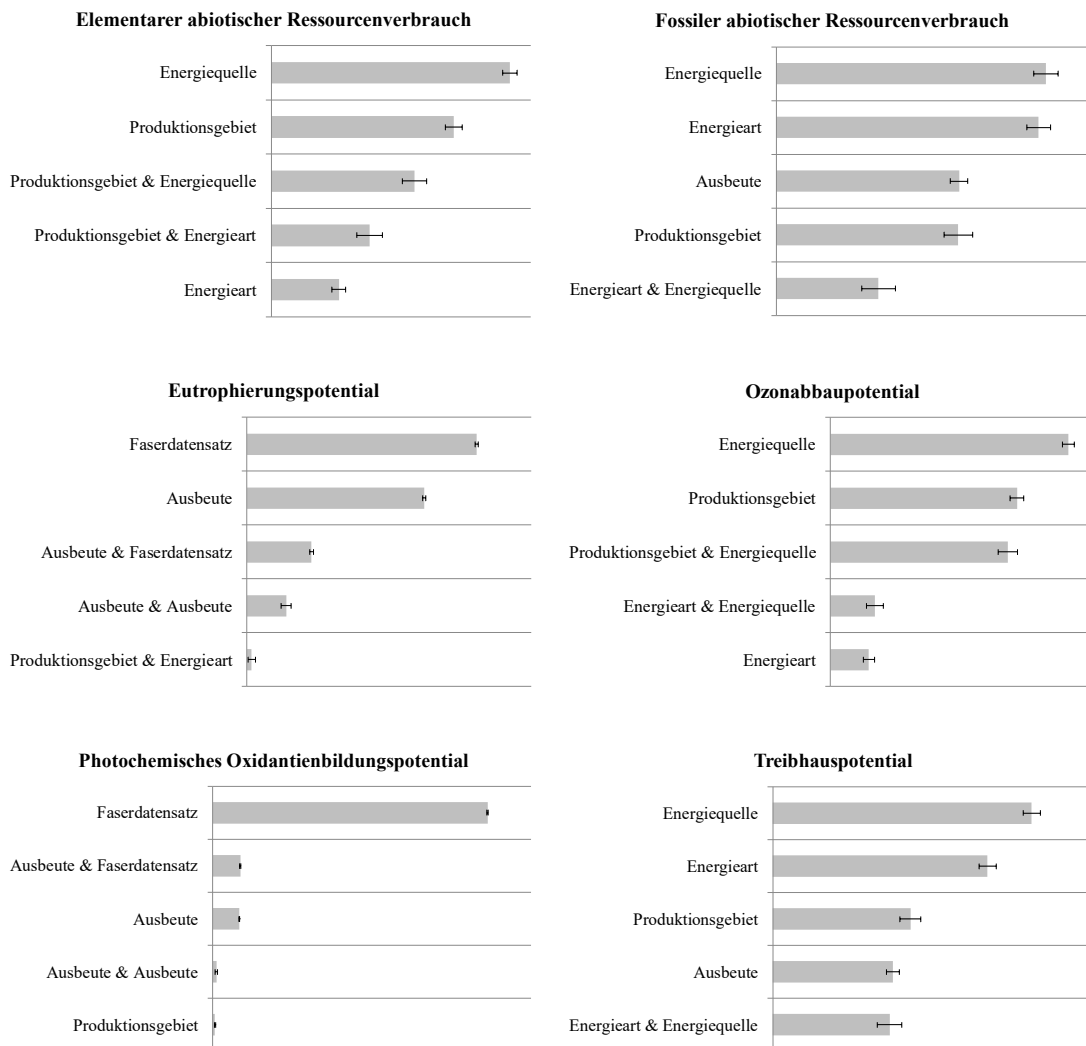
Tab. 6-2: Carbonfaserherstellung – Übersicht der relevanten Effekte

	Energiequelle	Energieart	Produktionsgebiet	Materialausbeute	Faserdatensatz	Transport
PE	x	x		x		
ADPe	x	x	x	x	x	
ADPf	x	x	x	x		
EP				x	x	
ODP	x	x	x			
POCP				x	x	
GWP	x	x	x			
AP	x		x	x	x	

In Tab. 6-2 ist ersichtlich, dass die Energiequelle und die Materialausbeute bei der Stabilisierung und Carbonisierung zu den meisten Effekten führen. Weiterhin sind die Energieart, das Produktionsgebiet und der verwendete Faserdatensatz relevant. Die Berücksichtigung des Transports scheint hingegen eher eine untergeordnete Rolle zu spielen. Die Variation dieses Modellparameters wurde durchgeführt, da die Transportwege nur exemplarisch für einen spezifischen Produktionsstandort berechnet worden sind. Aufgrund des geringen Einflusses, muss allerdings keine weitere Detailbetrachtung der Transportwege erfolgen. Für alle folgenden Analysen werden die berechneten Transportwege in Tab. 2-11 in Kapitel 2.2 für exemplarische Produktionsstandorte in Nord- und Mittelamerika, Asien und Europa verwendet.

6.1.2 Einfluss der Produktionsparameter auf die resultierenden Umweltwirkungen bei der Carbonfaserherstellung

Die Screening-Analyse hat gezeigt, dass von den sechs variierbaren Modell- bzw. Produktionsparameter, fünf einen relevanten Einfluss auf die Umweltwirkungen der Carbonfaserherstellung haben. Im Rahmen einer Szenario-Analyse wurden diese Parameter und deren Wechselwirkungen detailliert untersucht. Die ermittelte Signifikanz der Effekte ist der Abb. 6-2 zu entnehmen.



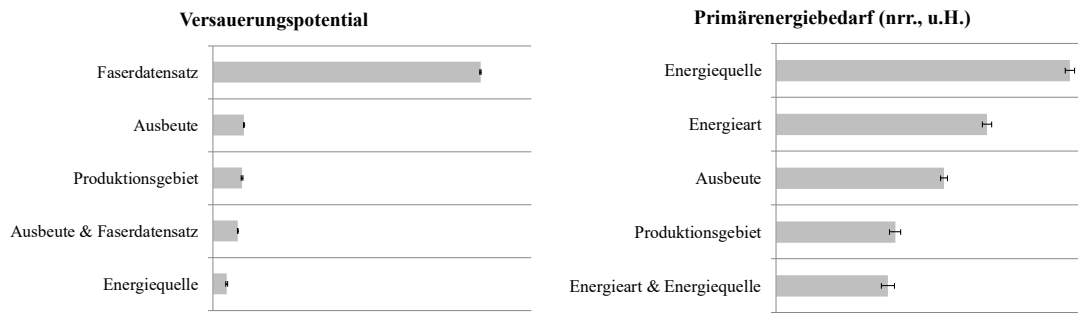


Abb. 6-2: Optimierung Carbonfaserherstellung – Effekte der Produktionsparameter auf die Umweltwirkung

Die Szenario-Analyse hat gezeigt, dass die Energiequelle und die Energieart sowie deren Wechselwirkung insbesondere bei den Wirkungskategorien ADPf, ODP und GWP einen Einfluss haben. Der verwendete Faserdatensatz und der PAN-Faserbedarf bzw. die Ausbeute bei der Carbonfaserherstellung haben hingegen den größten Einfluss auf die Wirkungskategorien EP, POCP und AP. Beim ADPe ist neben der Energiequelle auch der Produktionsstandort entscheidend. Im Folgenden werden für jede Wirkungskategorie die Ergebnisse kurz diskutiert.

Elementarer abiotischer Ressourcenverbrauch

In den Wechselwirkungsdiagrammen in Abb. 6-3 ist ersichtlich, dass eine Produktion in den USA zu einer Steigerung des elementaren Ressourcenverbrauchs i.V. zu einem europäischen oder japanischen Standort führt. Grund hierfür ist der i.V. zu den anderen Produktionsgebieten deutlich höhere Bleiverbrauch bei der Herstellung von thermischer Energie. Daher führt auch der vermehrte Einsatz von thermischer Energie zu einem sehr hohen elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch in den USA. In allen anderen Produktionsgebieten trägt diese Maßnahme zu einer Schonung der Ressourcen bei. Weiterhin ist der Einsatz von Strom aus Windkraft unabhängig vom jeweiligen Produktionsstandort mit einer Steigerung des elementaren abiotischen Ressourcenverbrauchs verbunden.

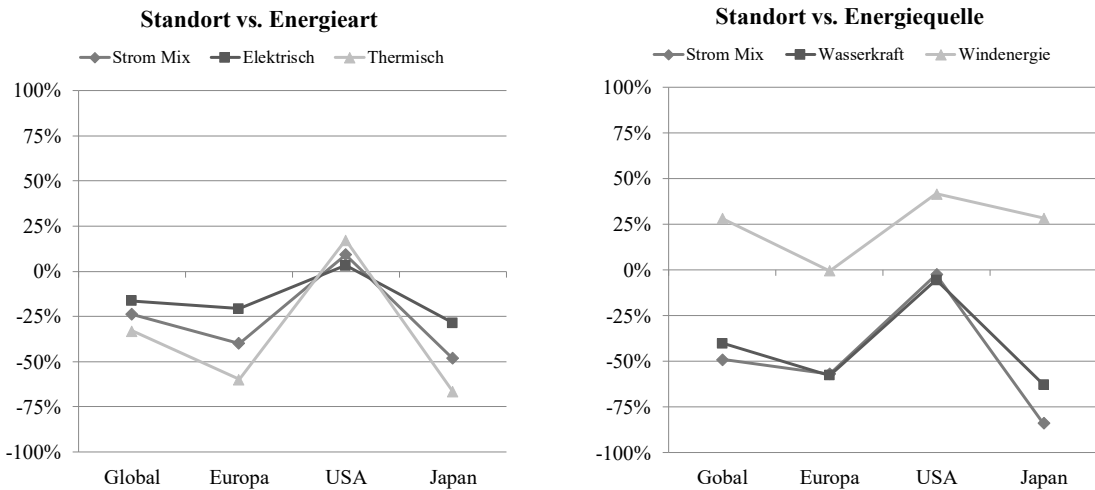


Abb. 6-3: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energieart und -quelle beim ADPe

Fossiler abiotischer Ressourcenverbrauch

Der fossile Ressourcenverbrauch ist u.a. vom Produktionsstandort abhängig. Beispielsweise führt der hohe Anteil an erneuerbaren Energien im europäischen Strom Mix (vgl. Abb. 2-4) zu einer Reduktion des fossilen Ressourcenverbrauchs i.V. zu den anderen Produktionsgebieten. Wird im Produktionsbetrieb eine autarke Energieversorgung durch erneuerbare Energien in den entsprechenden Standorten umgesetzt, so kann in den USA oder Japan höhere Reduktionspotentiale im Vergleich zu einer europäischen Produktion erzielt werden. Ein hoher thermischer Energieanteil resultiert in einem geringfügigen Anstieg des fossilen Ressourcenverbrauchs (vgl. Abb. 6-4 rechts). Dieser Effekt wird verstärkt sofern erneuerbare Energien für die Strombereitstellung verwendet werden. Eine Erhöhung der Ausbeute bei der Stabilisierung und Carbonisierung der PAN-Faser führt bei allen Szenarien zu einer Reduktion des fossilen Ressourcenverbrauchs.

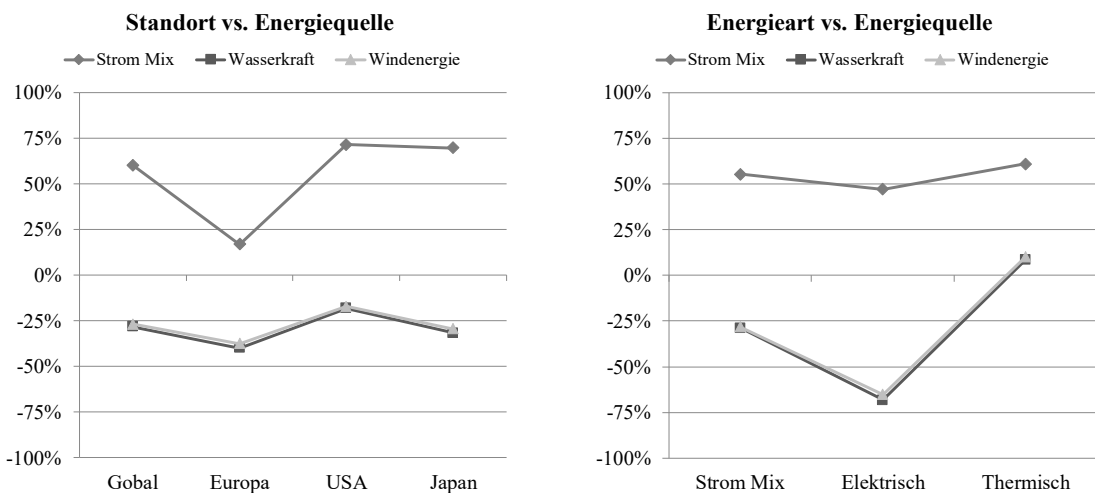


Abb. 6-4: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energiequelle sowie Energieart und Energiequelle beim ADPf

Eutrophierungspotential

Für die Überdüngung wirken sich insbesondere die Verwendungen des 2. Faserdatensatzes und der niedrigere PAN-Faserbedarf positiv aus (vgl. Abb. 6-5 rechts). Eine Erklärung hierfür ist, dass in der Carbonisierung weniger Stickstoffverbindungen entstehen (vgl. Tab. 2-8). Weiterhin hat die PAN-Fasermenge einen Einfluss auf den für die Stabilisierung notwendigen Sauerstoffbedarf und damit auf den verbleibenden restlichen Stickstoff der zugeführten Luft. Neben einer höheren Ausbeute führt auch der beim Faserdatensatz 2 höhere Schlichteanteil (vgl. Tab. 4-1) zu einer Reduktion des PAN-Faserbedarfs zur Herstellung von 1 kg Carbonfaser. Das Produktionsgebiet, die Energieart oder auch die Energiequelle haben hingegen kaum einen Einfluss auf das Eutrophierungspotential.

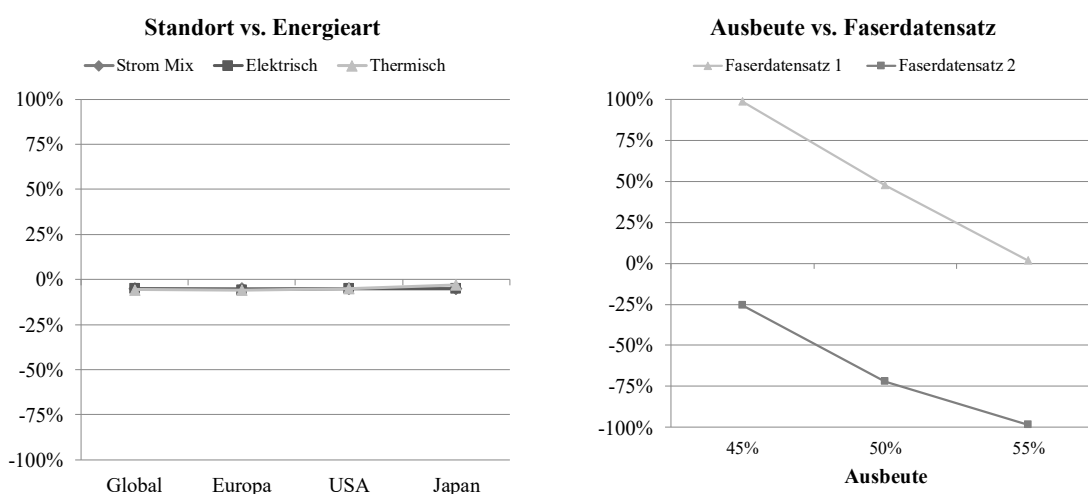


Abb. 6-5: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energieart sowie Materialausbeute und Faserdatensatz beim EP

Ozonabbaupotential

Der elektrische Energiebedarf hat mit über 90% den größten Einfluss auf das Ozonabbaupotential bei der Carbonfaserherstellung (vgl. Abb. 6-1). Hierfür sind insbesondere die freigesetzten FCKWs bei der Energieerzeugung verantwortlich. Im Gegensatz zu den europäischen und japanischen Produktionsgebieten, werden in der USA signifikant mehr FCKWs an die Umwelt abgeben, so dass sofern keine erneuerbaren Energien für die Strombereitstellung verwendet werden, das in einem deutlicher Anstieg des Ozonabbaupotentials mündet (vgl. Abb. 6-6 links). Der vermehrte Einsatz von thermischer Energie führt zu einer Reduktion des Ozonabbaupotentials. Voraussetzung hierfür ist allerdings, dass für den Strom der länderspezifische Strom Mix eingesetzt wird (vgl. Abb. 6-6 rechts).

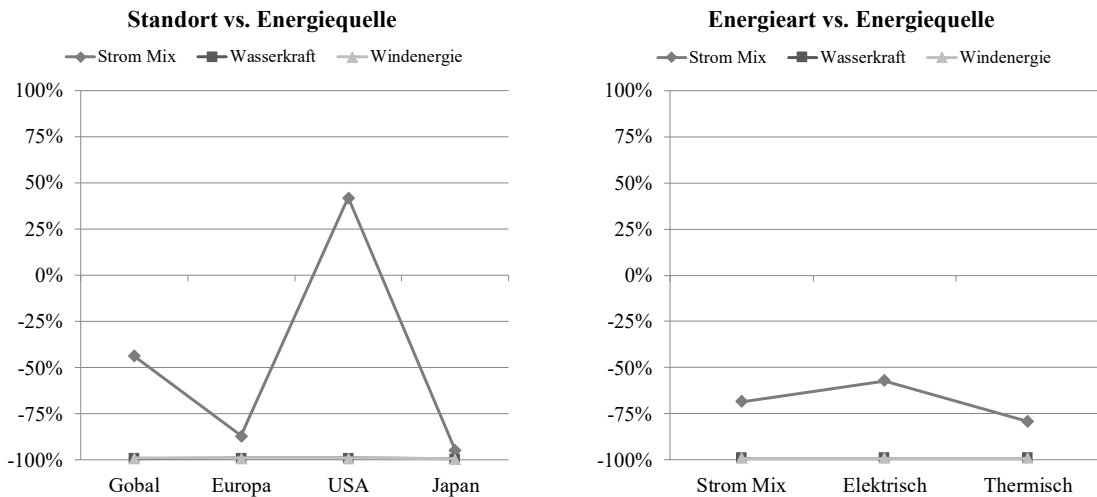


Abb. 6-6: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energiequelle sowie Energieart und Energiequelle beim ODP

Photochemisches Oxidantienpotential

Relevant für den Sommersmog sind die bei der Carbonfaserherstellung entstehenden Emissionen. Insbesondere die beim Faserdatensatz 1 freigesetzten Stickstoffmonoxide tragen positiv zur Reduktion des Sommersmogs bei. Daher wirken sich alle Maßnahmen, die zu einer Reduktion des Stickstoffmonoxids führen, wie beispielsweise eine höhere Materialausbeute bei der Carbonfaserherstellung oder die Verwendung des 2. Faserdatensatzes negativ auf das Photochemische Oxidantienbildungspotential aus (vgl. Abb. 6-7 rechts). Der Produktionsstandort, die Energiequelle und auch die Energieart spielen hingegen eine untergeordnete Rolle.

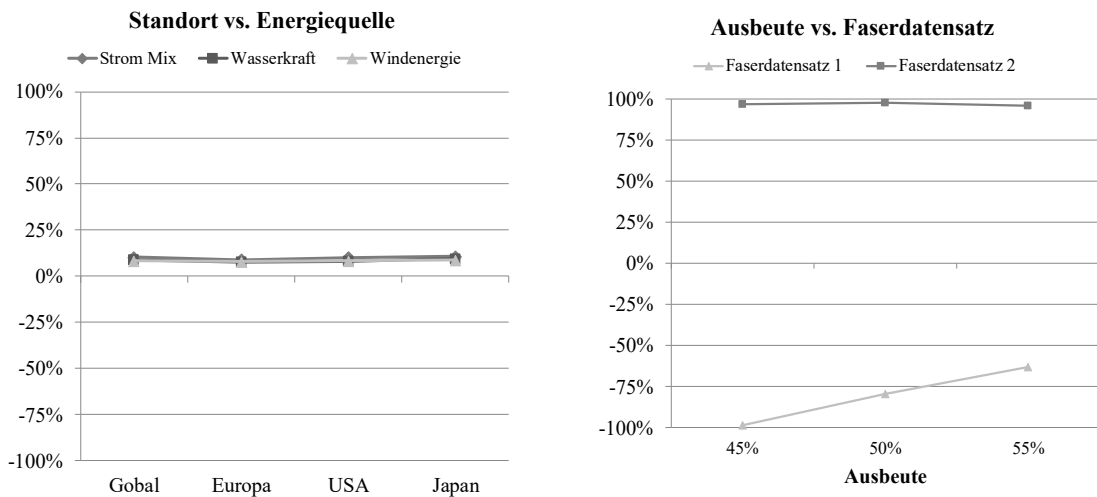


Abb. 6-7: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energiequelle sowie Materialausbeute und Faserdatensatz beim POCP

Treibhauspotential

Das Treibhauspotential weist einen ähnlichen Verlauf wie der fossile abiotische Ressourcenverbrauch auf. Aufgrund des hohen Anteils an erneuerbaren Energien im Strom Mix, werden bei einer europäischen Produktion weniger Treibhausgase freigesetzt (Abb. 6-8 links). Ein erhöhter Einsatz von thermischer Energie führt üblicherweise, wenn für die elektrische Energie der Strom Mix herangezogen wird, zu einer Reduktion des Treibhauspotentials (Abb. 6-8 rechts). Sofern der Strom aus erneuerbaren Energien bereitgestellt wird, wirkt sich ein hoher thermischer Anteil hingegen negativ aus. Weiterhin führt wie beim fossilen Ressourcenverbrauch eine höhere Materialausbeute bei der Carbonfaserherstellung zu einer Reduktion der Treibhausgase.

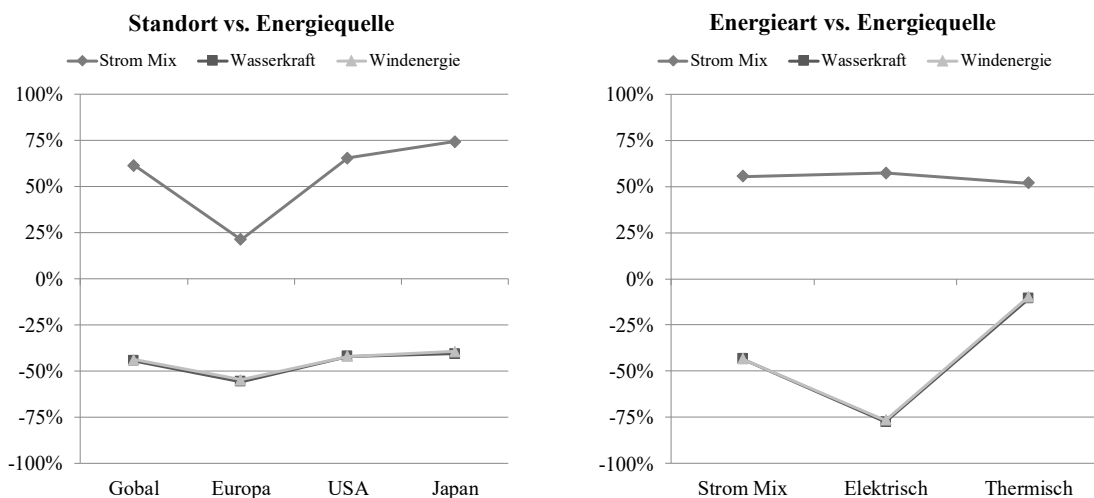


Abb. 6-8: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energiequelle sowie Energieart und Energiequelle beim GWP

Versauerungspotential

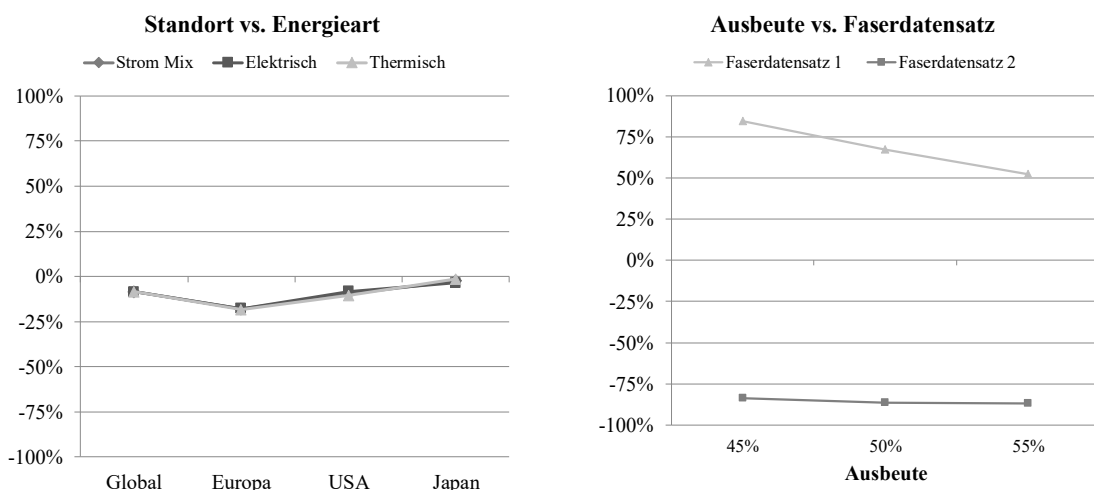


Abb. 6-9: Carbonfaserherstellung – Wechselwirkung Produktionsgebiet mit der Energieart sowie Materialausbeute und Faserdatensatz beim AP

Aufgrund der geringeren Stickstoffmonoxide beim 2. Faserdatensatz trägt dieser signifikant zur Reduktion des Versauerungspotentials bei. Einen weiteren positiven Einfluss haben ein geringerer PAN-Faserbedarf, der zu einer Reduktion der Stickstoffoxide führt, sowie ein europäischer Produktionsstandort. Letzterer hat i.V. zum Japan oder einem weltweiten Produktionsmix u. a. einen geringeren Ausstoß an Schwefeldioxid bei der Energiebereitstellung.

6.1.3 Bestimmung der Produktionsparameter für minimale und maximale Umweltwirkungen

Mithilfe des Vorhersagemodells konnte für jede Wirkungskategorie der erzielbare Wertebereich, welcher in Tab. 6-3 dargestellt ist, bestimmt werden.

Tab. 6-3: Prozessfenster der Wirkungskategorien für die Carbonfaserherstellung

	Minimum	Maximum
Primärenergiebedarf (nrr., u. H.) [MJ/kg CF]	326,03	582,65
Elementarer abiotischer Ressourcenverbrauch [kg Sb-Äqv./ kg CF]	4,58E-06	1,69E-05
Fossiler abiotischer Ressourcenverbrauch [MJ/kg CF]	302,66	542,94
Eutrophierungspotential [kg Phosphat-Äqv./kg CF]	5,61	6,4545
Ozonabbaupotential [kg R11-Äqv./kg CF]	1,03E-10	4,66E-09
Photochem. Oxidantienbildungspot. [kg Ethen-Äqv./kg CF]	-0,17	0,0075
Treibhauspotential [kg CO ₂ -Äqv./kg CF]	17,43	34,39
Versauerungspotential [kg SO ₂ -Äqv./kg CF]	0,029	0,41

Die Anwendung der UBA-Methode hat für das Eutrophierungs- und Treibhauspotential die größte ökologische Priorität ergeben. Die Produktionsparameter, die zu minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen führen, wurden daher anhand dieser beiden Wirkungskategorien berechnet und sind in Tab. 6-4 aufgelistet. Die Herstellung von Carbonfasern in Europa mit einem elektrisch dominanten Energieeinsatz aus Wasserkraft sowie einem minimalen Massenverlust von 45% führen dabei zu sehr niedrigen Umweltwirkungen. Im Gegensatz hierzu verursacht eine geringe Faserausbeute sowie die Verwendung des Strom Mix in Japan hohe Umweltwirkungen. Unter diesen Randbedingungen hat die Energieart selbst keinen so großen Einfluss auf das Eutrophierungs- und Treibhauspotential. Die vom Vorhersagemodell abgeschätzten Umweltwirkungen für die drei verschiedenen Energiearten liegen innerhalb der Modellgenauigkeit, wobei im Gegensatz zum Vorhersagemodell der vermehrte Einsatz von elektrischer Energie zum größten Treibhauspotential führt.

Tab. 6-4: Produktionsparameter für eine Carbonfaserherstellung mit minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen

	Minimum	Mittel	Maximum
Produktionsstandort	Europa	Europa	Japan
Energieart	Elektrisch	Elektrisch	Strom Mix* --> elektrisch
Energiequelle	Wasserkraft	Strom Mix	Strom Mix
Materialausbeute	55%	55%	45%
Faserdatensatz	Faserdatensatz 2	Faserdatensatz 1	Faserdatensatz 1

* Artefakt

In Abb. 6-10 sind die für die entsprechenden Einstellungen erzielten Umweltwirkungen für alle Wirkungskategorien dargestellt, wobei 0% das Minimum und 100% das Maximum des Prozessfensters einer jeden Wirkungskategorie entspricht.

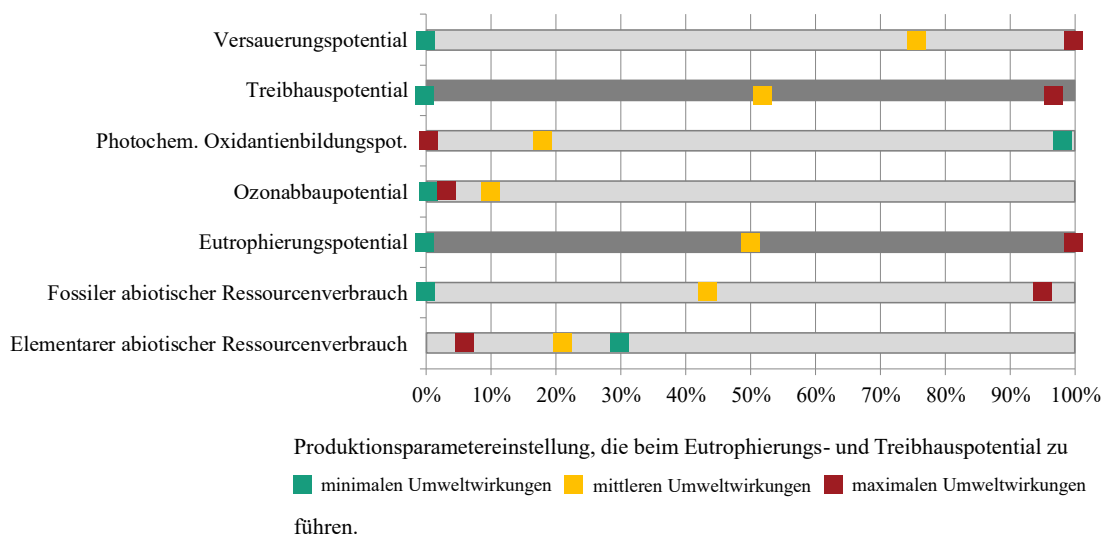


Abb. 6-10: Erzielte Umweltwirkungen aller Wirkungskategorien für ein minimales, mittleres und maximales Produktionsszenario

Dunkelgrau hinterlegt sind die Wirkungskategorien mit der höchsten ökologischen Priorität. Es ist zu erkennen, dass die Produktionseinstellung die zu einem minimalen, mittleren und maximalen Eutrophierungs- bzw. Treibhauspotential führen, auch ähnliche Ergebnisse beim Versauerungspotential und beim fossilen Ressourcenverbrauch ergeben. Beim Ozonabbaupotential führt das maximale Produktionsszenario nur zu geringen Umweltwirkungen. Beim POCP und elementaren Ressourcenverbrauch verhalten sich alle Szenarien invers, d. h. das Produktionsszenario was eigentlich zu niedrigen Umweltwirkungen führen sollte, verursacht einen hohen elementaren Ressourcenverbrauch bzw. Sommersmog. Insbesondere letztere Umweltwirkungskategorie weist aber eine geringe ökologische Priorität auf (vgl. Anhang A-f). Die mithilfe des Vorhersagemo-

dells berechneten Umweltwirkungen bzw. Produktionsparameter, wurden darüber hinaus mit dem Ökobilanz-Modell validiert. Dabei konnte bei allen Wirkungskategorien eine sehr gute Übereinstimmung (Abweichung < 4%) festgestellt werden.

6.2 SotA duroplastische Fertigungsprozesskette

Als SotA Fertigungsprozesskette für die Herstellung von faserverstärkten Duroplasten wird ein flächig, bebindertes Textil betrachtet, welches im WCM- oder RTM-Verfahren mit einem Epoxidharz getränkt wird. Für letzteres wird das bebinderte Textil nach dem Zuschnitt und der Stapelung in einer IR-Heizstrecke erwärmt und in einer Presse auf die finale Bauteilgeometrie umgeformt. Beim WCM-Verfahren erfolgen die Umformung und die Tränkung in einem Prozessschritt. Die für die Bewertung dieser Prozesskette herangezogenen Energieverbrauchsdaten sind Kapitel 4 zu entnehmen.

Für die ökobilanzielle Analyse des durchschnittlichen Produktionsszenarios wurden die in Tab. 6-5 aufgelisteten Parametereinstellungen verwendet.

Tab. 6-5: SotA duroplastische Prozesskette – Parametereinstellungen für ein mittleres Produktionsszenario

CF-Herstellung		Materialbedarf		Produktion	
Produktions- gebiet	Global	Textiler Verschnitt (2D)	10%	Energiequelle	DE Strom Mix
		Preform Verschnitt (3D)	10%	Bauteilfläche	1 m ²
Energieart	Strom Mix	Verschnitt Nachbearbeitung	5%	Bauteildicke	2 mm
Energiequelle	Strom Mix	Matrixreste	5%	Pressen- auslastung	80%
Transport	Wird berücksichtig			Injektion & Aushärtung	RTM
Materialaus- beute	50%			Aushärtezeit	5 min
Faserdatensatz	1 2			Vakuum- pumpentyp	120 m ³ /h

Abb. 6-11 gibt den Anteil der Prozessschritte an den jeweiligen Umweltwirkungen wieder, wobei einmal der Faserdatensatz 1 (CF 1) und einmal der Faserdatensatz 2 (CF 2) für die Carbonfaserherstellung herangezogen worden ist.

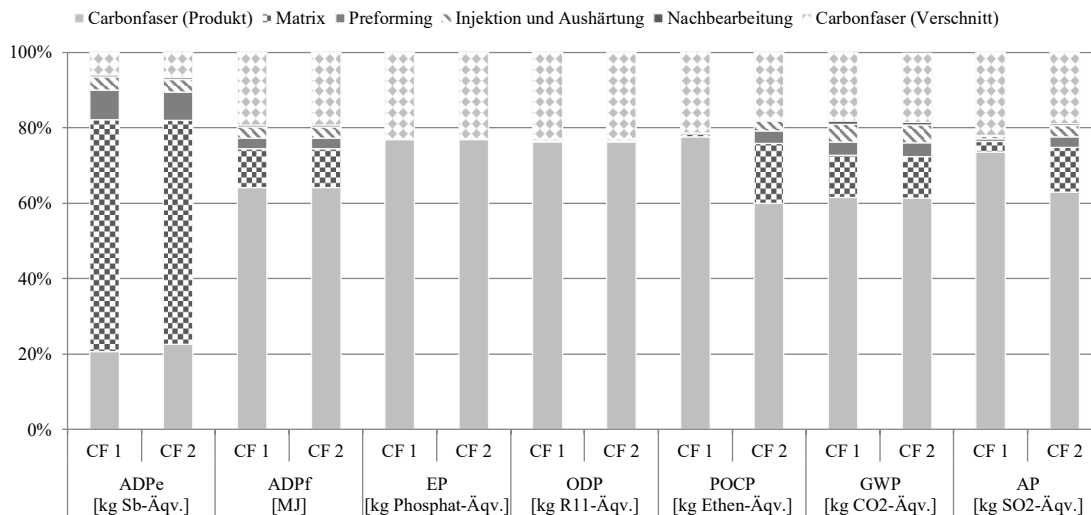


Abb. 6-11: Anteil der Prozessschritte an den Umweltwirkungen von 1 kg CFK, hergestellt mit der duroplastischen SotA Fertigungsprozesskette jeweils normiert auf die Gesamtumweltwirkungen einer Wirkungskategorie

Es ist ersichtlich, dass bei einem durchschnittlichen Produktionsszenario fast alle betrachteten Wirkungskategorien von der Carbonfaserherstellung, unabhängig vom verwendeten Datensatz, dominiert werden. Diese können sowohl durch die Produktionsparameter in der Faserherstellung (vgl. Kapitel 6.1) als auch durch den Materialbedarf in der Bauteilherstellung beeinflusst werden. Die Umweltwirkungen, die durch die Faserherstellung entstehen die im Bauteil verbleiben und die verschnitten werden, sind daher getrennt ausgewiesen. Das Preforming sowie die Injektion und Aushärtung haben hingegen nur einen geringen Einfluss (< 10%). Die bisher nicht berücksichtigten Energieströme für den Binderauftrag sowie für die Stapelung der Zuschnitte, welche deutlich geringer wären als bei der Geleageherstellung, der Binderaktivierung und Umformung, können somit vernachlässigt werden (vgl. Kapitel 4.2.2 und 4.3.2).

Weiterhin ist in Abb. 6-11 zu erkennen, dass der elementare abiotische Ressourcenverbrauch im Gegensatz zu den anderen Wirkungskategorien, zum größten Teil durch die Matrixherstellung verursacht wird. Für die Epoxidharzherstellung (vgl. Datensatz Anhang A-a) wird üblicherweise Natriumchlorid verwendet, was mit einem hohen elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch verknüpft ist. Natriumchlorid ist allerdings in großen Mengen in der Welt verfügbar [111] und stellt derzeit keinen kritischen Rohstoff dar. Der elementare abiotische Ressourcenverbrauch der Matrix, der über 95% durch Natriumchlorid verursacht wird, muss daher nicht als kritisch betrachtet werden.

Beim Eutrophierungs- und Ozonabbaupotential haben weder die Matrixherstellung noch die nachfolgenden Prozessschritte einen relevanten Einfluss. Die Umweltwirkungen werden nahezu vollständig von der Carbonfaserherstellung verursacht. Bei Ozonabbaupotential kann das darauf zurückgeführt werden, dass beim verwendeten Epoxidharz Datensatz (PlasticsEurope) keine Quantifizierung nach CML 2001 – Januar 2016 für das

ODP erfolgt. Andere Epoxidharzdatensätze lassen aber vermuten, dass bei der Epoxidharzerstellung auch Umweltwirkungen hinsichtlich des Ozonabbaupotentials entstehen. Die Ergebnisse dieser Wirkungskategorie sind daher nur zum Teil belastbar.

Unabhängig davon, haben die Matrix- und Bauteilherstellung auch kaum einen Einfluss auf das Photochemische Oxidantienbildungspotential, sofern Faserdatensatz 1 herangezogen wird. Entstehen bei der Verbrennung von Blausäure und Ammoniak in der Carbonfaserherstellung anstatt Stickstoffmonoxid (Faserdatensatz 1) molekularer Stickstoff (Faserdatensatz 2) (vgl. Abb. 6-11), hat sowohl die Matrixherstellung als auch die nachfolgenden Prozessschritte einen Einfluss auf den Sommersmog.

6.2.1 Screening umweltrelevanter Produktionsparameter

Das im Kapitel 4 vorgestellte Modell ermöglicht die Variation von über 50 Produktionsparameter für die ökobilanzielle Bewertung der duroplastischen SotA Fertigungsprozesskette. Mithilfe der in Hohmann et al. [74] durchgeführten Energieeffizienzanalyse konnte die ökologische Relevanz einiger Parameter ausgeschlossen werden. Der gewichtsspezifische Prozessenergiebedarf wird hauptsächlich von der Bauteilgröße, der Aushärtezeit und der Pressenauslastung beeinflusst. Ein dickeres Bauteil führt beispielsweise zu einer längeren Injektionszeit² und damit zu einem höheren Energieverbrauch der Injektionsanlage. Dieser wird aber durch die größere Produktionsmasse überkompensiert, so dass insgesamt der gewichtsspezifische Energiebedarf mit steigender Bauteildicke abnimmt. Dies gilt auch für den bei größeren Bauteilflächen höheren Energiebedarf, welcher durch ein größeres beheiztes Werkzeug und längere Injektionszeiten verursacht wird. Bei den Aushärtezeiten ist ein linearer Zusammenhang gegeben. Der Energieverbrauch steigt mit längeren Aushärtezeiten. Bei einer hohen flächigen Pressenauslastung kann bei gleichem Energiebedarf mehr Material verarbeitet werden. Insgesamt werden bei der Screening-Analyse 12 Parameter an den Grenzen des Prozessfensters variiert (vgl. Tab. 6-6).

Tab. 6-6: Variable Produktionsparameter bei der Screening-Analyse der SotA duroplastischen CFK-Fertigungsprozesskette

Parameter	Minimaler Wert	Maximaler Wert
CF-Herstellung	Produktionseinstellungen mit minimalen Umweltwirkungen	Produktionseinstellungen mit maximalen Umweltwirkungen
Energiequelle	DE Strom Mix	DE Strom aus Wasserkraft
Bauteilfläche	0,5 m ²	1,5 m ²
Bauteildicke	1 mm	3 mm

² Es wird angenommen, dass die Aushärtezeit innerhalb der untersuchten Dickenvariationen (1 bis 3 mm) nicht durch die Bauteildicke beeinflusst wird.

Parameter	Minimaler Wert	Maximaler Wert
Pressenauslastung	50%	100%
Injektion & Aushärtung	WCM	RTM
Aushärtezeit	3 min	10 min
Vakuumpumpentyp	10 m ³ /h	250 m ³ /h
Textiler Verschnitt (2D)	0%	20%
Preform Verschnitt (3D)	0%	20%
Verschnitt Nachbearbeitung	0%	10%
Matrixreste	0%	10%

In Tab. 6-7 sind die Ergebnisse der Screening-Analyse dargestellt, wobei relevante Effekte mit einem Kreuz gekennzeichnet sind.

Tab. 6-7: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Übersicht der relevanten Effekte

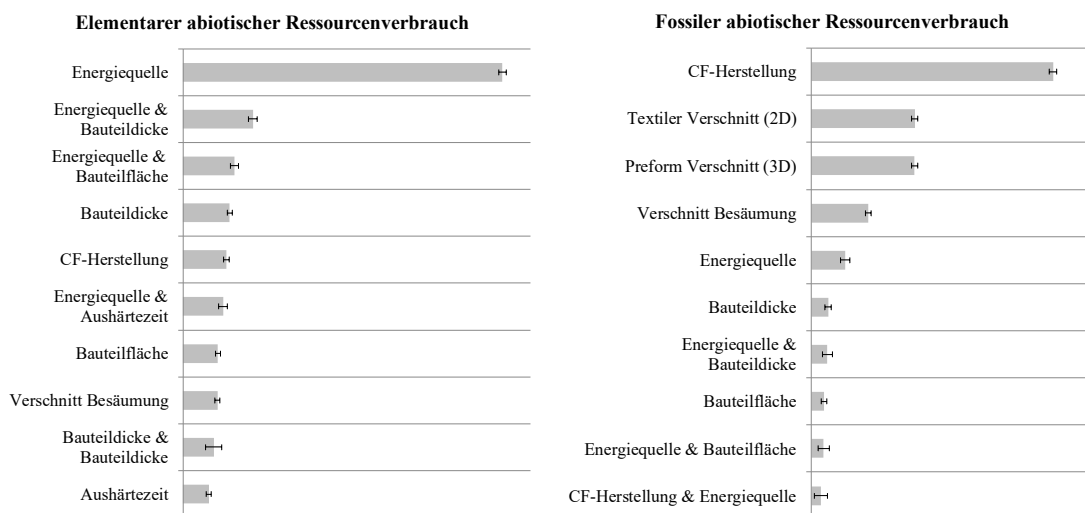
	CF-Herstellung	Energiequelle in der Produktion	Bauteilfläche	Bauteildicke	Pressenauslastung	Injektion & Aushärtung	Aushärtezeit	Vakuumpumpentyp	Textiler Verschnitt (2D)	Preform Verschnitt (3D)	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste
PE	x	x	x	x					x	x	x	
ADPe	x	x	x	x			x		x	x	x	x
ADPf	x	x	x	x					x	x	x	
EP	x								x	x	x	
ODP	x	x		x					x	x	x	
POCP	x								x	x		
GWP	x	x	x	x					x	x	x	
AP	x	x							x	x	x	

Wie der Tab. 6-7 zu entnehmen ist, haben die Produktionseinstellungen bei der Carbonfaserherstellung sowie die Verschnitttraten einen relevanten Einfluss auf alle Wirkungskategorien. Die Analyse der Umweltwirkungen der Prozessschritte für ein durchschnittliches Produktionsszenario (vgl. Abb. 6-11) hat gezeigt, dass die Carbonfaserherstellung (Produkt und Verschnitt) fast alle Wirkungskategorien dominiert. Daher hat eine Änderung dieser auch einen relevanten Effekt auf die Umweltwirkungen. Dies gilt auch für

die Matrixherstellung, welche den größten Anteil beim elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch verursacht. Weiterhin zeigen die Energiequelle, d.h. die Verwendung von deutschem Strom Mix oder Strom aus erneuerbaren Energien in der Fertigung, und die Bauteilgeometrie in vielen Wirkungskategorien einen signifikanten Effekt auf. Alle anderen Produktionsparameter, die zu einer Änderung des Energiebedarfs in der Fertigung führen, haben kaum einen Einfluss. Lediglich die Aushärtezeit führt noch zu einer relevanten Änderung des elementaren Ressourcenverbrauchs. Zusammenfassend ist festzuhalten, dass neun der 12 variierten Parameter in mindestens einer Wirkungskategorie signifikante Effekte aufweisen und in einer Szenario-Analyse detaillierter untersucht werden. Die Pressenauslastung, das Saugvolumen der Vakuumpumpe beim Injektions- und Aushärteprozess sowie das Injektionsverfahren selbst (RTM oder WCM) haben keinen signifikanten Einfluss auf die Umweltwirkungen. Letzteres gilt allerdings nur, wenn im RTM- und im WCM der gleiche Materialverschnitt anfällt.

6.2.2 Einfluss der Produktionsparameter auf die resultierenden Umweltwirkungen

Das für eine detaillierte Untersuchung entwickelte Vorhersagemodell weist in den meisten Wirkungskategorien eine sehr hohe Qualität auf. In Abb. 6-12 sind aufgrund der Übersichtlichkeit und nach Größe geordnet nur zehn Produktionsparameter bzw. deren Wechselwirkung aufgetragen, die zu einer signifikanten Änderung der jeweiligen Wirkungskategorie führen.



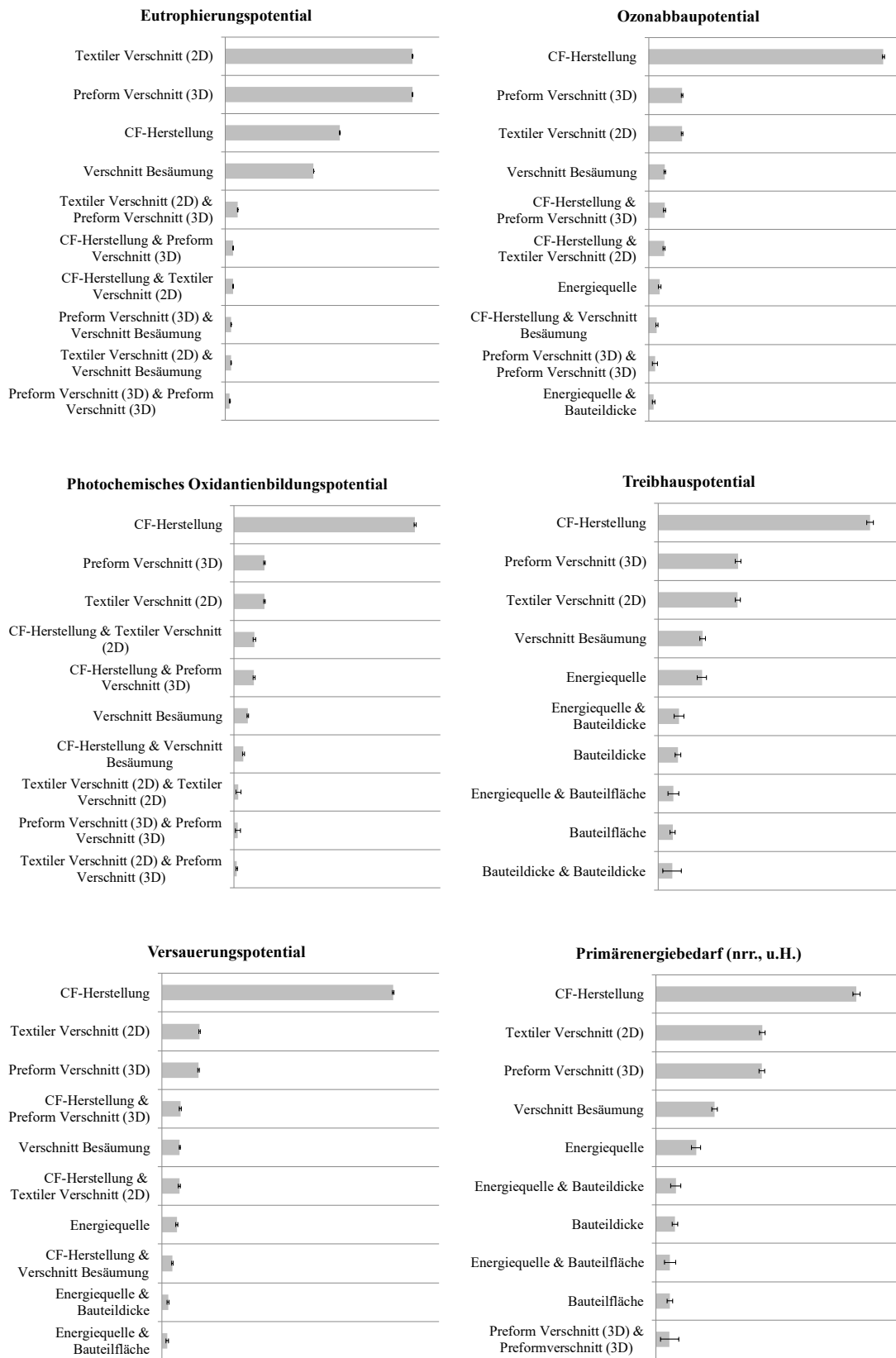


Abb. 6-12: Detailanalyse SoTA duroplastischen CFK-Fertigungsprozesskette – Effekte der Produktionsparameter auf die Umweltwirkung

Die Analyse der Szenarien hat gezeigt, dass die Carbonfaserherstellung sowie die Verschnitttraten in der Produktion bei allen faserdominierenden Wirkungskategorien (ADPf, EP, ODP, POCP, GWP und AP) zu den größten Änderungen beitragen. Während beim EP, POCP, ODP und AP hauptsächlich nur die Faserherstellung, die Verschnitttraten und deren Interaktionen zu den zehn größten Effekten führen, ist in den anderen Wirkungskategorien auch die Strombereitstellung in der Fertigungsprozesskette und die Bauteilgeometrie relevant. Beim elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch bewirken die Strombereitstellung und Prozessparameter, die zu einer Änderung des gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarfs führen, die größten Effekte. Der in der Screening-Analyse als einzig relevant identifizierte Fertigungsparameter, die Aushärtezeit, stellt beim elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch einer der zehn Haupteffekte dar. Im Folgenden werden für jede Wirkungskategorie die Ergebnisse kurz diskutiert.

Elementarer abiotischer Ressourcenverbrauch

Auch wenn für ein durchschnittliches Produktionsszenario die Matrixherstellung den größten Anteil am elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch hat (vgl. Abb. 6-11), hat die Strombereitstellung in der Bauteilfertigung, die Bauteilgeometrie und die Wechselwirkung der Strombereitstellung mit der Aushärtezeit den größten Effekt auf diese Wirkungskategorie.

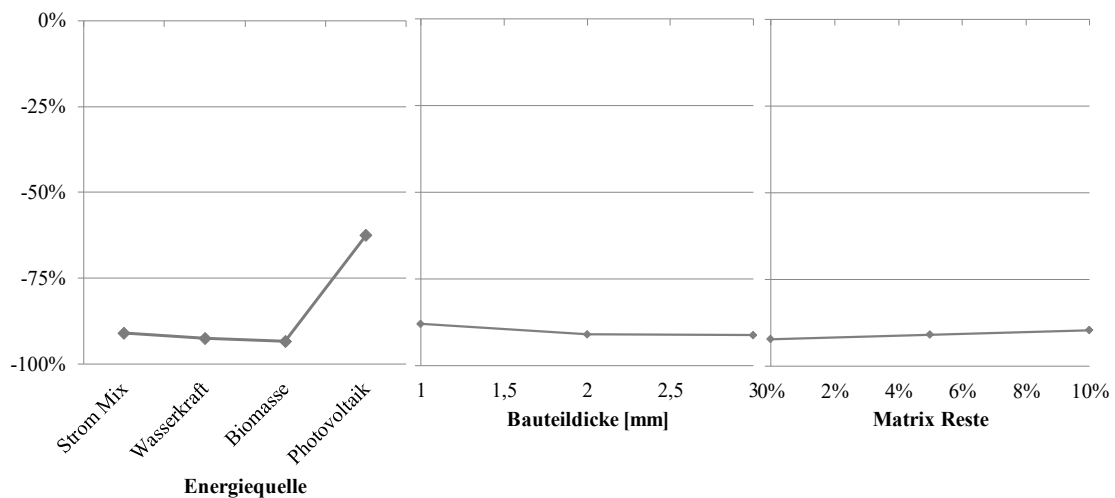


Abb. 6-13: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Energiequelle in der Produktion, Bauteildicke und Matrixreste im Vergleich beim ADPe

Grund hierfür ist, dass die Strombereitstellung durch eine Photovoltaikanlage im Vergleich zum Strom Mix einen sehr hohen elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch, verursacht durch den Silber-, Kupfer-, Gold- und Bleibedarf bei der Photovoltaik-Herstellung, aufweist (vgl. Abb. 4-3 und Abb. 6-13). Produktionsparameter, die zu einem höheren gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf in der Produktion führen, wie beispielsweise eine kleinere Bauteilfläche und geringe Wandstärke sowie eine längere Aushärtezeit verstärken diesen Effekt (vgl. Abb. 6-14). Eine Reduktion gegenüber dem

Strom Mix kann beispielsweise durch die Verwendung von Biomasse zur Stromerzeugung erreicht werden.

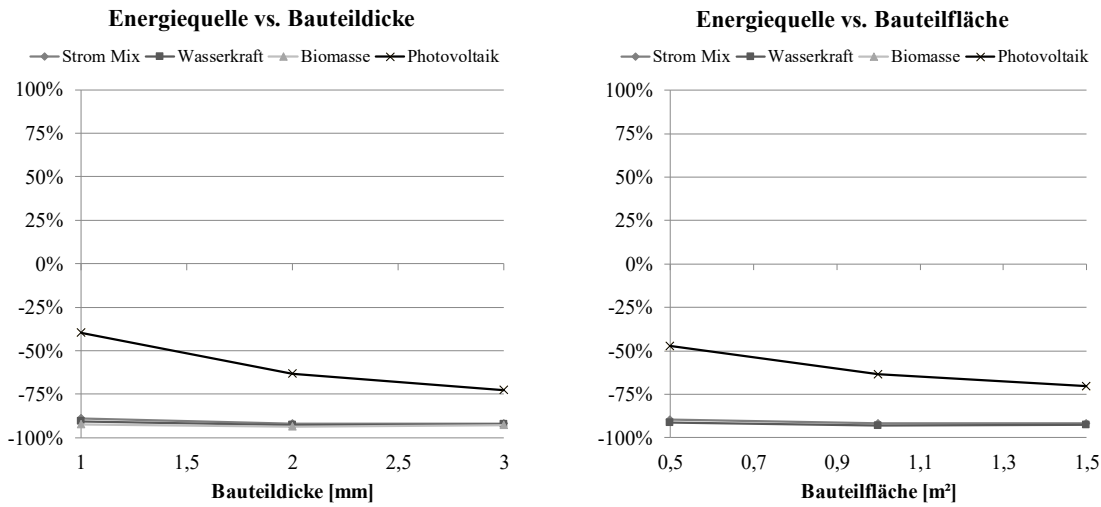


Abb. 6-14: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Energiequelle in der Produktion und Bauteilgeometrie beim ADPe

Fossiler abiotischer Ressourcenverbrauch

Der fossile abiotische Ressourcenverbrauch wird von der Faserherstellung dominiert. Eine Carbonfaserherstellung, die zu minimalen Umweltwirkungen führt, und geringe Verschnitttraten in der Produktion senken den fossilen abiotischen Ressourcenverbrauch (vgl. Abb. 6-15).

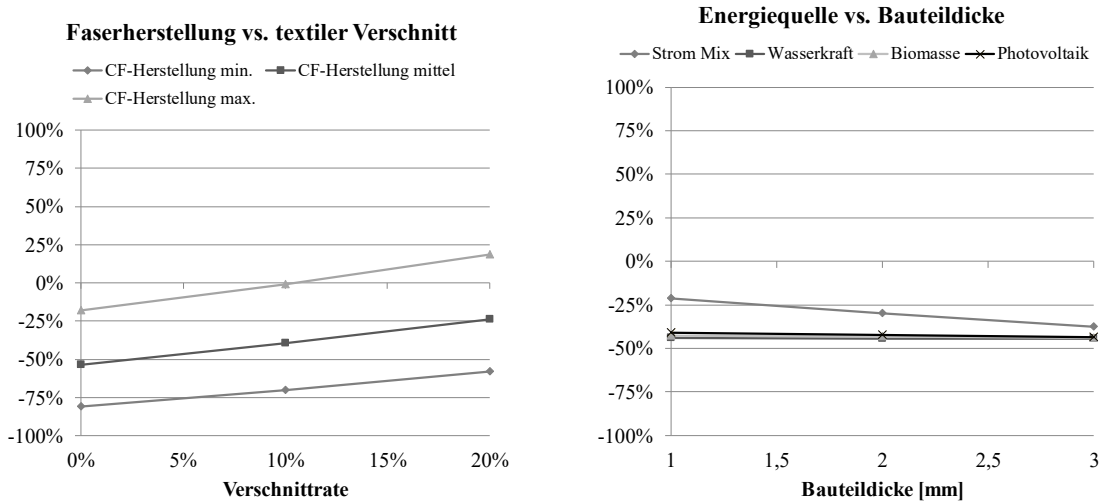


Abb. 6-15: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Faserherstellung und Verschnitt sowie Energiequelle in der Produktion und Bauteildicke beim ADPf

Auch der Einsatz von erneuerbaren Energien in der Produktion, kann zu einer Senkung des fossilen abiotischen Ressourcenverbrauchs beitragen. Die größten Einsparpotentiale werden dabei durch die Verwendung von Strom aus Wasserkraft erzielt. Maßnahmen,

die zu einer Reduktion des gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarfs in der Fertigung führen, wie beispielsweise die Erhöhung der Bauteildicke, -fläche oder die Reduktion der Aushärzeit, senken das Einsparpotential (vgl. Abb. 6-15 rechts). Insgesamt sind die Effekte im Vergleich zu einer optimierten Faserherstellung bzw. zu einer Reduktion der Verschnitttrate aber deutlich geringer (vgl. Abb. 6-16).

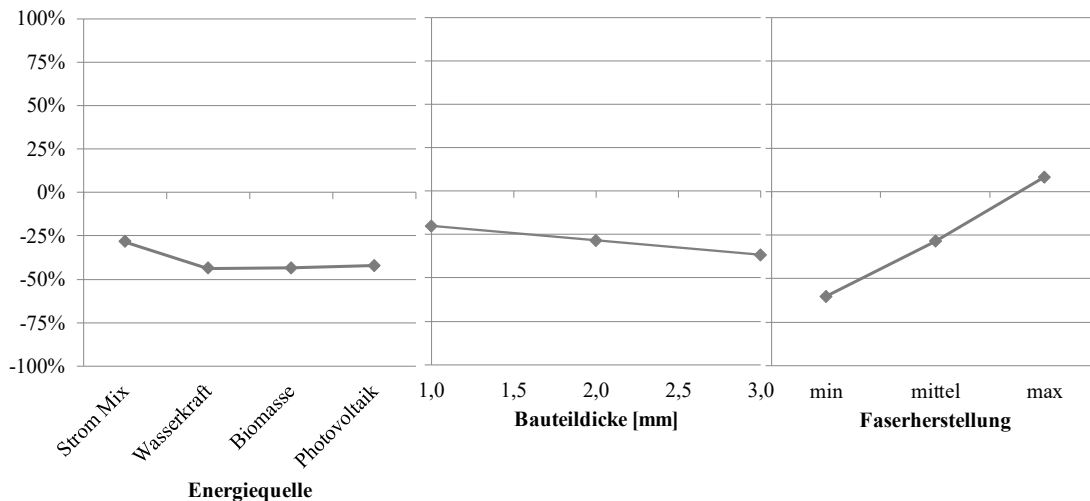


Abb. 6-16: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Energiequelle in der Produktion, der Bauteildicke und der Faserherstellung im Vergleich beim ADPf

Eutrophierungspotential

Über 99% des Eutrophierungspotentials werden bei einem durchschnittlichen Produktionsszenario von der Carbonfaserherstellung verursacht (vgl. Abb. 6-11). Alle zehn dargestellten Effekte resultieren daher aus der Änderung der Umweltwirkungen bei der Faserherstellung, den bei der Fertigungsprozesskette notwendigen Materialbedarf und den Wechselwirkungen dieser beiden Stellgrößen. Eine Senkung des Eutrophierungspotentials ist beispielsweise durch die Produktionseinstellungen in der Faserherstellung mit minimalen Umweltwirkungen zu erreichen. Hierbei hat im Vergleich zu den anderen beiden Datensätzen, die minimale Faserherstellung eine höhere Materialausbeute, d.h. es wird eine geringere Menge an PAN-Fasern benötigt (vgl. Kapitel 6.1.2). Weiterhin ist in Abb. 6-17 zu erkennen, dass das Eutrophierungspotential linear mit der Verschnitttrate zu nimmt und diese einen höheren Einfluss aufweist, als die Faserherstellung selbst.

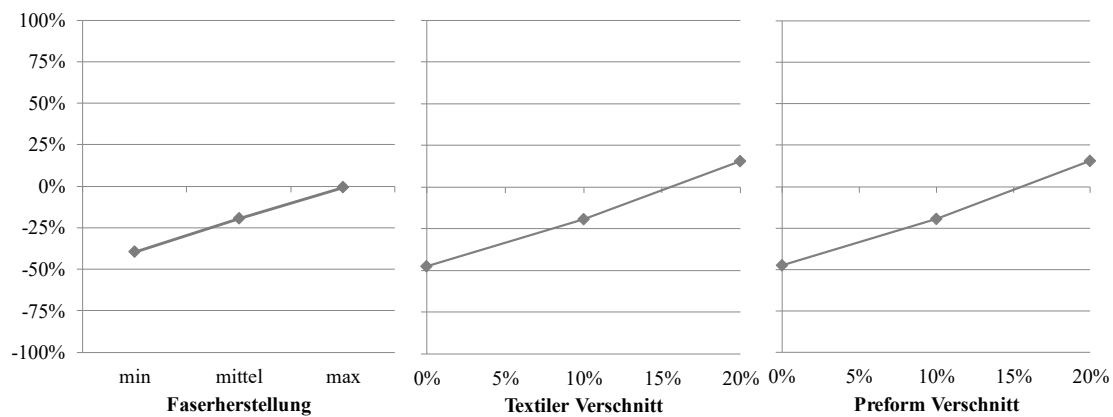


Abb. 6-17: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Faserherstellung und der Verschnitttrate beim EP

Ozonabbaupotential

Ähnlich wie beim Eutrophierungspotential wird über 99% der Umweltwirkung bei einem mittleren Produktionsszenario durch die Faserherstellung verursacht. Zwar wird in Abb. 6-12 als siebt größter Einflussfaktor die Energiequelle in der Bauteilherstellung aufgeführt, dieser Effekt ist im Vergleich zu den Umweltwirkungen in der Faserherstellung und der Verschnitttraten aber deutlich geringer.

Photochemisches Oxidantienbildungspotential

Relevant für den Sommersmog sind die bei der Carbonfaserherstellung entstehenden Emissionen. Obwohl bei einem durchschnittlichen Produktionsszenario die Matrix- und Bauteilherstellung einen Anteil von über 20% haben können (vgl. Abb. 6-11), hat eine Änderung dieser Energie- und Stoffflüsse kaum einen Einfluss auf das POCP. Vielmehr sind der verwendete Faserdatensatz und der anfallende Verschnitt in der Produktion relevant.

Treibhauspotential

Das Treibhauspotential verhält sich wie der fossile Ressourcenverbrauch und wird von der Faserherstellung dominiert. Eine Carbonfaserherstellung, die zu minimalen Umweltwirkungen führt, und eine Reduktion der Verschnitttraten in der Produktion tragen zu einer Senkung des Treibhauspotentials bei (vgl. Abb. 6-18).

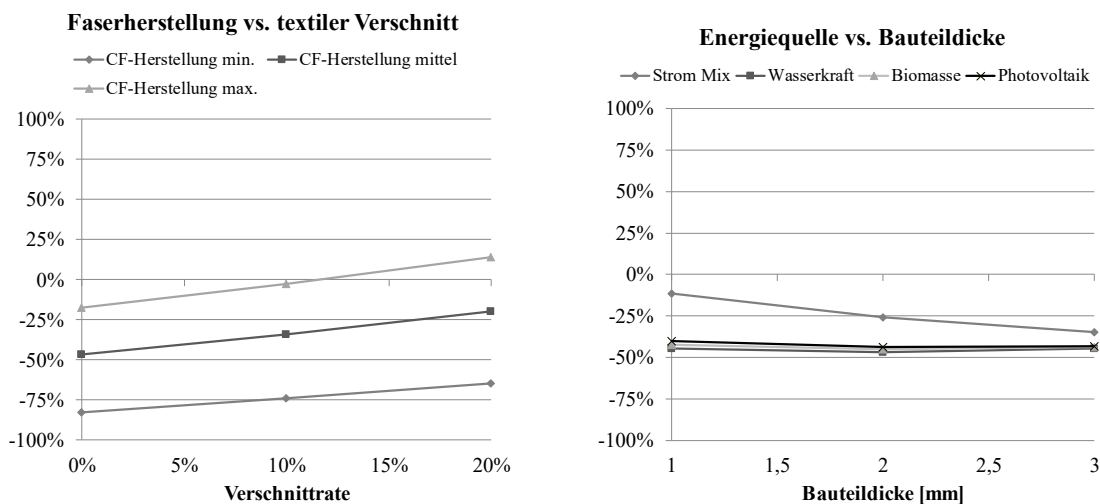


Abb. 6-18: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Faserherstellung und Verschnitt sowie Energiequelle in der Produktion und Bauteildicke beim GWP

Einen deutlich geringeren Einfluss hat die Strombereitstellung in der Produktion. Aber auch hier sind durch den Einsatz von erneuerbaren Energien, insbesondere durch die Nutzung von Wasserkraft, Einsparungen möglich. Maßnahmen, die zu einer Änderung des Prozessenergiebedarfs in der Fertigung führen, verstärken oder reduzieren das Einsparpotential entsprechend (vgl. Abb. 6-18 rechts).

Versauerungspotential

Eine verschnittarme Fertigung und geringe Umweltwirkungen in der Carbonfaserherstellung führen zu einem niedrigen Versauerungspotential. Da bei den Produktionseinstellungen, die zu minimalen Umweltwirkungen führen kaum Stickstoffmonoxide in der Carbonfaserherstellung entstehen und die Materialausbeute hinsichtlich der PAN-Faserbedarf sehr hoch ist, fällt das Versauerungspotential erheblich niedriger als bei den anderen beiden Produktionseinstellungen aus. Eine Reduktion der Verschnitttrate hat dementsprechend auch ein geringeres Einsparpotential (vgl. Abb. 6-19 links). Weiterhin kann auch der Einsatz von erneuerbaren Energien in der Bauteilfertigung zu einer Senkung des Versauerungspotentials beitragen, sofern Wasserkraft oder Photovoltaikanlagen für die Stromerzeugung eingesetzt werden. Strom aus Biomasse führt hingegen zu einem minimalen Anstieg aufgrund der bei der Verbrennung freigesetzten Chlorwasserstoffe, Schwefeldioxide und Stickoxide. Produktionsrandbedingungen, die zu einer Steigerung bzw. Senkung des Prozessenergieverbrauchs in der Fertigung führen, wie beispielsweise die Bauteilgeometrie, verstärken diese Effekte (vgl. Abb. 6-19 rechts). Bei einem dicken Bauteil wird weniger Prozessenergie für die Fertigung von 1 kg CFK benötigt, daher ist hier das Einsparpotential durch die Verwendung von erneuerbaren Energien geringer.

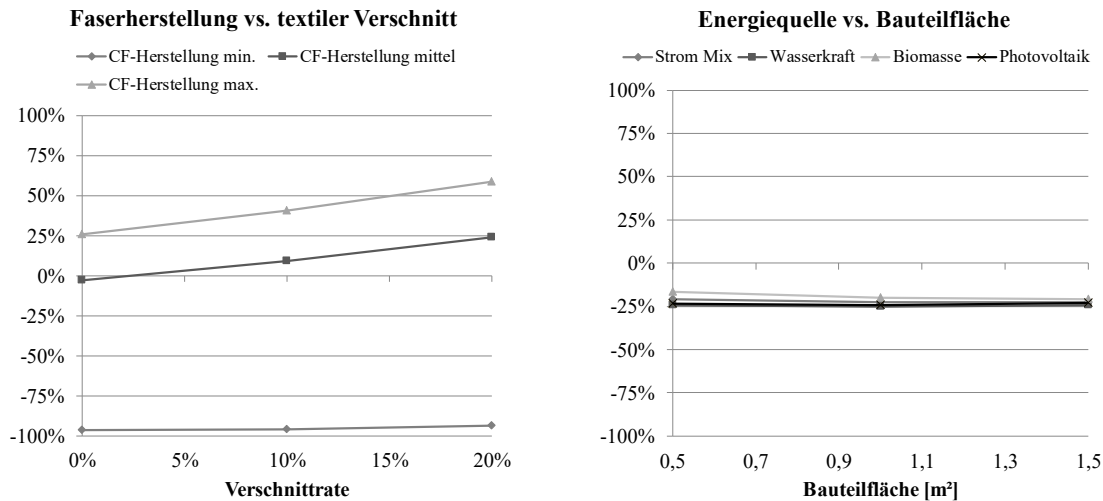


Abb. 6-19: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Faserherstellung und Verschnitt sowie Energiequelle in der Produktion und Bauteildicke beim AP

6.2.3 Bestimmung der Produktionsparameter für minimale und maximale Umweltwirkungen

Aufbauend auf diesen Ergebnissen wurde mit dem statistischen Vorhersagemodell der mögliche Wertebereich für die Wirkungskategorien berechnet, welcher in Tab. 6-8 dargestellt ist.

Tab. 6-8: Prozessfenster der Wirkungskategorien für die SotA duroplastische Fertigungsprozesskette

	Minimum	Maximum
Primärenergiebedarf (nrr., u. H.) [MJ/kg CFK]	249,41	739,53
Elementarer abiotischer Ressourcenverbrauch [kg Sb-Äqv./ kg CFK]	1,57E-05	1,28E-04
Fossiler abiotischer Ressourcenverbrauch [MJ/kg CFK]	235,30	732,25
Eutrophierungspotential [kg Phosphat-Äqv./kg CFK]	3,38	6,76
Ozonabbaupotential [kg R11-Äqv./kg CFK]	6,81E-11	5,65E-10
Photochem. Oxidantienbildungspot. [kg Ethen-Äqv./kg CFK]	-0,17	0,008
Treibhauspotential [kg CO ₂ -Äqv./kg CFK]	13,79	49,15
Versauerungspotential [kg SO ₂ -Äqv./kg CFK]	0,025	0,46

Mithilfe des Wertebereichs konnte eine Rangbildung der Wirkungskategorien erfolgen. Wie auch bei der Carbonfaserherstellung besitzen das Eutrophierungs- und Treibhauspotential die größte ökologische Priorität. Die Produktionsparameter, die zu minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen führen, wurden daher anhand dieser beiden Wirkungskategorien berechnet und sind in Tab. 6-9 aufgeführt.

Tab. 6-9: Produktionsparameter für die duroplastische SotA Fertigungsprozesskette mit minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen

	Minimum	Mittel	Maximum
CF-Herstellung	min	mittel	max
Textiler Verschnitt	0	0,15	0,2
Preform Verschnitt	0	0,06	0,2
Verschnitt Nachbearbeitung	0	0,10	0,1
Matrixreste	0	0,05	0,02* --> 0,1
Energiequelle	Wasserkraft	Strom Mix	Strom Mix
Bauteildicke [mm]	2,26* --> 3	1,86	1
Bauteilfläche [m ²]	0,86* --> 1,5	0,74	0,5
Aushärtezeit [min]	5,72* --> 3	7,20	10

*** Artefakt**

Die Verwendung von Produktionseinstellungen in der Carbonfaser, die zu minimalen Umweltwirkungen führen, eine verschnittfreie Produktion sowie die Verwendung von Wasserkraft in der Fertigung resultieren in minimale Umweltwirkungen für die Fertigung von faserverstärkten Duroplasten. In Tab. 6-9 ist auch zu erkennen, dass für die minimalen Produktionseinstellungen eine Bauteilgeometrie und Aushärtezeit berechnet worden ist, die nicht zu dem niedrigsten gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf führen. Sofern der Strom aus Wasserkraft hergestellt wird, hat der Prozessenergiebedarf nur einen sehr geringen Einfluss auf die Umweltwirkungskategorien. Es handelt sich somit um Artefakte im Vorhersagemodell, die bei Elimination zu einer geringfügigen (< 7%) weiteren Reduktion der Umweltwirkungen führen. Im Gegensatz hierzu muss, um die höchsten Umweltwirkungen hinsichtlich des EP und GWP zu erzielen, bei der Produktion innerhalb des untersuchten Prozessfensters der deutsche Strom Mix eingesetzt werden. Alle Produktionsparameter, die zu einem höheren gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf führen, verstärken diesen Effekt. Die Matrixreste haben hingegen keinen relevanten Einfluss auf das EP und GWP. Die Abweichung von der max. möglichen Einstellung von 0,1 ist daher ein Artefakt.

Die mithilfe des Vorhersagemodells berechneten Umweltwirkungen bzw. Produktionsparameter, wurden darüber hinaus mit dem Ökobilanz-Modell validiert. Dabei konnte bei allen Wirkungskategorien eine gute Übereinstimmung (Abweichung < 8%) festgestellt werden. Eine Ausnahme bildet das POCP, welches bereits bei der Modellgüte eine zu hohe Konditionszahl aufgezeigt hat. Das statistische Modell schätzt die Umweltwirkungen insbesondere im oberen Wertebereich zu gering ein und kann daher nicht für eine Vorhersage herangezogen werden.

In Abb. 6-20 sind die für die entsprechenden Einstellungen mit dem Ökobilanz-Modell erzielten Umweltwirkungen dargestellt, wobei 0% das Minimum und 100% das Maximum des Wertebereichs einer jeden Wirkungskategorie entspricht. In Dunkelgrau sind die Wirkungskategorien mit der höchsten ökologischen Priorität hinterlegt, anhand deren die Produktionsparameter für eine Bauteilfertigung mit minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen bestimmt worden sind.

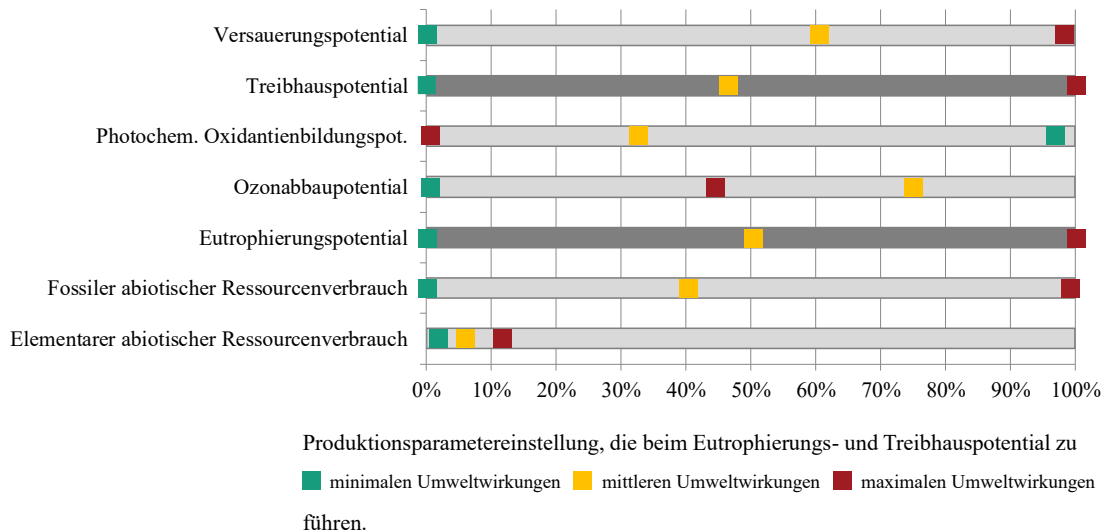


Abb. 6-20: Erzielte Umweltwirkungen aller Wirkungskategorien für ein minimales, mittleres und maximales Produktionsszenario

In Abb. 6-20 ist zu erkennen, dass die Produktionseinstellung die zu einem minimalen, mittleren und maximalen Eutrophierungs- bzw. Treibhauspotential führen, auch ähnliche Ergebnisse beim Versauerungspotential und beim fossilen Ressourcenverbrauch ergeben. Beim Ozonabbaupotential führt das maximale Produktionsszenario nur zu mittleren Umweltwirkungen, was auf die Produktionseinstellungen in der Carbonfaserherstellung zurückzuführen ist. Für die maximalen Umweltwirkungen wurde der Carbonfaserdatensatz mit den höchsten Eutrophierungs- und Treibhauspotential herangezogen, dass sich hieraus ergebene Ozonabbaupotential ist aber geringer als beim mittleren Szenario (vgl. Kapitel 6.1.3). Die Möglichkeit Strom aus einer Photovoltaikanlage für die Fertigung von CFK-Bauteilen zu verwenden, führt zu einer großen Spannweite des elementaren abiotischen Ressourcenverbrauchs. Für das Treibhaus- und Eutrophierungspotential stellt Solarenergie kein Extremum da, so dass dies nicht in den drei ermittelten Produktionsszenarien vorkommt. Dementsprechend wird nur ein geringer Teil des möglichen Prozessfensters durch die Szenarien abgebildet. Beim POCP verhalten sich alle Szenarien invers, d. h. das Produktionsszenario was eigentlich zu niedrigen Umweltwirkungen führen sollte, verursacht einen hohen elementaren Ressourcenverbrauch bzw. Sommersmog. Dieses Verhalten ist wiederum auf den verwendeten Carbonfaserdatensatz zurückzuführen (vgl. Kapitel 6.1.3).

6.3 Verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette

In den Veröffentlichungen Hohmann et al. [17,74] konnte bereits gezeigt werden, dass der Einsatz von materialeffizienten Legetechnologien ein großes Reduktionspotential für die Umweltwirkungen bei der Herstellung von CFK-Strukturen aufweist. In diesem Abschnitt wird eine roboter-basierte 2D Ablage näher betrachtet. Im Ökobilanz-Modell bzw. im Datensatz können zwei unterschiedliche Legesysteme betrachtet werden. Zum einen kann einer Ablage von gespreizten bebinderten Rovings, die am Anfang und am Ende jedes Pfads mit Klebstoff fixiert werden, ausgewählt werden. Zum anderen ist die Analyse einer Anlage möglich, die geslittete und bebinderte Tows verarbeitet. Dabei wird während dem Legen der Binder mit einer Infrarotheizeinheit oder einem Laser für die Fixierung aktiviert. Die anschließenden Prozessschritte sind vergleichbar mit denen der duroplastischen SotA Fertigungsprozesskette.

Um die Prozessschritte zu identifizieren, welche den größten Einfluss auf die Umweltwirkungen haben und daher einen hohen Genauigkeitsgrad aufweisen sollen, wurde zuerst für ein durchschnittliches Produktionsszenario eine Ökobilanzierung durchgeführt. In Tab. 6-10 sind die dafür herangezogenen Produktionsparameter aufgelistet.

Tab. 6-10: Verschnittarme duroplastische Prozesskette – Parametereinstellungen für ein durchschnittliches Produktionsszenario

CF-Herstellung		Materialbedarf		Produktion	
Produktions- gebiet	Global	Textiler Verschnitt (2D)	0,15%	Energiequelle	DE Strom Mix
		Preform Verschnitt (3D)	5%	Bauteilfläche	1 m ²
Energieart	Strom Mix	Verschnitt Nachbearbeitung	5%	Bauteildicke	2 mm
Energiequelle	Strom Mix	Matrixreste	5%	Rovingtyp	24k gespreizt
Transport	Wird be- rücksichtigt			Fixierung	Klebstoff
Materialaus- beute	50%			Pressen- auslastung	80%
Faserdatensatz	1 2			Injektion & Aushärtung	RTM
				Aushärtezeit	5 min
				Vakuum- pumpentyp	120 m ³ /h

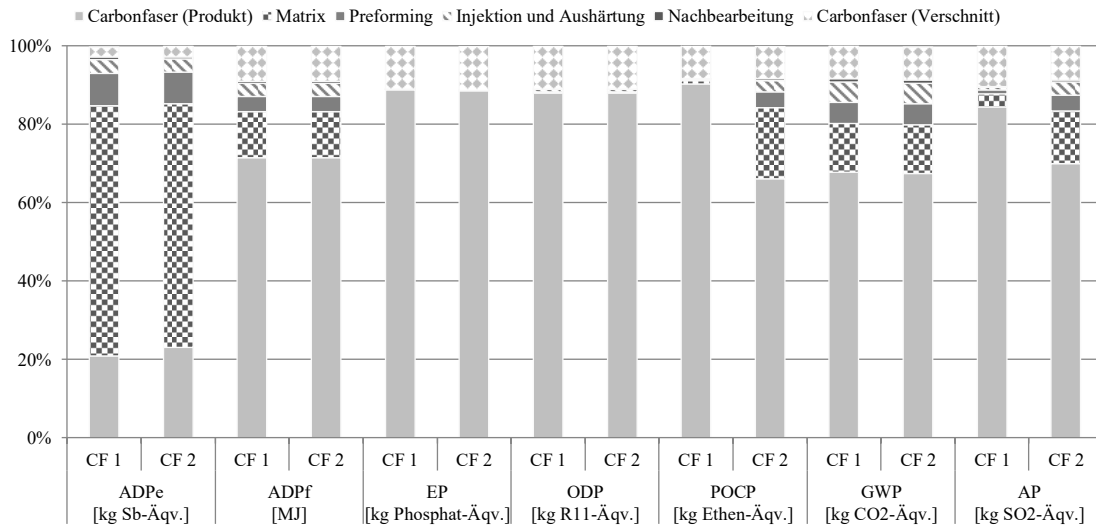


Abb. 6-21: Anteil der Prozessschritte an den Umweltwirkungen von 1 kg CFK, hergestellt mit der verschnittarmen duroplastischen Fertigungsprozesskette jeweils normiert auf die Gesamtumweltwirkungen einer Wirkungskategorie

Aufgrund der geringeren Verschnitttrate (Spulenreste als textiler Verschnitt und Preform Verschnitt) steigt der Einfluss der übrigen Prozessschritte – Matrixherstellung und Bauteilfertigung – geringfügig an. Die Faserherstellung bleibt aber in allen Wirkungskategorien, ausgenommen den elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch, dominierend. Bei letzterem verursacht die Matrixherstellung aufgrund des eingesetzten Natriumchlorids die größten Umweltwirkungen.

6.3.1 Screening umweltrelevanter Produktionsparameter

Bevor in Kapitel 7 ein systematischer Vergleich konventioneller Preformtechnologien mit verschnittarmen Legetechnologien unter Berücksichtigung der Gesamtfertigungsprozesskette erfolgt, werden in diesem Kapitel für diese Prozesskette die Haupteinflussfaktoren bestimmt. Aus den über 50 variierbaren Produktionsparametern konnten erneut mithilfe der Energieeffizienzanalyse [74], die Relevanz vieler Parameter ausgeschlossen werden.

Ähnlich wie bei der SotA Fertigungsprozesskette haben die Bauteilgeometrie und die Aushärtezeit den größten Einfluss auf den gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf. Weiterhin führt die Ablage eines 50k Rovings i.V. zu einem 12k Roving sowie die Verwendung einer IR-Aktivierung zu einem niedrigeren Energiebedarf. Beides ist dem bei einer Klebstofffixierung hohen Druckluftverbrauch für die Kühlung des Legekopfes geschuldet. In Tab. 6-11 sind die Variablen für die Screening-Analyse übersichtlich dargestellt.

Tab. 6-11: Variable Produktionsparameter bei der Screening-Analyse der verschnittarmen duroplastischen CFK-Fertigungsprozesskette

Parameter	Minimaler Wert	Maximaler Wert
CF-Herstellung	Produktionseinstellungen mit minimalen Umweltwirkungen	Produktionseinstellungen mit maximalen Umweltwirkungen
Energiequelle	DE Strom Mix	DE Wasserkraft
Bauteilfläche	0,5 m ²	1,5 m ²
Bauteildicke	1 mm	3 mm
Pressenauslastung	50%	100%
Rovingtyp	12k	50k
Legesystem	Gespreizt und geklebt	Geslittet und aktiviert mit IR
Injektion & Aushärtung	WCM	RTM
Aushärtezeit	3 min	10 min
Vakuumpumpentyp	10 m ³ /h	250 m ³ /h
Preform Verschnitt (3D)	0%	10%
Verschnitt Nachbearbeitung	0%	10%
Matrixreste	0%	10%

Ähnlich wie bei der SotA Fertigungsprozesskette haben die Produktionseinstellungen bei der Carbonfaserherstellung sowie die Verschnitttraten einen relevanten Einfluss auf alle Wirkungskategorien (vgl. Tab. 6-12). Weiterhin sind auch die Strombereitstellung in der Bauteilfertigung und die Bauteilgeometrie relevant. Keine der, aufgrund der eingesetzten Legetechnologien, zusätzlichen variablen Produktionsparameter, wie beispielsweise der Rovingtyp, führen zu einem signifikanten Effekt. Für eine Detailanalyse werden daher die gleichen Parameter wie bei der SotA duroplastischen Fertigungsprozesskette betrachtet.

Tab. 6-12: DFP-RTM Prozesskette – Übersicht der relevanten Effekte

	CF-Herstellung	Energiequelle in der Produktion	Bauteilfläche	Bauteildicke	Pressenauslastung	Rovingtyp	Legesystem	Injektion & Aushärtung	Aushärtezeit	Vakuumpumpentyp	Preform Verschnitt (3D)	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste
PE	x	x	x	x							x	x	
ADPe	x	x	x	x					x		x	x	x
ADPf	x	x	x	x							x	x	

	CF-Herstellung	Energiequelle in der Produktion	Bauteilfläche	Bauteildicke	Pressenauslastung	Rovingtyp	Legesystem	Injektion & Aushärtung	Aushärtezeit	Vakuumpumpentyp	Preform Verschnitt (3D)	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste
EP	x										x	x	
ODP	x	x		x							x	x	
POCP	x										x	x	
GWP	x	x		x							x	x	
AP	x	x									x	x	

6.3.2 Einfluss der Produktionsparameter auf die resultierenden Umweltwirkungen

Für eine detaillierte Analyse der Haupteinflussfaktoren wurde ein statistisches Vorhersagemodell entwickelt. Da die gleichen Variablen wie bei der SotA duroplastischen Fertigungsprozesskette untersucht worden sind und ein ähnlicher Einfluss festgestellt werden konnte, wird auf eine detaillierte Betrachtung jeder Wirkungskategorie verzichtet. In Abb. A-1 im Anhang A-e sind die zehn Produktionsparameter bzw. deren Wechselwirkung aufgetragen, die nach dem Vorhersagemodell zu einer signifikanten Änderung der jeweiligen Wirkungskategorie führen.

Zusammenfassend kann festgestellt werden, dass beim Eutrophierungs-, Ozonabbau- und Photochemischen Oxidantienbildungspotentials bei einem durchschnittlichen Produktionsszenario über 99% der Umweltwirkung durch die Carbonfaserherstellung (Produkt und Verschnitt) verursacht werden. Im Gegensatz zum Ozonabbaupotential sind beim Eutrophierungs- und Photochemischen Oxidantienbildungspotentials die freigesetzten Emissionen während der Faserherstellung für die Wirkung verantwortlich, die Strombereitstellung hat hierbei kaum einen Einfluss. Dementsprechend sind auch bei verschnittarmen Legetechnologien vorrangig die Faserherstellung und der Materialbedarf die Haupteinflussgrößen in diesen beiden Wirkungskategorien. Das Ozonabbaupotential wird hingegen durch die Energiebereitstellung in der Faser- und Bauteilherstellung verursacht. Die Produktionseinstellungen bei der Faserherstellung, die Verschnitttrate und deren Wechselwirkung stellen zwar immer noch die Haupteffekte dar, der Einfluss der Strombereitstellung in der Fertigung und die Interaktion mit den Prozessparametern, die zu einer Änderung des gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarfs führen, nimmt im Vergleich zur SotA duroplastischen Fertigungsprozesskette zu. Beim fossilen abiotischen Ressourcenverbrauch, beim Treibhaus- und beim Versauerungspo-

tentials ist die Energiebereitstellung aufgrund der geringeren Verschnitttrate sogar jeweils unter den ersten vier Haupteffekten. Den größten Einfluss haben allerdings immer noch die Produktionsparameter bei der Faserherstellung. Der Einsatz von erneuerbaren Energien in der Produktion, kann aber deutlich zu einer Senkung der Umweltwirkung beitragen. Die größten Einsparpotentiale in diesen Wirkungskategorien werden dabei durch die Verwendung von Strom aus Wasserkraft erzielt. Maßnahmen, die zu einer Reduktion des Prozessenergiebedarfs in der Fertigung führen, wie beispielsweise die Erhöhung der Bauteildicke, -fläche oder die Reduktion der Aushärtezeit, senken das Einsparpotential (vgl. Abb. 6-22).

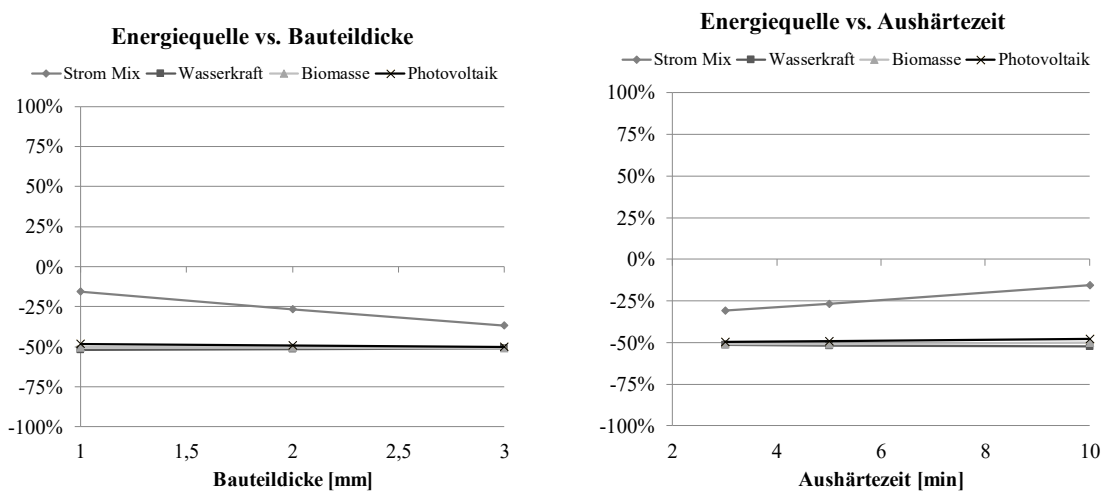


Abb. 6-22: Verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Energiequelle in der Produktion und Aushärtezeit beim GWP

Beim elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch haben wie auch bei der duroplastischen SotA Fertigungsprozesskette die Strombereitstellung in der Bauteilfertigung, die Bauteilgeometrie und die jeweiligen Wechselwirkungen den größten Effekt.

6.3.3 Bestimmung der Produktionsparameter für minimale und maximale Umweltwirkungen

Auf Basis des Vorhersagemodells wurde für das spezifizierte Prozessfenster der maximale Wertebereich der Umweltwirkungen berechnet.

Tab. 6-13: Prozessfenster der Wirkungskategorien für die verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette

	Minimum	Maximum
Primärenergiebedarf (nrr., u. H.) [MJ/kg CFK]	246,03	648,64
Elementarer abiotischer Ressourcenverbrauch [kg Sb-Äqv./ kg CFK]	1,64E-05	1,62E-04
Fossiler abiotischer Ressourcenverbrauch [MJ/kg CFK]	234,30	571,80
Eutrophierungspotential [kg Phosphat-Äqv./kg CFK]	3,44	4,88

	Minimum	Maximum
Ozonabbaupotential [kg R11-Äqv./kg CFK]	6,41E-11	4,19E-10
Photochem. Oxidantienbildungspot. [kg Ethen-Äqv./kg CFK]	-0,123	0,005
Treibhauspotential [kg CO ₂ -Äqv./kg CFK]	13,70	43,13
Versauerungspotential [kg SO ₂ -Äqv./kg CFK]	0,026	0,349

Die in Tab. 6-14 dargestellten minimalen und maximalen Wirkungen wurde für eine Priorisierung der Kategorien herangezogen. Wie auch bei der duroplastischen SotA Fertigungsprozesskette, weist das Eutrophierungs- und Treibhauspotential die höchste ökologische Priorität auf (vgl. Anhang Tab. A-17). Die Prozess- und Produktionsparameter, die zu minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen führen, wurden daher anhand dieser beiden Wirkungskategorien mithilfe des statistischen Vorhersagemodells berechnet und sind in Tab. 6-14 dargestellt.

Tab. 6-14: Produktionsparameter für eine verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette mit minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen

	Minimum	Mittel	Maximum
CF-Herstellung	min	Mittel	Max
Preform Verschnitt	0	0,06	0,1
Verschnitt Nachbearbeitung	0	0,05	0,1
Matrixreste	0	0,05	0,09* --> 0,1
Energiequelle	Wasserkraft	Strom Mix	Strom Mix
Bauteildicke [mm]	1,2* --> 3	1,4	1
Bauteilfläche [m ²]	1* --> 1,5	0,5	0,5
Aushärtezeit [min]	10* --> 3	3,4	10

*** Artefakt**

Die Verwendung von Produktionseinstellungen in der Carbonfaserherstellung, die zu minimalen Umweltwirkungen führen, eine verschnittfreie Produktion sowie die Verwendung von Strom aus Wasserkraft in der Fertigung ergeben sehr niedrige Umweltwirkungen für die Produktion von faserverstärkten Duroplasten. Wie auch bei der SotA Fertigungsprozesskette konnten keine Interaktionen zwischen den Bauteilfertigungsparametern festgestellt werden. D.h. alle Parameter, die jeweils zu einem niedrigen Prozessenergiebedarf führen, tragen auch in Kombination zu einer Gesamtreduktion der Umweltwirkungen bei. Weiterhin konnten für Produktionsparameter, die kaum einen Einfluss auf das Eutrophierungs- und Treibhauspotential haben, Artefakte im Vorhersagemodell festgestellt werden. So wurde für die minimalen Umweltwirkungen, dargestellt in Tab. 6-14, eine Bauteilgeometrie und Aushärtezeit bestimmt, die nicht mit dem geringsten gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf einhergeht. In Kombination mit

Strom aus Wasserkraft sind die Effekte so gering, dass diese nicht richtig im Vorhersagemodell dargestellt werden können. Werden die Artefakte korrigiert, erfolgt nur eine geringfügige Reduktion der Umweltwirkungen ($< 8\%$). Zur Erreichung der maximalen Umweltwirkungen muss der Strom Mix aus Deutschland eingesetzt werden. Dementsprechend führen neben den im Prozessfenster vorgegebenen maximalen Verschnittsraten, auch die weiteren Prozessparameter wie eine lange Aushärtezeit oder eine kleine Bauteilgeometrie zu einem hohen Treibhauspotential.

Darüber hinaus wurden die mithilfe des Vorhersagemodells berechneten Umweltwirkungen bzw. Produktionsparameter, mit dem Ökobilanz-Modell validiert. Dabei konnte bei allen Wirkungskategorien eine gute Übereinstimmung (Abweichung $< 8,5\%$) festgestellt werden.

In Abb. 6-23 sind die erzielten Umweltwirkungen für die entsprechenden Einstellungen dargestellt, wobei 0% das Minimum und 100% das Maximum des Wertebereichs einer jeden Wirkungskategorie entspricht.

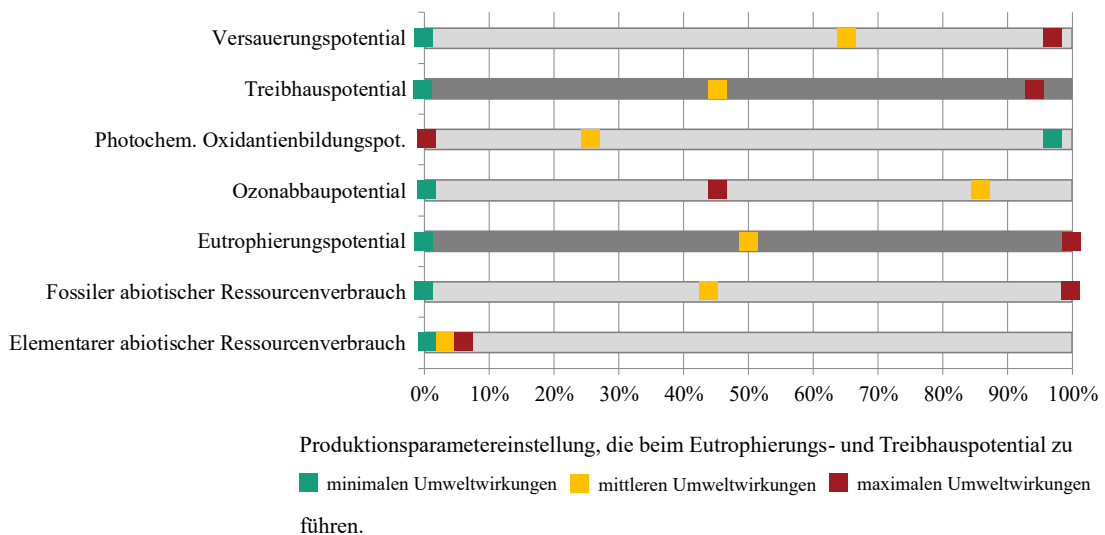


Abb. 6-23: Erzielte Umweltwirkungen aller Wirkungskategorien für ein minimales, mittleres und maximales Produktionsszenario

In Abb. 6-23 ist zu erkennen, dass die Produktionseinstellung die zu einem minimalen, mittleren und maximalen Eutrophierungs- bzw. Treibhauspotential führen, auch ähnliche Ergebnisse beim fossilen Ressourcenverbrauch und Versauerungspotential ergeben. Beim Ozonabbaupotential führt das maximale Produktionsszenario nur zu mittleren Umweltwirkungen, was auf die Produktionseinstellungen in der Carbonfaserherstellung zurückzuführen ist. Für die maximalen Umweltwirkungen wurde der Carbonfaserdatensatz mit den höchsten Eutrophierungs- und Treibhauspotential herangezogen, dass sich hieraus ergebende Ozonabbaupotential ist aber geringer als beim mittleren Szenario (vgl. Kapitel 6.1.3). Die Möglichkeit Strom aus einer Photovoltaikanlage für die Fertigung von CFK-Bauteilen zu verwenden, führt zu einer großen Spannweite des elemen-

taren abiotischen Ressourcenverbrauchs. Für das Treibhaus- und Eutrophierungspotential stellt Solarenergie kein Extremum dar, so dass dies nicht in den drei ermittelten Produktionsszenarien vorkommt. Dementsprechend wird nur ein geringer Teil des möglichen Prozessfensters durch die Szenarien abgebildet. Beim POCP verhalten sich alle Szenarien invers, d. h. das Produktionsszenario was eigentlich zu niedrigen Umweltwirkungen führen sollte, verursacht einen hohen Sommersmog. Dieses Verhalten ist wiederum auf den verwendeten Carbonfaserdatensatz zurückzuführen (vgl. Kapitel 6.1.3). Das POCP weist aber eine geringe ökologische Priorität auf (vgl. Tab. A-43 Anhang f).

6.4 SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette

Neben der Analyse von duroplastischen Fertigungsprozessketten, erfolgt eine detaillierte Bewertung der Umweltwirkungen bei der Herstellung von faserverstärkten Thermoplasten. Für den Stand der Technik wird die Umformung eines Organoblechs betrachtet. Dabei wird das Organoblech durch eine IR-Heizeinheit auf knapp über die Schmelztemperatur erwärmt, danach in das formgebende Werkzeug transferiert und mit einer Presse umgeformt. Das Werkzeug ist isotherm temperiert, um einen definierten Kristallisationsgrad zu gewährleisten. Die vorherige Herstellung des Organoblechs erfolgt in einer Intervall-Heißpresse, welche ein Carbonfasergewebe und eine PA6-Folie miteinander verpresst. Bevor der Einfluss unterschiedlicher Produktionsparameter auf die Umweltwirkung einer faserverstärkten Thermoplaststruktur ermittelt wird, ist für ein durchschnittliches Produktionsszenario in Abb. 6-24 der Anteil der Prozessschritte an den jeweiligen Umweltwirkungen wiedergeben. Eine Übersicht der hierfür herangezogenen Produktionsparameter kann Tab. 6-15 entnommen werden.

Tab. 6-15: SotA thermoplastische Prozesskette – Parametereinstellungen für ein durchschnittliches Produktionsszenario

CF-Herstellung		Materialbedarf		Produktion Organoblech	
Produktionsgebiet	Global	Textiler Verschnitt (2D)	0%	Energiequelle	DE Strom Mix
Energieart	Strom Mix	Preform Verschnitt (3D)	20%	Bauteilfläche	1 m ²
Energiequelle	Strom Mix			Bauteildicke	2 mm
Transport	Wird berücksichtigt	Verschnitt Nachbearbeitung	5%	Imprägnierdruck	40 bar
Materialausbeute	50%	Matrixreste	5%	Imprägnierdauer (Zone 1 Zone 2)	10 min 10 min
Faserdatensatz	1 2			Imprägniertemperatur (Zone 1 Zone 2)	280 °C 80 °C
				Intervall-Heißpresse	elektrisch

In Abb. 6-24 ist ersichtlich, dass unabhängig vom verwendeten Datensatz die Carbonfaserherstellung alle Wirkungskategorien dominiert. Während beim Eutrophierungspotential weder die Matrixherstellung noch die nachfolgenden Prozessschritte einen Einfluss haben, weisen diese in den anderen Wirkungskategorien einen Anteil von max. 35% auf. Insbesondere beim elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch und beim Treibhauspotential trägt die Matrixherstellung bis zu 20% und der Prozessenergiebedarf bei der Organoblechherstellung, Umformung und Nachbearbeitung bis zu 15% zur Umweltwirkung bei. Die Anteile der Prozessschritte an den Umweltwirkungen sind beim Faserdatensatz 2 nahezu identisch. Ausgenommen sind die Wirkungskategorien Photochemisches Oxidantienbildungspotential und das Versauerungspotential. Beide Umweltwirkungen werden beim Faserdatensatz 1 durch die in der Carbonfaserherstellung freigesetzten Stickstoffmonoxide dominiert. Entsteht hingegen molekularer Stickstoff, wie das beim Faserdatensatz 2 angenommen wird, hat auch die Matrixherstellung und die weiteren Fertigungsprozessschritte einen Einfluss auf die beiden Wirkungskategorien.

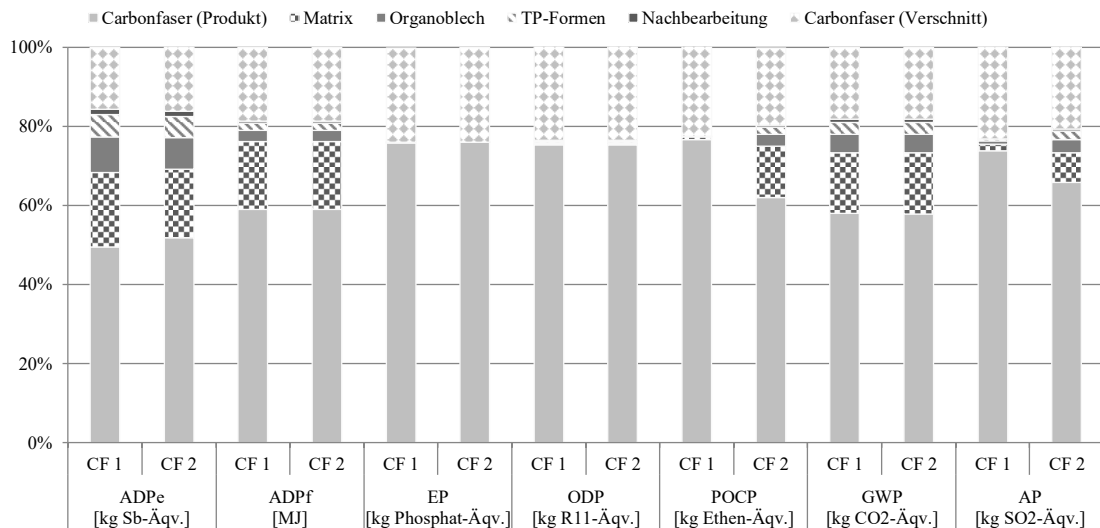


Abb. 6-24: Anteil der Prozessschritte an den Umweltwirkungen von 1 kg CFK, hergestellt mit der thermoplastischen SotA Fertigungsprozesskette, jeweils normiert auf die Gesamtumweltwirkungen einer Wirkungskategorie

6.4.1 Screening umweltrelevanter Produktionsparameter

Das in Kapitel 4 vorgestellte Ökobilanz-Modell erlaubt die Analyse von vier unterschiedlichen faserverstärkten Thermoplast Fertigungsprozessketten. Bei jeder Prozesskette können über 30 Parameter variiert werden. Aufgrund dieser Vielzahl werden nur Prozessparameter bei der Untersuchung berücksichtigt, die entweder einen Einfluss auf den Materialfluss haben oder eine Änderung des gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarfs in der Bauteilfertigung größer 10% bewirken. Letzteres ist der Veröffentlichung

Hohmann et al. [74] zu entnehmen. In diesen Untersuchungen konnte festgestellt werden, dass wie auch bei der duroplastischen Fertigungsprozesskette, der gewichtsspezifische Prozessenergiebedarf von der Bauteilgeometrie beeinflusst wird. Zwar muss für die Verarbeitung einer größeren Bauteilfläche eine größere Werkzeugmasse bei der Umformung erwärmt werden, der zusätzliche Energiebedarf fällt aber deutlich geringer aus, als die Gewichtszunahme des Bauteils. Bei den übrigen Fertigungstechnologien (IR-Heizstrecke, hydraulische Presse) ist der Energieverbrauch von der Bauteilgeometrie unabhängig. Grund hierfür ist, dass im Rahmen des untersuchten Prozessfensters, die Prozesszeiten nicht von der Bauteilgeometrie abhängig sind. Ein größeres bzw. dickeres Bauteil führt aufgrund dieser Annahme daher zu einem geringeren gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf.

Im Vergleich zur duroplastischen Prozesskette stellt dies aber nicht den größten Stellhebel für eine energieeffiziente Fertigung dar. In Kapitel 4.3.2 konnte anhand unterschiedlicher Versuchsreihen gezeigt werden, dass die Art der Beheizung bei einer Intervall-Heißpresse einen entscheidenden Einfluss auf den Energieverbrauch dieser hat. Diese konnte im Rahmen der Energieeffizienzanalyse bestätigt werden. Weiterhin führen beispielsweise ein höheres Flächengewicht und Pressenauslastung sowie kürzere Prozesszeiten und ein niedriger Prozessdruck bei der Organoblechherstellung zu einem geringeren gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf.

Alle betrachteten variablen Produktionsparameter in der Screening-Analyse sowie das entsprechende Prozessfenster kann Tab. 6-16 entnommen werden.

Tab. 6-16: Variable Produktionsparameter bei der Screening-Analyse der SotA thermoplastischen CFK-Fertigungsprozesskette

Parameter	Minimaler Wert	Maximaler Wert
CF-Herstellung	Produktionseinstellungen mit minimalen Umweltwirkungen	Produktionseinstellungen mit maximalen Umweltwirkungen
Energiequelle	DE Strom Mix	DE Wasserkraft
Bauteilfläche	0,5 m ²	1,5 m ²
Bauteildicke	1 mm	3 mm
Pressenauslastung	50%	100%
Flächengewicht Gewebe	125 g/m ²	500 g/m ²
Pressentyp	Elektrisch beheizt	Öl beheizt
Prozesszeit Imprägnierung	Jeweils 5 min	Jeweils 5 min
Prozessdruck Imprägnierung	20 bar	60 bar
IR-Heizfeld	Quarz; 1,5 x Bauteilfläche	Keramik; 6 x Bauteilfläche
Organoblech Verschnitt	0%	40%
Verschnitt Nachbearbeitung	0%	10%
Matrixreste	0%	10%

In Tab. 6-17, sind die Produktionsparameter, bei denen ein relevanter Effekt berechnet werden konnte, für jede Wirkungskategorie dargestellt und entsprechend mit einem Kreuz gekennzeichnet. Hierbei ist ersichtlich, dass die Haupteinflussgrößen, die Faserherstellung, der Verschnitt beim Organoblech, die Energiequelle in der Produktion und die Art der Beheizung der Intervall Heißpresse für die Organoblechherstellung sind. Beim Eutrophierungspotential ist darüber hinaus der Verschnitt bei der Nachbearbeitung und beim elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch die Bauteildicke, die Pressenauslastung und Prozesszeit sowie der Prozessdruck bei der Organoblechherstellung relevant. Diese Ergebnisse scheinen trotz einer schlechten Modellgüte plausibel, da sie zum einen ähnliche Erkenntnisse, wie bei der duroplastischen Fertigungsprozesskette liefern. Zum anderen ist auch eine gute Übereinstimmung mit den Ergebnissen der Energieeffizienzanalyse gegeben.

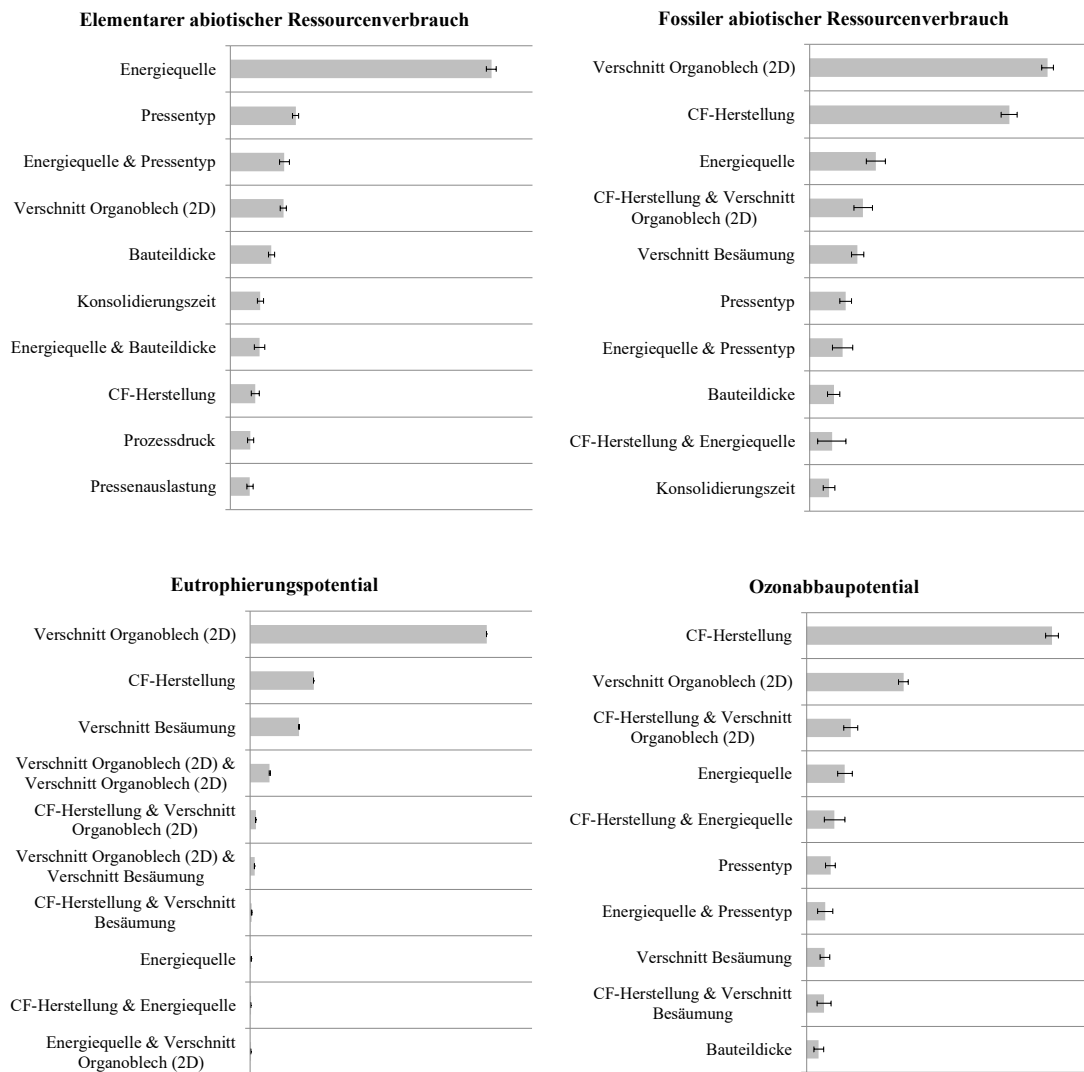
Für eine detaillierte Betrachtung der Produktionsparameter und deren Wechselwirkung können daher die Matrixreste, das Flächengewicht des textilen Gewebes, die Bauteilfläche und das IR-Heizfeld vernachlässigt werden.

Tab. 6-17: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Übersicht der relevanten Effekte

	CF-Herstellung	Verschnitt Organoblech	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste	Energiequelle	Bauteildicke	Bauteilfläche	Flächengewicht	Intervall Heißpresse	Pressenauslastung	Prozesszeit Organoblech	Prozessdruck	IR-Heizfeld
PE	x	x			x				x				
ADPe	x	x			x	x			x	x	x	x	
ADPf	x	x			x				x				
EP	x	x	x										
ODP	x	x			x				x				
POCP	x	x											
GWP	x	x			x				x				
AP	x	x			x				x				

6.4.2 Einfluss der Produktionsparameter auf die resultierenden Umweltwirkungen

Für die in der Screening-Analyse neun identifizierten Produktionsparameter, die einen Haupteinfluss auf die Umweltwirkungen haben, wurde ein statistisches Vorhersagemodell entwickelt, was eine Detailanalyse der Parameter und möglicher Interaktionen erlaubt. Die berechneten Haupteffekte sind in Abb. 6-25 dargestellt.



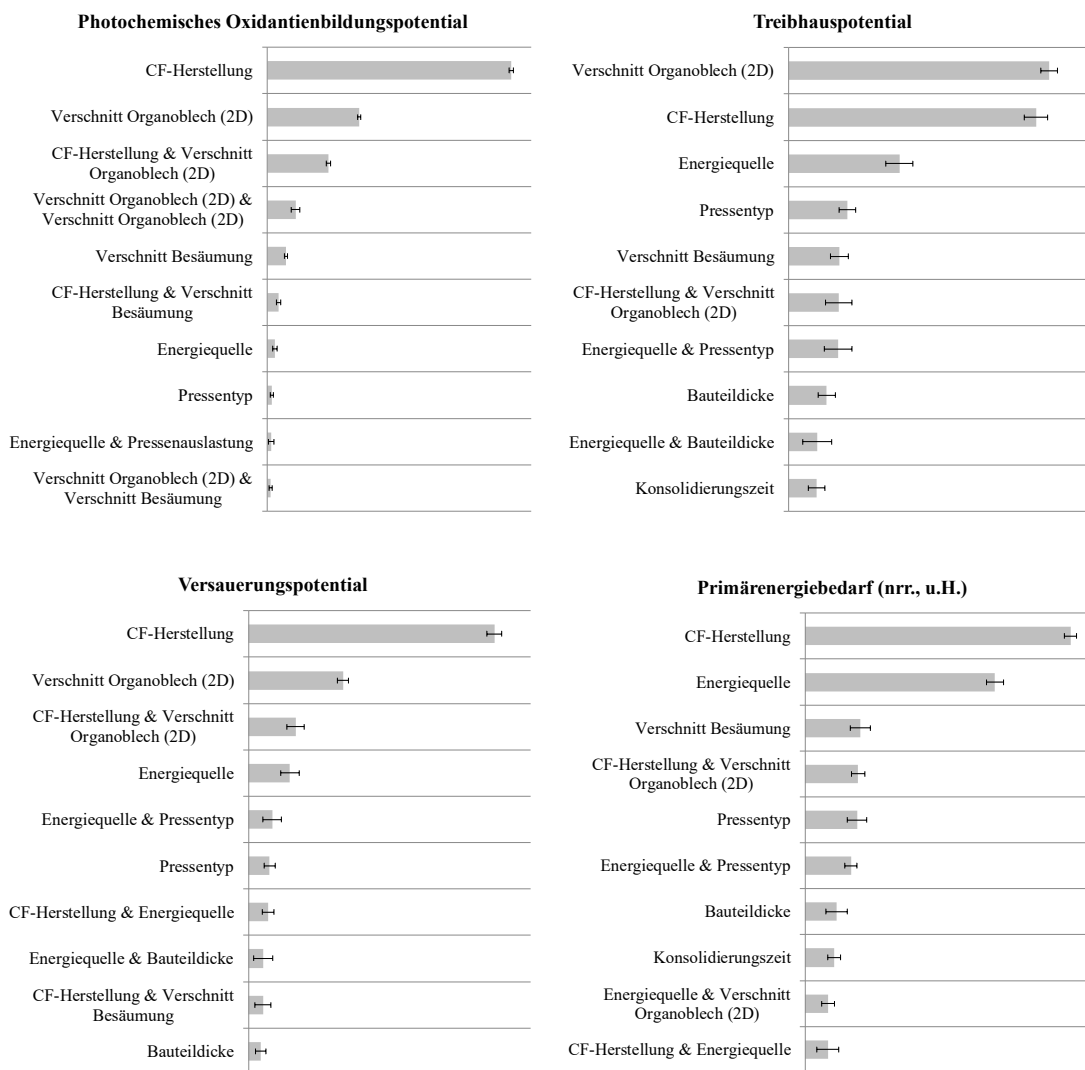


Abb. 6-25: Detailanalyse SotA thermoplastischer CFK-Fertigungsprozesskette – Effekte der Produktionsparameter auf die Umweltwirkung

Wie auch bei den duroplastischen Fertigungsprozessketten können die Ergebnisse in drei Kategorien unterteilt werden. Das Eutrophierungspotential und Photochemische Oxidantienbildungspotential werden vorrangig von der Carbonfaserherstellung dominiert. Den größten Einfluss in diesen Wirkungskategorien haben daher die Produktionseinstellungen bei der Faserherstellung und der Materialbedarf in der Bauteilfertigung sowie die Interaktion dieser beiden Variablen. Während beim Eutrophierungspotential eine Reduktion der Verschnitttrate und niedrige Umweltwirkungen in der Faserherstellung zu einer Senkung führen, ist in Abb. 6-26 rechts für das Photochemische Oxidantienbildungspotential ein anderes Verhalten erkennbar. Grund hierfür ist, dass die Produktionsrandbedingungen bei der Faserherstellung, die beim Eutrophierungspotential zu niedrigen Umweltwirkungen führen, eine signifikante Erhöhung des Sommersmogs zur Folge haben. Eine mittlere bzw. maximale Carbonfaserherstellung bewirkt hingegen ein geringes Photochemisches Oxidantienbildungspotential. Bei Letzteren werden in der

Faserherstellung Stickstoffmonoxide freigesetzt, die zu einer Reduktion des Sommersmogs beitragen. Daher sinkt, wie in Abb. 6-26 rechts zu sehen ist, mit steigender Verschnitttrate das POCP.

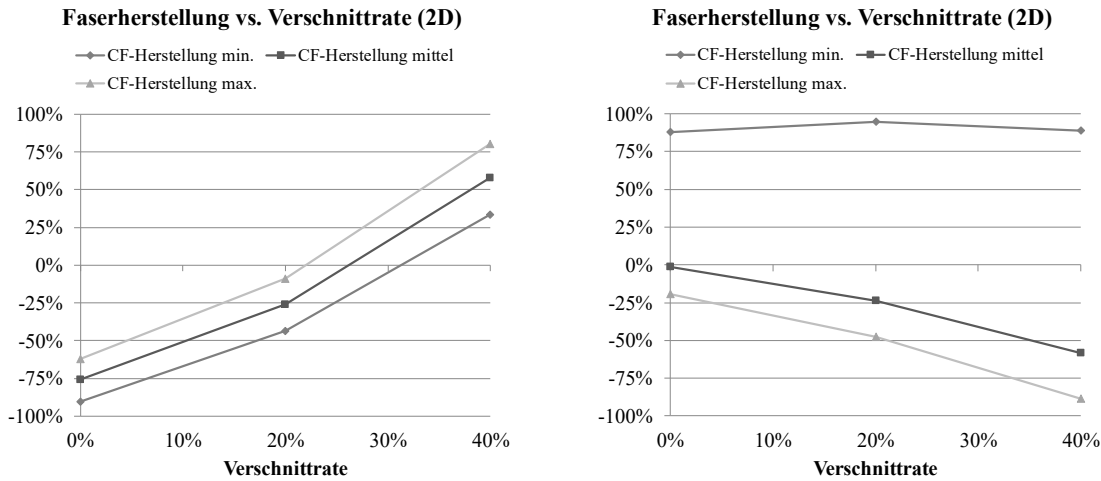


Abb. 6-26: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Produktionsparameter in der Faserherstellung und Materialbedarf in der Produktion beim Eutrophierungspotential (links) und beim POCP (rechts)

Weiterhin ist die Strombereitstellung in der Produktion zwar an sechster bzw. siebter Stelle der Haupteffekte, der Einfluss ist im Vergleich zu den anderen Parametern aber deutlich geringer (vgl. Abb. 6-27)

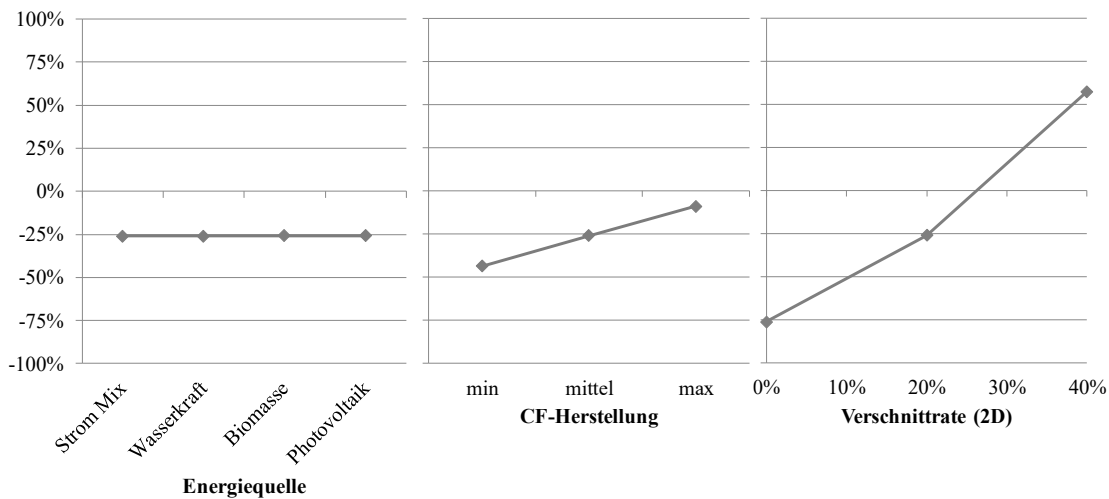


Abb. 6-27: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Energiequelle in der Produktion, der Faserherstellung und der Verschnitttrate im Vergleich beim EP

Die zweite Ergebniskategorie umfasst den fossilen abiotischen Ressourcenverbrauch, das Ozonabbau-, das Treibhaus- und das Versauerungspotential. Auch bei diesen vier Wirkungskategorien haben die Produktionseinstellungen in der Faserherstellung und die Verschnitttrate in der Bauteilfertigung den größten Einfluss. Daher kann durch minimale Umweltwirkungen in der Faserherstellung und durch eine Reduktion der Verschnitttrate

in der Bauteilfertigung die Umweltwirkungen gesenkt werden. Im Gegensatz zum Eutrophierungspotential, wirkt sich aber auch der Einsatz von erneuerbaren Energien in der Bauteilfertigung deutlich positiv aus (vgl. Abb. 6-28).

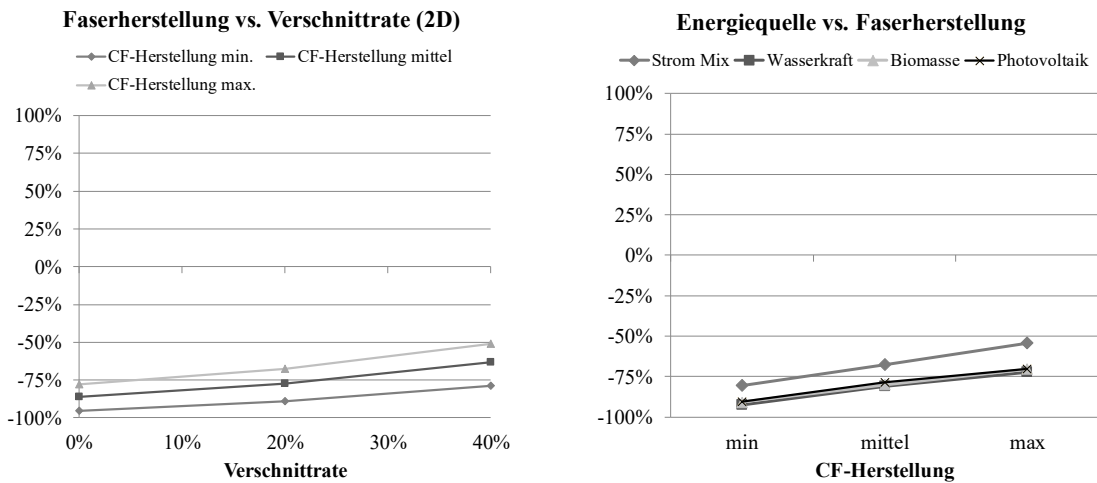


Abb. 6-28: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Produktionsparameter in der Faserherstellung und Materialbedarf bzw. Energiequelle in der Produktion beim GWP

D.h. die Strombereitstellung sowie Prozessparameter, die zu einer Änderung des Prozessenergiebedarfs in der Bauteilfertigung führen, gewinnen an Bedeutung. Bei letzterem sind insbesondere der für die Organoblechherstellung eingesetzte Pressentyp, die Bauteildicke und die Konsolidierungszeit relevant (vgl. Abb. 6-29).

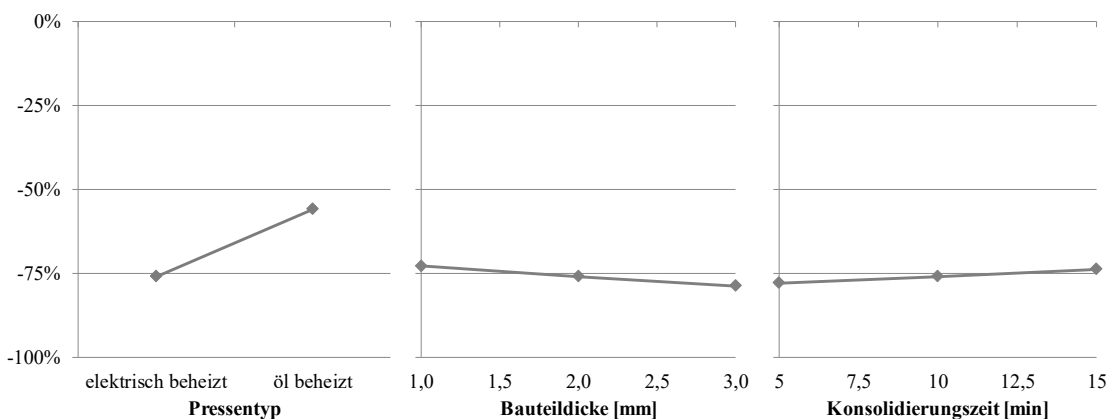


Abb. 6-29: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss des Pressentyps, der Bauteildicke und der Konsolidierungszeit im Vergleich beim GWP

Wird in der Bauteilfertigung erneuerbare Energien für die Strombereitstellung eingesetzt, haben Maßnahmen die zur Reduktion des Prozessenergiebedarfs in der Fertigung führen, wie beispielsweise die Reduktion der Konsolidierungszeiten, keinen signifikanten Einfluss mehr auf die Umweltwirkungen.

Der elementare abiotische Ressourcenverbrauch wird vorrangig von der Art der Strombereitstellung sowie die Prozessparameter, die zu einer Änderung des Prozessenergiebedarfs in der Bauteilfertigung führen beeinflusst (vgl. Abb. 6-30).

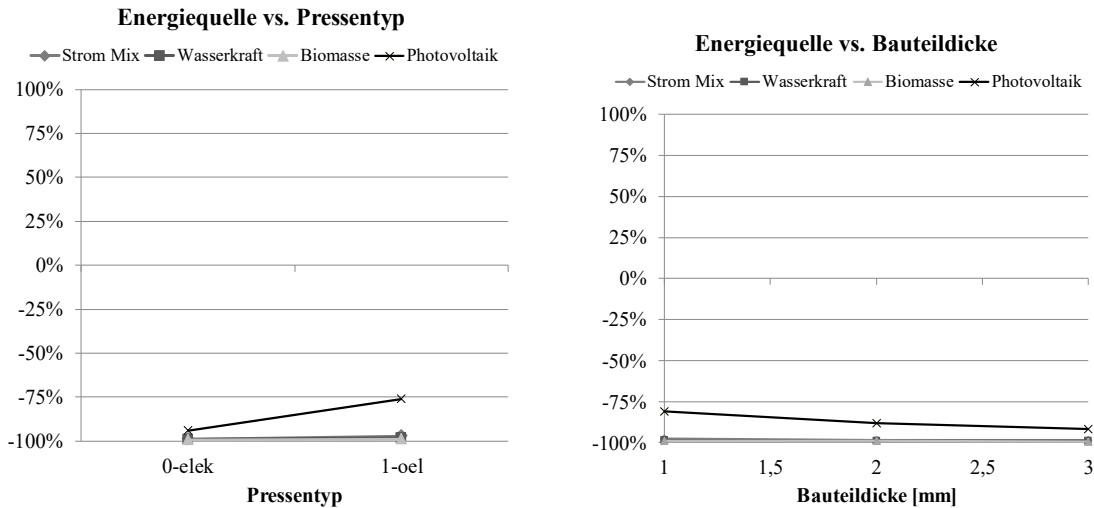


Abb. 6-30: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Wechselwirkung Energiequelle in der Produktion und eingesetzter Pressentyp bzw. Bauteildicke beim ADPe

Der Verschnitt stellt nur den viertgrößten Haupteffekt dar. Der Einfluss der Verschnitttrate ist daher wie in Abb. 6-31 zu erkennen ist relativ gering.

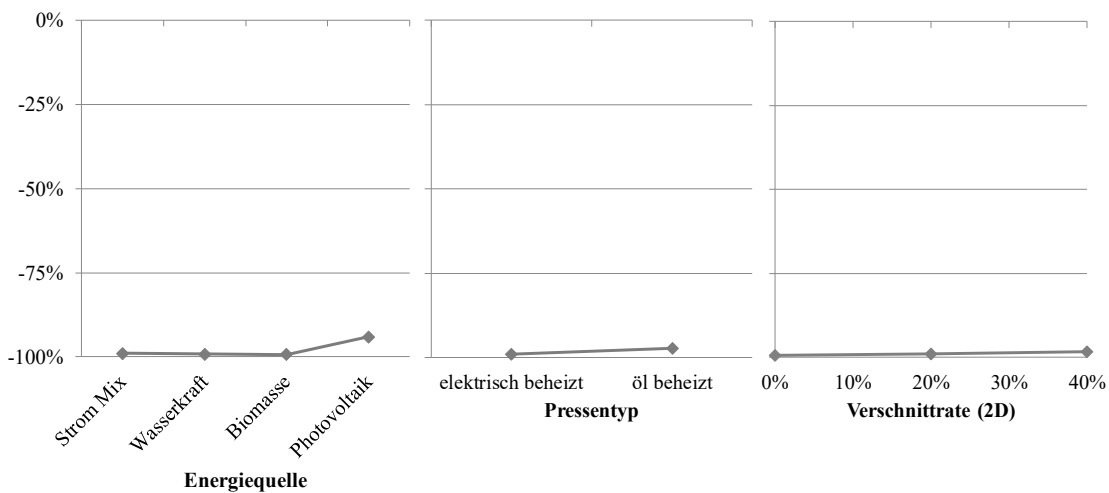


Abb. 6-31: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Energiequelle in der Produktion, des Pressentyps und der Verschnitttrate im Vergleich beim ADPe

6.4.3 Bestimmung der Produktionsparameter für minimale und maximale Umweltwirkungen

Weiterhin konnte mithilfe des Vorhersagemodells der maximal mögliche Wertebereich der jeweiligen Wirkungskategorien bestimmt werden (vgl. Tab. 6-18). Auffällig ist hier-

bei die im Vergleich zu den bisher untersuchten Fertigungsprozessketten große Spannweite bei Energierlevanten Wirkungskategorien, wie dem fossilen abiotischen Ressourcenverbrauch und das Treibhauspotential. Grund hierfür ist u.a. der große Wertebereich beim gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf in der Fertigung, welcher hauptsächlich durch die Art der Pressenbeheizung bei der Organoblechherstellung (vgl. Kapitel 4.3.2) verursacht wird. Auf Basis der in Tab. 6-18 angegebenen Werte, wurde die ökologische Priorität der einzelnen Wirkungskategorien bestimmt, wobei das Treibhaus- und Eutrophierungspotential die höchste Priorität aufzeigten.

Tab. 6-18: Prozessfenster der Wirkungskategorien für die SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette

	Minimum	Maximum
Primärenergiebedarf (nrr., u. H.) [MJ/kg CFK]	261,27	2073,68
Elementarer abiotischer Ressourcenverbrauch [kg Sb-Äqv./ kg CFK]	4,84E-06	0,00080
Fossiler abiotischer Ressourcenverbrauch [MJ/kg CFK]	250,043	1657,66
Eutrophierungspotential [kg Phosphat-Äqv./kg CFK]	3,41	7,29
Ozonabbaupotential [kg R11-Äqv./kg CFK]	6,79E-11	8,64E-10
Photochem. Oxidantienbildungspot. [kg Ethen-Äqv./kg CFK]	-0,1856	0,0157
Treibhauspotential [kg CO ₂ -Äqv./kg CFK]	14,10	144,04
Versauerungspotential [kg SO ₂ -Äqv./kg CFK]	0,023	0,59

Die Produktionsrandbedingungen, die zu minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen führen, wurden daher über die Zielvorgabe des Eutrophierungs- und Treibhauspotentials im Vorhersagemodell definiert. Die Ergebnisse können Tab. 6-19 entnommen werden. Hierbei ist ersichtlich, dass neben minimalen Umweltwirkungen in der Faserherstellung, auch die Verwendung von Wasserkraft sowie eine verschnittfreie Produktion zu minimalen Umweltwirkungen führen. Das Vorhersagemodell konnte allerdings die Prozessparameter, die zu einer Änderung des gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarfs in der Bauteilfertigung führen, nicht exakt bestimmen. Bei der Verwendung von erneuerbaren Energien sind die Einsparpotentiale durch eine höhere Wandstärke und kürzeren Konsolidierungszeiten so gering, dass dies zu Artefakten im Modell führen. Eine Überprüfung im Ökobilanz-Modell zeigt, dass die Änderung der Bauteildicke und Konsolidierungszeit für die definierenden Wirkungskategorien keinen relevanten Unterschied ergab. Der elementare abiotische Ressourcenverbrauch, aufgrund des geringeren Energiebedarfs, aber deutlich (35%) im Vergleich zu den vorhergesagten minimalen Prozesseinstellungen gesenkt werden konnte. Weiterhin wurde ein Vergleich der Umweltwirkung berechnet über das Vorhersagemodell und dem Ökobilanz-Modell durchgeführt (vgl. Tab. A-50 im Anhang A-g). Trotz einer hohen Modellgüte (vgl. Tab. A-36) konnten beim POCP, ODP und AP größere Abweichungen festgestellt werden. Bei allen drei Wirkungskategorien wurden die Umweltwirkungen zu niedrig berechnet.

Zur Bewertung der Haupteinflussgrößen und der Wechselwirkungen kann das Vorhersagemodell herangezogen werden, für die Quantifizierung der realen Umweltwirkungen sollte aber das Ökobilanz-Modell verwendet werden.

Tab. 6-19: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Produktionsparameter für minimale, mittlere und maximale Umweltwirkungen

	Minimum	Mittel	Maximum
CF-Herstellung	min	max	max
Organoblech Verschnitt	0	0,22	0,4
Verschnitt Nachbearbeitung	0	0,05	0,1
Energiequelle	Wasserkraft	Strom Mix	Strom Mix
Bauteildicke [mm]	1* --> 3	1,03	1
Pressentyp	Elektrisch beheizt	Öl beheizt	Öl beheizt
Pressenauslastung	90%* --> 100%	64%	50%
Konsolidierungszeit [min]	15* --> 5	13,6	15
Prozessdruck [bar]	20	48,11	60

* Artefakt

In Abb. 6-32 sind die für die entsprechenden Einstellungen erzielten Umweltwirkungen, berechnet mit dem Ökobilanz-Modell, dargestellt, wobei 0% das Minimum und 100% das Maximum des Wertebereichs einer jeden Wirkungskategorie entspricht. Dunkelgrau hinterlegt sind die Wirkungskategorien mit der höchsten ökologischen Priorität, anhand deren die Produktionsparameter für die Fertigung von faserverstärkten Thermoplaststrukturen mit minimalen, mittleren und maximalen Umweltwirkungen bestimmt worden sind.

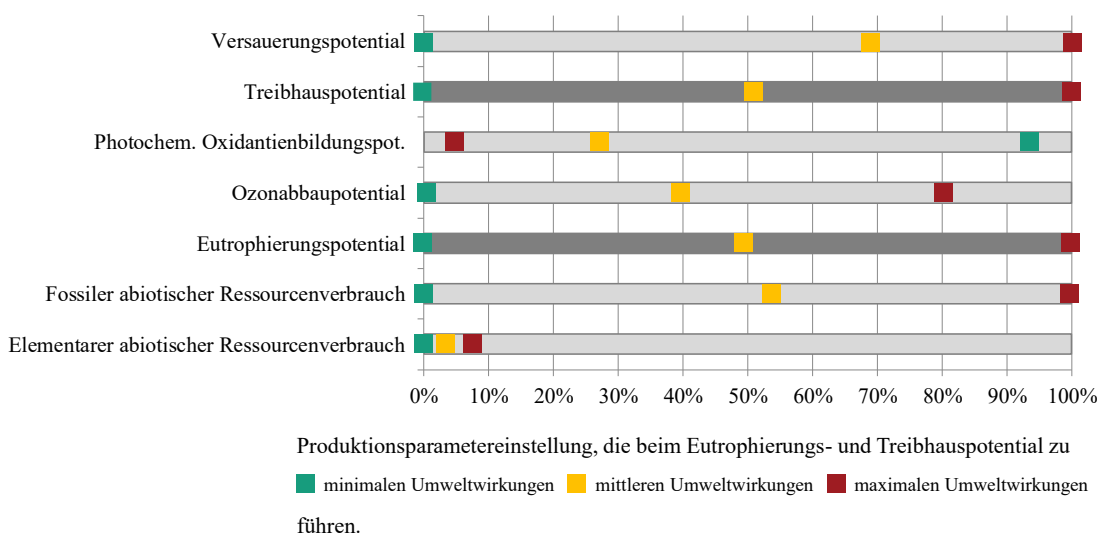


Abb. 6-32: Erzielte Umweltwirkungen aller Wirkungskategorien für eine minimales, mittleres und maximales Produktionsszenario

In Abb. 6-32 ist zu erkennen, dass die Produktionseinstellung die zu einem minimalen, mittleren und maximalen Eutrophierungs- bzw. Treibhauspotential führen, auch ähnliche Ergebnisse beim fossilen Ressourcenverbrauch, Ozonabbau- und Versauerungspotential ergeben. Wobei letzteres für die mittlere Produktionseinstellung eine etwas höhere Wirkung aufweist. Hintergrund ist, dass das Vorhersagemodell hierfür bereits den Carbonfaserdatensatz mit maximalen Umweltwirkungen herangezogen hat. Die freigesetzten Emissionen führen zu einem höheren Versauerungspotential im Vergleich zu den anderen beiden Carbonfaserdatensätzen. Die Möglichkeit Strom aus einer Photovoltaikanlage für die Fertigung von CFK-Bauteilen zu verwenden, führt zu einer großen Spannweite des elementaren abiotischen Ressourcenverbrauchs. Für das Eutrophierungs- und Treibhauspotential stellt Solarenergie kein Extremum dar, so dass dies nicht in den drei ermittelten Produktionsszenarien vorkommt. Dementsprechend wird nur ein geringer Teil des möglichen Prozessfensters durch die Szenarien abgebildet. Beim POCP verhalten sich alle Szenarien invers, d. h. das Produktionsszenario was eigentlich zu niedrigen Umweltwirkungen führen sollte, verursacht einen hohen Sommersmog. Dieses Verhalten ist wiederum auf den verwendeten Carbonfaserdatensatz zurückzuführen (vgl. Kapitel 6.1.3).

6.5 Verschnittarme thermoplastische Prozesskette

Als verschnittarme Legetechnologie für die Herstellung von faserverstärkten Thermoplaststrukturen wird ein Tapelegenverfahren betrachtet. Hierbei werden zunächst Tapeestreifen auf einen Tisch entsprechend der abgewickelten Bauteilgeometrie abgelegt und mit Ultraschallschweißeinheiten punktuell fixiert. Die anschließende Konsolidierung findet in einer Intervall-Heißpresse statt. Danach werden die Stacks erneut auf die Schmelztemperatur in einer IR-Heizstrecke erwärmt. Die Umformung auf die finale Geometrie erfolgt wie auch beim Organoblech in einem isotherm beheizten Werkzeug mithilfe einer Presse. Bevor der Einfluss verschiedener Produktionsparameter auf die Umweltwirkung detailliert analysiert wird, ist in Abb. 6-33 der Anteil der Prozessschritte auf die jeweilige Wirkungskategorie für ein durchschnittliches Produktionsszenario dargestellt. Die hierfür relevanten Parameter können der Tab. 6-20 entnommen werden.

Tab. 6-20: Verschnittarme thermoplastische Prozesskette – Parametereinstellungen für ein durchschnittliches Produktionsszenario

CF-Herstellung		Materialbedarf		Produktion Organoblech	
Produktionsgebiet	Global	Textiler Verschnitt (2D)	0%	Energiequelle	DE Strom Mix
Energieart	Strom Mix	Preform Verschnitt (3D)	5%	Bauteilfläche	1 m ²
Energiequelle	Strom Mix			Bauteildicke	2 mm
Transport	ja	Verschnitt Nachbearbeitung	5%	Imprägnierdauer (Zone 1 Zone 2)	10 min 10 min
Materialausbeute	50%	Matrixreste	5%	Imprägnierdruck	40 bar
Faserdatensatz	1 2			Imprägniertemperatur (Zone 1 Zone 2)	280 °C 80 °C
				Intervall-Heißpresse	elektrisch

Wie auch bei der SotA thermoplastischen Fertigungsprozesskette dominiert die Carbonfaserherstellung alle Wirkungskategorien. Da das Eutrophierungspotential vorrangig von den Emissionen in der Carbonfaserherstellung verursacht wird und die Strombereitstellung keinen Einfluss hat, ist hier die Faserherstellung mit einem Anteil von über 99% nahezu der einzig relevante Prozessschritt. In den anderen Wirkungskategorien haben die Matrixherstellung und die nachfolgenden Fertigungsprozessschritte, auch im Vergleich zur SotA thermoplastischen Fertigungsprozesskette, einen größeren Anteil (bis zu 39%). Letzteres kann auf den bei einer verschnittarmen Legetechnologie reduzierten Materialbedarf zurückgeführt werden.

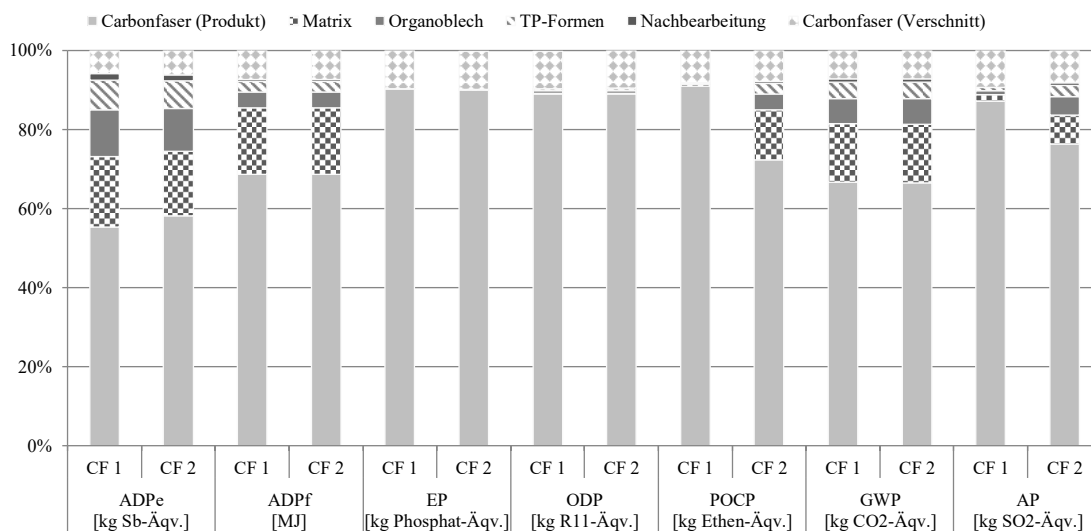


Abb. 6-33: Anteil der Prozessschritte an den Umweltwirkungen von 1 kg CFK, hergestellt mit der thermoplastischen verschnittarmen Fertigungsprozesskette, jeweils normiert auf die Gesamtumweltwirkungen einer Wirkungskategorie

6.5.1 Screening umweltrelevanter Produktionsparameter

Aufbauend auf diesen Erkenntnissen und mithilfe der in Hohmann et al. [74] veröffentlichten Energieeffizienzanalyse wurden wichtige Produktionsparameter identifiziert, deren Einfluss auf die Umweltwirkungen näher untersucht werden sollen. Eine Übersicht der Parameter sowie das entsprechende Prozessfenster kann Tab. 6-21 entnommen werden. Im Gegensatz zur SotA Fertigungsprozesskette zur Herstellung von faserverstärkten Thermoplasten, konnte bereits in der Energieeffizienzanalyse gezeigt werden, dass die Pressenauslastung keinen relevanten Einfluss hat. Weiterhin sind aufgrund der zusätzlichen Prozessschritte – Tapeherstellung, Ablage und Konsolidieren des gelegten Stacks –, neue Prozessparameter relevant, deren Einfluss es zu untersuchen gilt. Neben den Parametern, die den Materialbedarf beeinflussen, werden die Strombereitstellung, der Pressentyp bei der Tapeherstellung und Stack-Konsolidierung, die Bauteilgeometrie, die Tapebreite und die IR-Strahler-Konfiguration variiert.

Tab. 6-21: Variable Produktionsparameter bei der Screening-Analyse der verschnittarmen thermoplastischen CFK-Fertigungsprozesskette

Parameter	Minimaler Wert	Maximaler Wert
CF-Herstellung	Produktionseinstellungen mit minimalen Umweltwirkungen	Produktionseinstellungen mit maximalen Umweltwirkungen
Energiequelle	DE Strom Mix	DE Wasserkraft
Bauteilfläche	0,5 m ²	1,5 m ²
Bauteildicke	1 mm	3 mm
Pressentyp Tape	Elektrisch beheizt	Öl beheizt
Tapebreite	50 mm	150 mm
Pressentyp Konsolidierung	Elektrisch beheizt	Öl beheizt
IR-Heizfeld	Quarz; 1,5 x Bauteilfläche	Keramik; 6 x Bauteilfläche
Stack Verschnitt	0%	10%
Verschnitt Nachbearbeitung	0%	10%
Matrixreste	0%	10%

Die Ergebnisse der Screening-Analyse zeigen, dass, wie auch bei der SotA Fertigungsprozesskette, alle Wirkungskategorien von den Produktionsparametern beeinflusst werden, die einen Effekt auf die Faserherstellung bzw. den Materialbedarf haben. Weitere wichtige Stellgrößen sind die Strombereitstellung, der Pressentyp und die Bauteildicke. Im Vergleich zur SotA Fertigungsprozesskette hat auch die Konfiguration (Größe und Material) des IR-Strahlers bei der Bauteilumformung beim fossilen abiotischen Ressourcenverbrauch einen Einfluss. Vernachlässigt können im vorgegebenen Prozessfenster, vergleichbar mit der SotA-Fertigungsprozesskette, die Bauteilfläche und der Matrixabfall. Eine Übersicht der relevanten Effekte ist Tab. 6-22 zu entnehmen.

Tab. 6-22: Verschnittarme thermoplast basierte Prozesskette – Übersicht der relevanten Effekte

	CF-Herstellung	Verschnitt Stack	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste	Energiequelle	Bauteildicke	Bauteilfläche	Intervall Heißpresse Tape	Tapebreite	Intervall Heißpresse Konsolidierung	IR-Heizfeld
PE	x	x	x		x	x		x			
ADPe	x	x	x		x	x		x	x	x	
ADPf	x	x	x		x	x		x			x
EP	x	x	x								
ODP	x	x	x		x			x			
POCP	x	x	x								
GWP	x	x	x		x			x			
AP	x	x	x		x						

6.5.2 Einfluss der Produktionsparameter auf die resultierenden Umweltwirkungen

Mithilfe eines Vorhersagemodells wurden die in der Screening-Analyse identifizierten Haupteinflussgrößen näher betrachtet und mögliche Interaktionen bzw. Wechselwirkungen untersucht. Grundsätzlich ist festzustellen, dass der größte Effekt in fast allen Wirkungskategorien durch die Faserherstellung verursacht wird. Sofern die Strombereitstellung in der Bauteilfertigung für die Umweltwirkung relevant ist, stellen neben der Energiequelle, der Pressentyp bei der Tapeherstellung und die Bauteildicke die größten Einflussfaktoren dar. Die IR-Strahler-Fläche sowie die Tapebreite sind zweitrangig und erscheinen nur beim fossilen bzw. elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch unter den zehn Haupteffekten.

Beim elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch kann i.V. zur SotA Fertigungsprozesskette weiterhin festgestellt werden, dass der Einfluss der Faserherstellung auf die Wirkungskategorie zugenommen hat. Hintergrund hierbei ist, dass der Prozessenergiebedarf in der Bauteilfertigung aufgrund des Pressentyps keine so große Spannweite wie bei der Organoblechherstellung aufweist (vgl. Kapitel 4.3.2) und die Interaktion mit der Strombereitstellung von Photovoltaikanlagen somit zu einem niedrigeren Effekt führt. Die Reduktion des ADPe bei der Faserherstellung in Abb. 6-34 ist auf das inverse Verhalten der Umweltwirkung bzgl. der Produktionseinstellungen in der Faserherstellung (vgl. Kapitel 6.1.3) zurückzuführen.

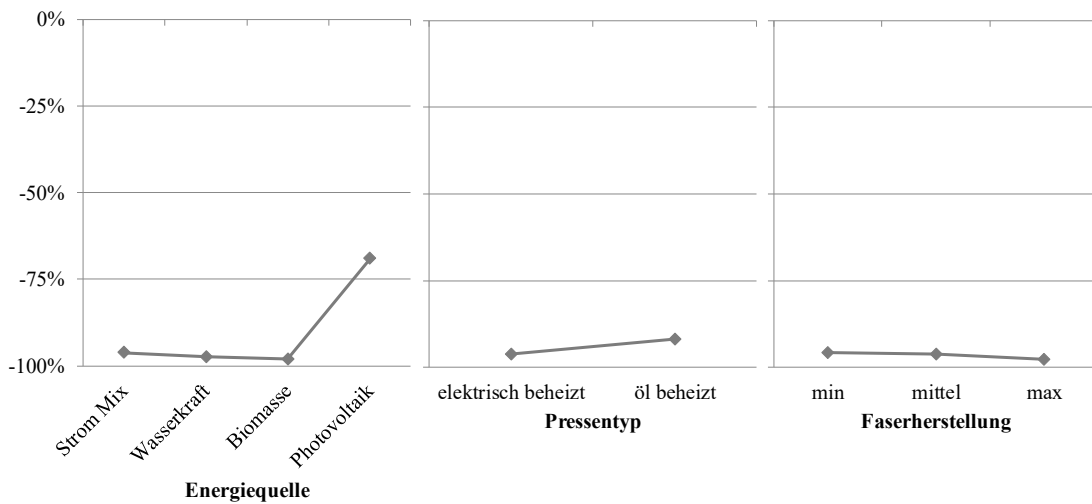


Abb. 6-34: Verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Energiequelle in der Produktion, des Pressentyps bei der Tapeherstellung und die Faserherstellung im Vergleich beim ADPe

Das Eutrophierungs- und Photochemische Oxidantienbildungspotential wird nahezu ausschließlich durch die Umweltwirkungen in der Faserherstellung und durch die Verschnittrate beeinflusst. Es sind daher ähnliche Effekte wie bei der SotA-Fertigungsprozesskette zu erkennen. Beim Ozonabbaupotential, fossilen abiotischen Ressourcenverbrauch sowie beim Treibhaus- und Versauerungspotential ist aufgrund der geringeren Verschnittraten ein größerer Einfluss der Strombereitstellung in der Bauteilfertigung sowie der Maßnahmen, die zu einer Änderung des Prozessenergiebedarfs führen zu erkennen.

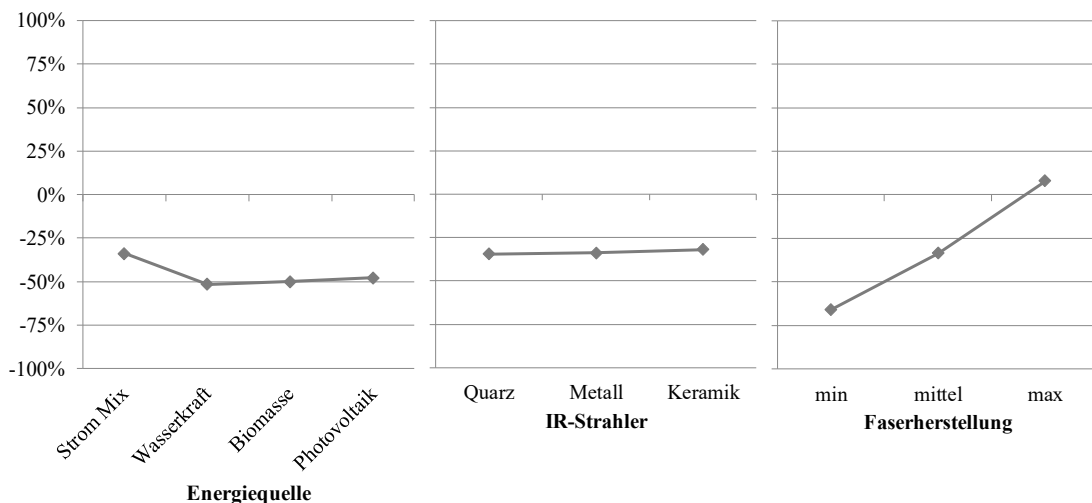


Abb. 6-35: Verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette – Einfluss der Energiequelle in der Produktion, des IR-Strahler-Materials und der Faserherstellung im Vergleich beim ADPf

Eine Zusammenfassung aller Haupteffekte je Wirkungskategorie kann Abb. A-2 im Anhang A-e entnommen werden.

6.5.3 Bestimmung der Produktionsparameter für minimale und maximale Umweltwirkungen

Neben der Detailanalyse wurde das statistische Vorhersagemodell auf für die Abschätzung des maximalen Wertebereichs unter Berücksichtigung des spezifizierten Prozessfensters für jede Wirkungskategorie verwendet. Zur Bestimmung der Parameter, die minimale, mittlere und maximale Umweltwirkungen verursachen, wurde zunächst eine Priorisierung der Wirkungskategorien durchgeführt. Für den in Tab. 6-23 dokumentierten Wertebereich, weisen das Eutrophierungs- und Treibhauspotential die größte ökologische Priorität auf.

Tab. 6-23: Prozessfenster der Wirkungskategorien für die verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette

	Minimum	Maximum
Primärenergiebedarf (nrr., u. H.) [MJ/kg CFK]	260,31	715,86
Elementarer abiotischer Ressourcenverbrauch [kg Sb-Äqv./ kg CFK]	5,19E-06	0,00017
Fossiler abiotischer Ressourcenverbrauch (fossil) [MJ/kg CFK]	249,38	658,56
Eutrophierungspotential [kg Phosphat-Äqv./kg CFK]	3,42	4,86
Ozonabbaupotential [kg R11-Äqv./kg CFK]	6,88E-11	4,43E-10
Photochem. Oxidantienbildungspot. [kg Ethen-Äqv./kg CFK]	-0,123	0,006
Treibhauspotential [kg CO ₂ -Äqv./kg CFK]	13,99	47,20
Versauerungspotential [kg SO ₂ -Äqv./kg CFK]	0,020	0,36

Die Produktionsrandbedingungen die zu einem minimalen, mittleren und maximalen Eutrophierungs- bzw. Treibhauspotential führen können der Tab. 6-24 entnommen werden.

Wie auch bei den vorherigen Prozessketten führen niedrige Umweltwirkungen in der Faserherstellung, eine verschnittfreie Produktion sowie die Verwendung von Wasserkraft in der Bauteilfertigung zu einem minimalen Eutrophierungs- und Treibhauspotential. Prozessparametereinstellungen, die normalerweise zu einem höheren gewichtsspezifischen Energiebedarf in der Fertigung führen, stellen dabei Artefakte im Vorhersagemodell dar. Die Energieeinsparung beispielsweise durch eine höhere Wandstärke in Kombination mit erneuerbaren Energien, ist beim Eutrophierungs- und Treibhauspotential so gering, dass diese nicht exakt erfasst werden kann. Bei der Detailanalyse konnten keine Interaktionen bei den Prozessparametern festgestellt werden. Folglich resultiert die Kombination aller Prozessparameter, die in der Bauteilfertigung jeweils zu einem geringen gewichtsspezifischen Energieverbrauch führen, auch in geringe Umweltwirkungen. Werden die Artefakte korrigiert bzw. die Prozessparameter entsprechend angepasst, ändern sich die meisten Umweltwirkungen nur geringfügig. Beim elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch führt die Elimination der Artefakte hingegen zu einer

Reduktion von über 30%. Maximale Umweltwirkungen werden u.a. bei hohen Verschnitttraten und einem hohen Prozessenergiebedarf in der Bauteilfertigung verursacht.

Weiterhin ist ein Abgleich der Ergebnisse des Vorhersagemodells mit dem Ökobilanz-Modell erfolgt. Bis auf eine Wirkungskategorie konnten sehr gute Übereinstimmungen erzielt werden. Für das POCP werden durch das Vorhersagemodell zu niedrige Umweltwirkungen, insbesondere im oberen Wertebereich, berechnet. Für eine belastbare Abschätzung kann das Modell daher für diese Wirkungskategorie nicht herangezogen werden.

Tab. 6-24: Verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette – Produktionsparameter für minimale, mittlere und maximale Umweltwirkungen

	Minimum	Mittel	Maximum
CF-Herstellung	min	mittel	max
Organoblech Verschnitt	0	0,09	0,1
Verschnitt Nachbearbeitung	0	0,02	0,1
Energiequelle	Wasserkraft	Strom Mix	Strom Mix
Bauteildicke [mm]	1,3* --> 3	1,2	1
Pressentyp Tape	Öl* --> elektrisch beheizt	Elektrisch beheizt	Öl beheizt
Tapebreite [mm]	84* --> 150	100	50
Pressentyp Konsolidieren	Elektrisch beheizt	Öl beheizt	Öl beheizt
IR-Fläche [m ²]	3,6* --> 1,5	4,2	6
IR-Typ	Quarz	Keramik	Metall

* Artefakt

Auf Basis der ermittelten Produktionsrandbedingungen für minimale, mittlere und maximale Umweltwirkungen beim Eutrophierungs- und Treibhauspotential, wurde der Einfluss dieser Parameter auf die anderen Wirkungskategorien untersucht. In Abb. 6-36 ist zu erkennen, dass der fossile abiotische Ressourcenverbrauch und das Versauerungspotential ähnliche Tendenzen aufweisen. Beim Ozonabbaupotential werden beim mittleren Produktionsszenario die höchsten Umweltwirkungen verursacht. Grund hierfür ist, dass bei der Carbonfaserherstellung ein mittleres Produktionsszenario bezogen auf das Eutrophierungs- und Treibhauspotential zum größten Ozonabbaupotential führt. Die Möglichkeit Strom aus einer Photovoltaikanlage für die Fertigung von CFK-Bauteilen zu verwenden, führt zu einer großen Spannweite des elementaren abiotischen Ressourcenverbrauchs. Für das Eutrophierungs- und Treibhauspotential stellt Solarenergie kein Extremum dar, so dass dies nicht in den drei ermittelten Produktionsszenarien vorkommt. Dementsprechend wird nur ein geringer Teil des möglichen Prozessfensters durch die Szenarien abgebildet. Das Photochemische Oxidantienbildungspotential ver-

hält sich wie auch bei den anderen Fertigungsprozessketten invers zu den Umweltwirkungen des Eutrophierungs- und Treibhauspotentials, was auf die Faserherstellung zurückzuführen ist.

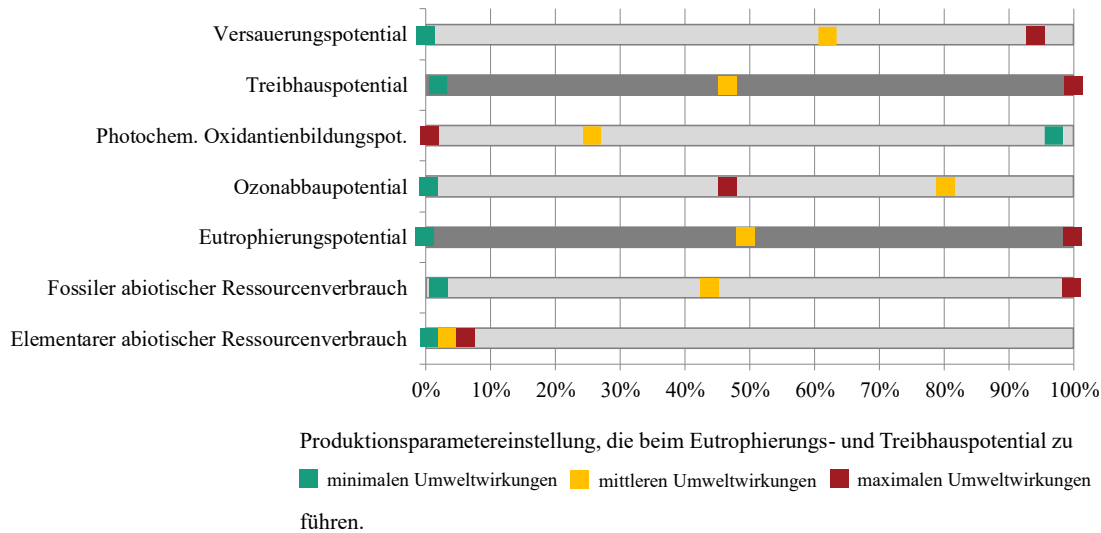


Abb. 6-36: Erzielte Umweltwirkungen aller Wirkungskategorien für ein minimales, mittleres und maximales Produktionsszenario

6.6 Erkenntnisse aus den Analysen

Bei allen untersuchten Fertigungsprozessketten weisen innerhalb des untersuchten Prozessfensters das Eutrophierungs- und Treibhauspotential die Wirkungskategorien mit der höchsten ökologischen Priorität auf. Der elementare und fossile abiotische Ressourcenverbrauch sowie das Ozonabbau- und Versauerungspotential haben eine mittlere ökologische Priorität. Das Photochemische Oxidantienbildungspotential stellt bei den verschnittarmen Legetechnologien nur eine geringe und bei den SoTA Prozessketten eine mittlere Priorität dar. Diese Wirkungskategorie wird daher bei den nachfolgenden Analysen nicht weiter berücksichtigt.

Die Detailanalyse der einzelnen Fertigungsverfahren hat darüber hinaus gezeigt, dass in fast allen Wirkungskategorien die Produktionsrandbedingungen bei der Carbonfaserherstellung und der Materialbedarf in der Bauteilherstellung zu den größten Effekten führen. Zwar sind auch die Art der Strombereitstellung in der Bauteilfertigung, der Bauteilgeometrie abhängige Energiebedarf und bei thermoplastischen Fertigungsprozessketten der Pressentyp und das IR-Strahler-Material relevant, die Auswirkungen auf die Umweltwirkungen aber deutlich geringer. Diese Ergebnisse bestätigen letztendlich die in Hohmann et al. [74] veröffentlichten Optimierungspotentiale. Hier konnte durch den Einsatz von erneuerbaren Energien in der Carbonfaserherstellung eine Reduktion von

27,5% des Treibhauspotentials erzielt werden. Die Verwendung von verschnittarmen Legetechnologien führt zu einem um ca. 25% niedrigeren Treibhauspotential.

Weiterhin konnte festgestellt werden, dass bei beiden verschnittarmen Fertigungsverfahren im Vergleich zu den jeweiligen SotA Fertigungsprozessketten der Einfluss der Matrixherstellung und der Folgeprozessschritte zunimmt. Dies ist zum einen durch den reduzierten Materialbedarf aufgrund der geringeren Verschnitttrate, zum anderen durch den erhöhten Prozessenergiebedarf bei der Ablage der Rovings bzw. der faserverstärkten Thermoplast-Tapes zu begründen. Im Rahmen der Ergebnisdiskussion im Kapitel 7 wird daher u.a. untersucht, ab welchem Materialverschnitt und unter welchen Randbedingungen der Einsatz einer verschnittarmen Legetechnologie i.V. zur jeweiligen SotA Prozesskette zu einer Reduktion der Umweltwirkungen führt.

7 Vergleich der Umweltwirkungen verschiedener Fertigungsprozessketten

Auf Basis der in Kapitel 6 generierten Ergebnisse wird ein Vergleich der unterschiedlichen Fertigungsprozessketten durchgeführt. Durch die Gegenüberstellung der in Kapitel 6 berechneten Umweltwirkungen von verschnittarmen und den entsprechenden SotA Fertigungsprozessketten soll aufgezeigt werden, ab welcher Verschnitttrate der Einsatz einer prozessenergieaufwendigeren verschnittarmen Legetechnologie ökologisch sinnvoller ist. Weiterhin werden die Umweltwirkungen der duroplastischen und thermoplastischen Fertigungsprozesskette miteinander verglichen.

7.1 Vergleich SotA und verschnittarmer Fertigungsprozessketten

Bei einem Vergleich zweier Prozessketten muss sichergestellt sein, dass das jeweilige Produkt den gleichen Nutzen bzw. die gleichen Funktionseigenschaften aufzeigt [14]. Vorteile der textilen Halbzeuge sind beispielsweise die dreidimensionale Verstärkung, die sich positiv auf die Schlagzähigkeit auswirkt, sowie die bessere Drapier- und Infiltrierbarkeit i.V. zu unidirektional verstärkten Bauteilen. Die besseren Verarbeitungseigenschaften münden oftmals in eine homogenere Bauteilqualität. Legetechnologien hingegen ermöglichen eine lastpfadgerechte Ablage, so dass bei gleichen Funktionseigenschaften eine Gewichtsreduktion gegenüber flächigen Halbzeugen möglich ist. Zusammenfassend kann je nach Bauteilkomplexität und Lastanforderungen aus technologischer bzw. funktioneller Sicht das eine oder andere Verfahren zu einem optimalen Leichtbaudesign führen. Aus diesem Grund wird beim Vergleich der SotA mit den verschnittarmen Fertigungsprozessketten ein Korrekturfaktor KF für die Umweltwirkungen der verschnittarmen Fertigungsprozesskette eingeführt:

$$N_{SotA} = KF * N_{verschnittarm} \quad (7-1)$$

$$KF = \frac{N_{SotA}}{N_{verschnittarm}} \approx \frac{m_{verschnittarm}}{m_{SotA}} \quad (7-2)$$

$$IE_{verschnittarm,bereingt} = KF * IE_{verschnittarm} \quad (7-3)$$

, wobei N den Nutzen bzw. die Funktionseigenschaft des Produktes, hergestellt mit den verschnittarmen bzw. den SotA Fertigungsprozessketten, m die entsprechende Produktmasse und IE das Indikatorergebnis der unterschiedlichen Wirkungskategorien darstellt. Der Korrekturfaktor stellt sicher, dass die berechneten Umweltwirkungen der verschnittarmen Fertigungsprozesskette um die möglichen unterschiedlichen Funktionseigenschaften bereinigt bzw. auf eine definierte Funktionseigenschaft normiert werden. In dieser Arbeit wird vereinfacht davon ausgegangen, dass das Verhältnis der Funktionseigenschaften sich umgekehrt proportional zu den Bauteilmassen verhält.

Formel 7-1 bis 7-4 sind daher so zu interpretieren, dass bei einem Korrekturfaktor gleich eins, der gewichtsspezifische Nutzen des Produkts, welches mit der SotA Fertigungsprozesskette gefertigt wurde, vergleichbar mit dem der verschnittarmen Fertigungsprozesskette ist. Ist KF größer eins, weist das Produkt der SotA Fertigungsprozesskette einen höheren Nutzen auf. Um die gleichen Funktionseigenschaften zu erzielen, muss für das Bauteil, welches mit der verschnittarmen Fertigungsprozesskette hergestellt wurde, mehr Material eingesetzt werden. KF kleiner eins weist auf bessere Funktionseigenschaften des Produkts, gefertigt mit einer verschnittarmen Fertigungsprozesskette, hin.

Weiterhin kann je nach Bauteilkomplexität die Verschnitttrate variieren, wobei davon ausgegangen wird, dass die Matrixreste, die Nachbearbeitung des fertigen CFK-Bauteils und der Materialverschnitt der beim Trimmen der 3D-Preform anfällt, unabhängig vom gewählten Fertigungsverfahren ist. Zusätzlich werden beim Vergleich die in Kapitel 6 ermittelten Prozess- und Produktionsrandbedingungen berücksichtigt, die einen signifikanten Einfluss auf die Umweltwirkungen haben.

Vergleich duroplastischer Fertigungsprozessketten

Bei der Fertigung von faserverstärkten Duroplasten wird die SotA duroplastische Fertigungsprozesskette mit der Verschnittarmen, deren Umweltwirkungen in Kapitel 6 im Detail analysiert worden sind, verglichen. Bei der Gegenüberstellung wird davon ausgegangen, dass unabhängig von der gewählten Fertigungsprozesskette der gleiche Verschnitt beim Trimmen der Preform für das RTM-Werkzeug anfällt. Dieser ist, wie in Tab. 7-1 ersichtlich, auf 10% für beide Fertigungsprozessketten fixiert. Weiterhin sind die Parameter fixiert, die keinen relevanten Einfluss auf die Umweltwirkungen haben. Prozess- und Produktionsparameter, die wie in Kapitel 6 aufgezeigt, zu einer signifikanten Änderung der Umweltwirkung führen, werden im spezifizierten Prozessfenster variiert (vgl. Tab. 7-1). Alle übrigen Einstellungen sind im Anhang A-c in den Tabellen Tab. A-17 und Tab. A-18 aufgeführt.

Tab. 7-1: Parametereinstellungen für den Vergleich duroplastischer SotA und verschnittarmer Fertigungsprozesskette

Fixierte Parameter					
CF-Herstellung		Materialbedarf		Produktion	
Transport ja/nein	Wird berücksichtigt	Preform Verschnitt (3D)	10%	Rovingtyp	24k - gespreizt
				Fixierungseinheit	Klebstoff
		Verschnitt Nachbearbeitung	5%	Pressenauslastung	80%
		Matrixreste	5%	Injektion & Aushärtung	RTM
				Vakuum-pumpentyp	120 m ³ /h
Variable Parameter					
CF-Herherstellung	Min.	Max.	Produktion	Min.	Max.
Produktionsgebiet	Europa	Japan	Textiler Verschnitt (2D)	variabel	variabel
Energieart	Elektrisch	Elektrisch	Energiequelle	Wasser-kraft	DE Strom Mix
Energiequelle	Wasser-kraft	Strom Mix			
Materialausbeute	55%	45%	Bauteilfläche	1,5m ²	0,5 m ²
Faserdatensatz	2	1	Bauteildicke	3 mm	1 mm
			Aushärtezeit	3 min	10 min

Die aufgrund der in Tab. 7-1 variablen Produktionsparameter resultierenden minimalen (untere Linie in Abb. 7-1) und maximalen Umweltwirkungen (obere Linie in Abb. 7-1) werden in Form von Spannweiten in den Diagrammen dargestellt. Weiterhin werden aufgrund der Übersichtlichkeit, Wirkungskategorien, die sich ähnlich Verhalten gemeinsam diskutiert.

Dies trifft beispielsweise auf das Eutrophierungs-, Ozonabbau- und Versauerungspotential zu. Bei diesen drei Wirkungskategorien spielen die Matrixherstellung und der Prozessenergiebedarf in der Bauteilfertigung nur eine untergeordnete Rolle, die Umweltwirkungen werden durch die Carbonfaserherstellung dominiert. Sind die Verschnitttraten bei beiden Fertigungsprozessketten gleich, d.h. der textile Verschnitt (2D) in der SotA Fertigungsprozesskette beträgt 0%, wird die Prozesskette mit den geringeren Umweltwirkungen über den Korrekturfaktor bestimmt. Weisen die Produkte beider Fertigungsprozessketten den gleichen Nutzen bei identischem Gewicht auf, haben diese auch die gleiche Umweltwirkung. Wird bei einer Fertigungsprozesskette mehr Material benötigt, um die gleichen Funktionseigenschaften zu erfüllen, sind die Umweltwirkungen dieser

auch höher. In Abb. 7-1 ist zu erkennen, dass mit steigendem textilem Verschnitt (2D) bei der SotA Fertigungsprozesskette, der ökologische Vorteil der verschnittarmen Fertigungsprozesskette zunimmt. Bei einem textilen Verschnitt von 20% beispielsweise, muss das Produkt, gefertigt mit der verschnittarmen Fertigungsprozesskette, erst einen 25% geringeren Nutzen bzw. höheres Gewicht aufweisen, bis der Einsatz der SotA Prozesskette zu niedrigeren Umweltwirkungen in der Herstellungsphase führt.

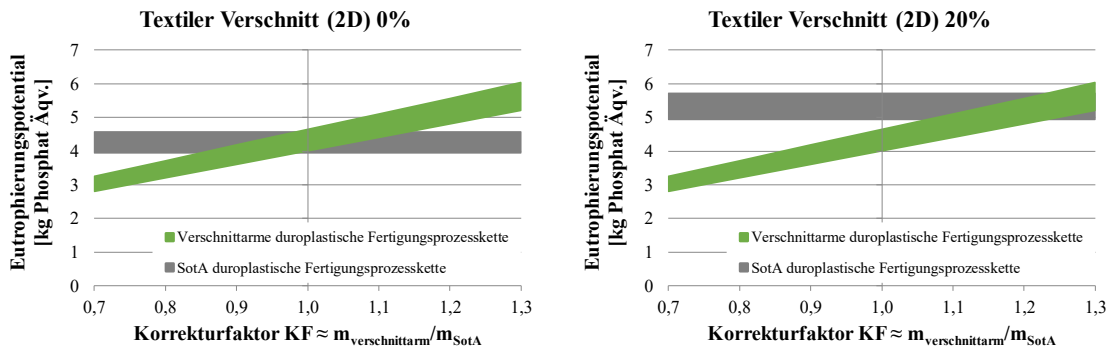


Abb. 7-1: Vergleich duroplastische Fertigungsprozessketten am Beispiel des Eutrophierungspotentials

Beim elementaren und fossilen abiotischen Ressourcenverbrauch sowie beim Treibhauspotential, hat die SotA Fertigungsprozesskette sofern kein textiler Verschnitt anfällt bei gleichen gewichtsspezifischen Funktionseigenschaften ($KF = 1$) geringfügig niedrigere Umweltwirkungen. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn in der Produktion der deutsche Strom Mix verwendet wird und Randbedingungen vorherrschen, die zu einem hohen gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf führen (obere Linie der markierten Bereiche in Abb. 7-2). Falls durch die lastpfadgerechte Ablage allerdings mehr als 2,5% Gewicht eingespart werden kann, weist die verschnittarme Fertigungsprozesskette die geringeren Umweltwirkungen auf.

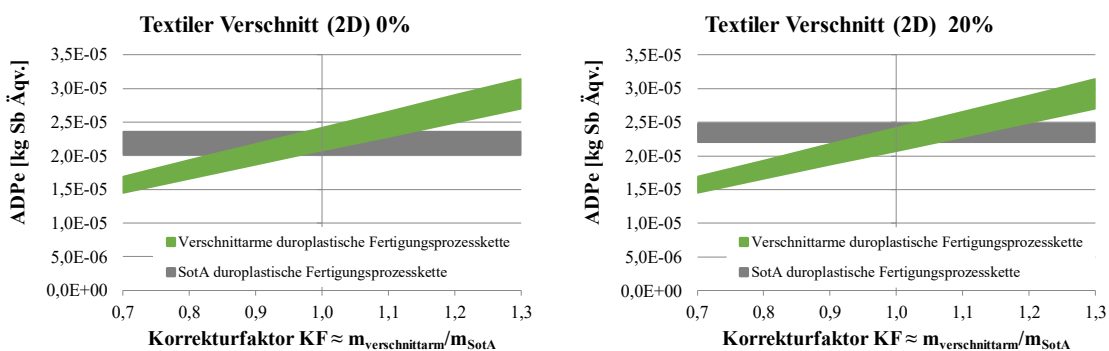


Abb. 7-2: Vergleich duroplastische Fertigungsprozessketten am Beispiel des elementaren abiotischen Ressourcenverbrauchs

Bei einem textilen Verschnitt von 20% (Abb. 7-2 rechts) bei der SotA Fertigungsprozesskette verschiebt sich dieser Break-even-point. Sowohl beim elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch als auch beim Treibhauspotential können bei gleichen ge-

wichtsspezifischen Funktionseigenschaften ($KF = 1$) mit der verschnittarmen Fertigungsprozesskette geringere Umweltwirkungen erzielt werden. Allerdings hat beim elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch der Materialverschnitt keinen so großen Einfluss, wie beim Treibhauspotential. Bei ersterem darf das Produkt, hergestellt mit einem verschnittarmen Fertigungsprozess, nur einen 5% geringeren Nutzen bzw. höheres Gewicht i.V. zur SotA Fertigungsprozesskette aufweisen. Beim Treibhauspotential ist je nach Produktionsrandbedingungen eine 15 bis 20% Gewichtssteigerung zur Erreichung der gleichen Funktionseigenschaften wie bei der SotA Fertigungsprozesskette möglich.

Vergleich thermoplastischer Fertigungsprozessketten

Bei der Fertigung von faserverstärkten Thermoplasten wird die thermoplastische SotA Fertigungsprozesskette mit der Verschnittarmen verglichen. Die Umweltwirkungen beider Prozessketten wurden dabei in Kapitel 6 im Detail untersucht. Weiterhin entstehen bei beiden Fertigungsprozessketten sowohl beim Zuschnitt der 2D-Halbzeuge vor der Umformung als auch bei der Nachbearbeitung des fertigen CFK-Bauteils Verschnitt. Bei der Gegenüberstellung der Prozessketten wird, wie auch bei den duroplastischen Fertigungsprozessketten, davon ausgegangen, dass der Verschnitt der bei der Nachbearbeitung entsteht, unabhängig von der gewählten Prozesskette ist. Dieser ist daher in Tab. 7-2 auf 5% fixiert. Für das Trimmen der 2D-Halbzeuge werden zwei unterschiedliche Szenarien betrachtet. Zum einen das beim Zuschnitt der Platten bei beiden Prozessketten gleich viel Materialverschnitt anfällt und zum anderen 10% bei der Verschnittarmen und 20% bei der SotA Fertigungsprozesskette entsteht. Alle weiteren Parametereinstellungen können Tab. 7-2 bzw. Tab. A-19 und Tab. A-20 im Anhang A-c entnommen werden.

Tab. 7-2: Parametereinstellungen für den Vergleich thermoplastischer SotA und verschnittarmer Fertigungsprozesskette

Fixierte Parameter					
CF-Herstellung		Materialbedarf		Produktion	
Transport ja/nein	Wird berücksichtigt	Verschnitt	5%	Bauteilfläche	1 m ²
		Nachbearbeitung		Imprägniertemperatur (Zone 1 Zone 2)	280 °C 80 °C
		Matrixreste	5%		

Variable Parameter					
CF-Herstellung	Min.	Max.	Produktion	Min.	Max.
Produktionsgebiet	Europa	Japan	Verschnitt	Variabel	Variabel
Energieart	Elektrisch	Elektrisch	Energiequelle	Wasserkraft	DE Strom
Energiequelle	Wasserkraft	Strom Mix			Mix

Variable Parameter					
Materialausbeute	55%	45%	Bauteildicke	3 mm	1 mm
CF-Herstellung	Min.	Max.	Produktion	Min.	Max.
Faserdatensatz	2	1	Imprägnierzeit	5 min	15 min
			Tapebreite	150 mm	50 mm
			Prozessdruck	20 bar	60 bar
			Pressentyp	Elektrisch	öl
			Pressenauslastung	100%	50%
			IR-Strahler	Quarz	Metall
			IR-Strahler-Fläche	1,5 m ²	6 m ²

Ähnlich wie bei den duroplastischen Fertigungsprozessketten wurden die Ergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien, welche einen ähnlichen Verlauf aufzeigen, zusammengefasst.

Das Eutrophierungspotential stellt neben dem Photochemischen Oxidantienbildungspotential die einzige Umweltwirkung bei dem Vergleich der beiden thermoplastischen Prozessketten dar, dessen Ausprägung nahezu ausschließlich von den Umweltwirkungen der Faserherstellung und des Materialbedarfs in der Bauteilfertigung beeinflusst wird. Grund hierfür ist, dass bei der Organoblechherstellung, falls für die Imprägnierung eine öl beheizte Presse verwendet wird, der Prozessenergiebedarf selbst bei den sonst faserdominierenden Wirkungskategorien wie das Ozonabbau- und Versauerungspotential einen großen Einfluss ausübt. Beim Eutrophierungspotential hängt somit der ökologische Vorteil einer Fertigungsprozesskette, sofern der Materialverschnitt wie in Abb. 7-3 links identisch ist, von den gewichtsspezifischen Funktionseigenschaften des jeweiligen Produktes ab. Fällt bei der Produktherstellung mit der SotA-Fertigungsprozesskette mehr Verschnitt an (20 vs. 10%), so weist das Produkt, welches mit der verschnittarmen Fertigungsprozesskette gefertigt worden ist, niedrigere Umweltwirkungen auf. Erst wenn das Produkt 15% mehr Masse aufweisen muss, um die gleichen Funktionseigenschaften wie bei der SotA Fertigungsprozesskette zu erzielen, sind die Umweltwirkungen der SotA Fertigungsprozesskette in der Herstellungsphase niedriger (vgl. Abb. 7-3 rechts).

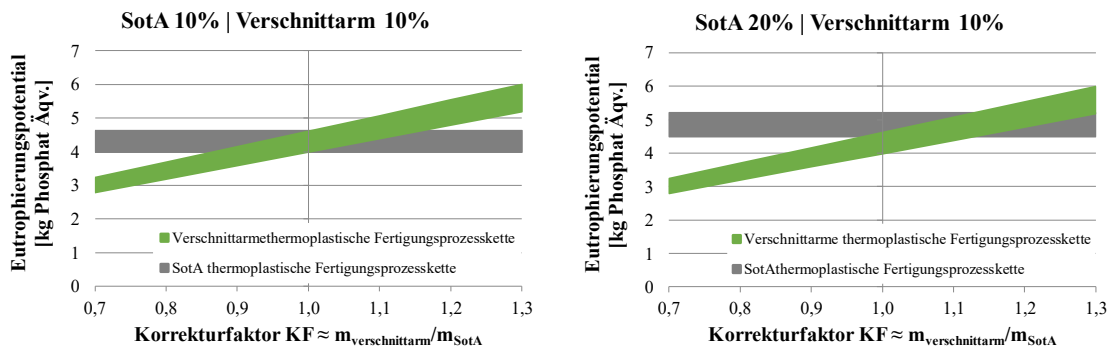


Abb. 7-3: Vergleich thermoplastische Fertigungsprozessketten am Beispiel des Eutrophierungspotentials

Der Verlauf aller weiteren Umweltwirkungskategorien (ADPe, ADPf, ODP, GWP, AP) kann zusammengefasst werden und ist exemplarisch für das Treibhauspotential in Abb. 7-4 dargestellt.

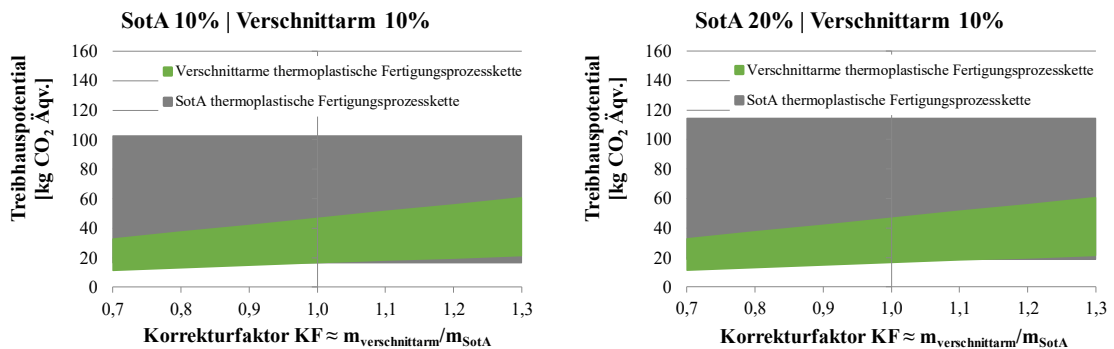


Abb. 7-4: Vergleich thermoplastische Fertigungsprozessketten am Beispiel des Treibhauspotentials

Sofern beide Prozessketten den gleichen Materialverschnitt aufweisen und die Produktionsrandbedingungen zu geringen Umweltwirkungen führen, hängt der ökologische Vorteil einer Fertigungsprozesskette von den gewichtsspezifischen Funktionseigenschaften ab. Hat das Produkt bei identischem Gewicht den gleichen Nutzen sind die Umweltwirkungen der beiden Prozessketten gleich. Kann beispielsweise aufgrund der lastpfadgerechten Ablage durch das Tapelegeverfahren ein optimiertes Leichtbaudesign realisiert werden, stellt das Tapelegeverfahren die Prozesskette mit den geringeren Umweltwirkungen dar. Dieser Sachverhalt wird verstärkt, wenn entweder Produktionsrandbedingungen vorliegen, die zu einem hohen Prozessenergiebedarf führen, insbesondere hat hier die Wahl des Pressentyps einen großen Einfluss (vgl. Abb. 7-4 links), oder der Materialverschnitt bei der SotA Prozesskette zunimmt (vgl. Abb. 7-4 rechts). Bei erstem ist der Unterschied in den Umweltwirkungen so groß, dass die gewichtsspezifischen Funktionseigenschaften des Bauteils, hergestellt mit einem thermoplastischen Tapelegeverfahren, deutlich schlechter sein müssen, um geringere Umweltwirkungen mit der SotA Prozesskette in der Herstellungsphase erzielen zu können. Erhöht sich die Verschnitttrate beim Organoblechzuschnitt auf 20%, muss das entsprechende Bauteil einen

um 15% höheren gewichtsspezifischen Nutzen als eine aus UD-Tape hergestellte Struktur aufweisen. Voraussetzung ist allerdings das Produktionsrandbedingungen gewählt werden, die zu minimalen Umweltwirkungen in der Bauteilfertigung führen, andernfalls stellt die verschnittarme Legetechnologie das Verfahren mit den geringsten Umweltwirkungen dar.

7.2 Vergleich duro- und thermoplastischer Fertigungsprozessketten

Neben dem Vergleich der SotA und verschnittarmen Fertigungsprozessketten, ist auch eine Gegenüberstellung von duroplastischen und thermoplastischen Fertigungsprozessketten möglich. Aus technologischer und funktioneller Sicht haben beide Kunststoffarten Vor- und Nachteile [7], so dass bei einem Vergleich der gleiche Nutzen des Produkts unbedingt gewährleistet sein muss. Ähnlich zur vorangegangenen Untersuchung wird dies wieder über einen Korrekturfaktor berücksichtigt.

Eine Betrachtung erfolgt dabei ausschließlich für die im Kapitel 6 im Detail analysierten verschnittarmen Fertigungsprozessketten und die in der Tabelle Tab. 7-1 und Tab. 7-2 definierten Produktionsrandbedingungen. Es wird davon ausgegangen, dass der Materialverschnitt in der Produktion und die Nachbearbeitung des fertigen CFK-Bauteils unabhängig vom gewählten Fertigungsverfahren sind. Beim thermoplastischen Legeverfahren wird allerdings ein Verbundhalbzeug und beim verschnittarmen duroplastischen Fertigungsprozess werden trockene Carbonfaserrovings verarbeitet. Die Materialzusammensetzung variiert daher bei beiden Verfahren, so dass der Vergleich für unterschiedliche Verschnitttraten in der Produktion durchgeführt wird. Der Produktionsabfall bei der Nachbearbeitung ist hingegen auf 5% fixiert. Ähnlich wie bei den vorangegangenen Untersuchungen werden die Ergebnisse der einzelnen Wirkungskategorien, welche einen ähnlichen Verlauf aufzeigen, zusammen diskutiert.

Beim Eutrophierungspotential hat die Fertigungsprozesskette keinen Einfluss, lediglich der Materialverschnitt bzw. -bedarf ist relevant (vgl. Abb. 7-5). Die Fertigungsprozesskette mit dem geringsten Materialbedarf weist daher auch die niedrigste Umweltwirkung hinsichtlich des Eutrophierungspotentials auf.

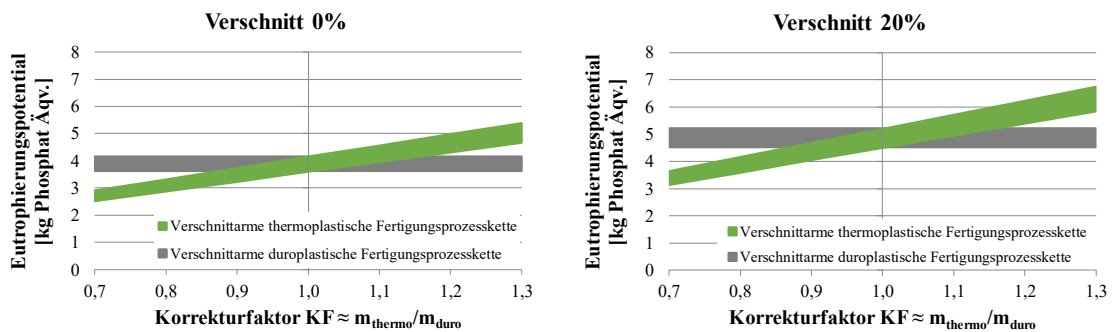


Abb. 7-5: Vergleich verschnittarme duro- und thermoplastische Fertigungsprozesskette am Beispiel des Eutrophierungspotentials

Beim abiotischen elementaren Ressourcenverbrauch ist ein vollständig anderer Verlauf in Abb. 7-6 zu erkennen. Aufgrund des Natriumchloridbedarfs in der Epoxidharzherstellung, hat selbst bei einem deutlich höheren Materialbedarf zur Erfüllung der gleichen Funktionseigenschaften, die thermoplastische Fertigungsprozesskette den geringeren elementaren Ressourcenverbrauch.

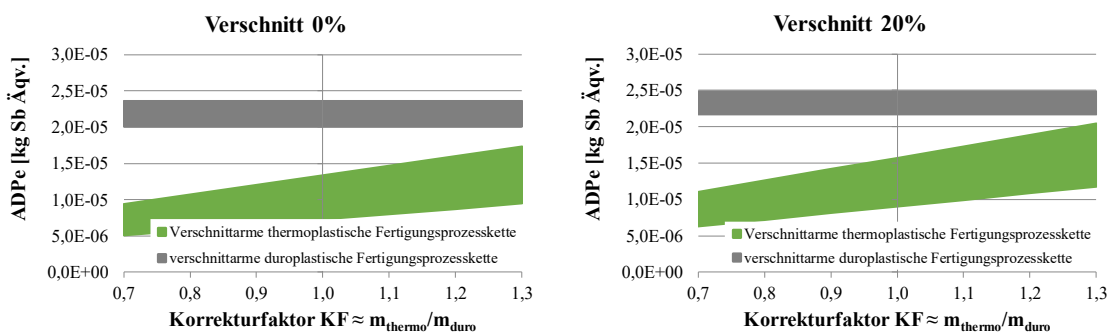


Abb. 7-6: Vergleich verschnittarme duro- und thermoplastische Fertigungsprozesskette am Beispiel des elementaren abiotischen Ressourcenverbrauchs

Der Verlauf der Umweltwirkungen des fossilen abiotischen Ressourcenverbrauchs und des Treibhauspotentials können zusammen diskutiert werden. Die Umweltwirkungen der duroplastischen Fertigungsprozesskette sind im Vergleich zur thermoplastischen geringer und der Unterschied wird mit steigender Verschnitttrate größer. Während bei einer verschnittfreien Produktion das duroplastische Bauteil in etwa 10% schwerer als das faserverstärkte Thermoplastbauteil sein darf, um bei gleichen Funktionseigenschaften niedrigere Umweltwirkungen in der Herstellungsphase aufzuweisen, sind es bei einer durchschnittlichen Verschnitttrate von 20% schon bis zu 15%.

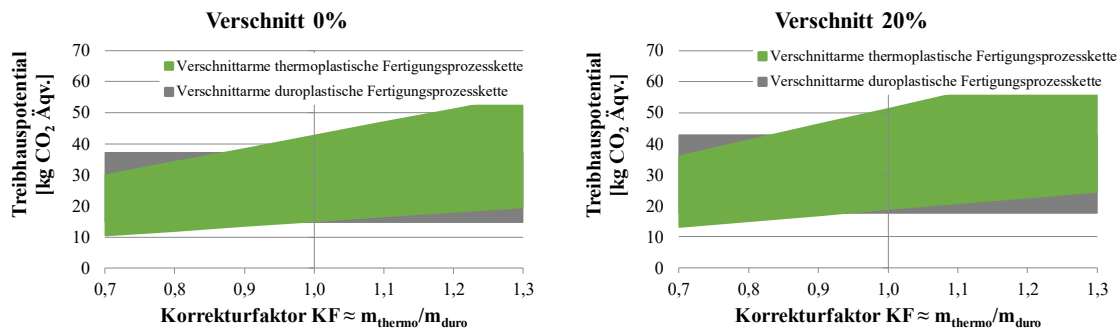


Abb. 7-7: Vergleich verschnittarme duro- und thermoplastische Fertigungsprozesskette am Beispiel des Treibhauspotentials

Beim Versauerungspotential ist das Ergebnis nicht von der Verschnitttrate, sondern von den Produktionsrandbedingungen abhängig. Liegen Randbedingungen vor, die zu niedrigen Umweltwirkungen führen, so weist bei gleichen gewichtsspezifischen Funktionseigenschaften die thermoplastische Fertigungsprozesskette ein niedrigeres Versauerungspotential auf. Bei Produktionsparametern, die zu hohen Umweltwirkungen führen, sind die Umweltwirkungen beider Prozessketten nahezu identisch (vgl. Abb. 7-8).

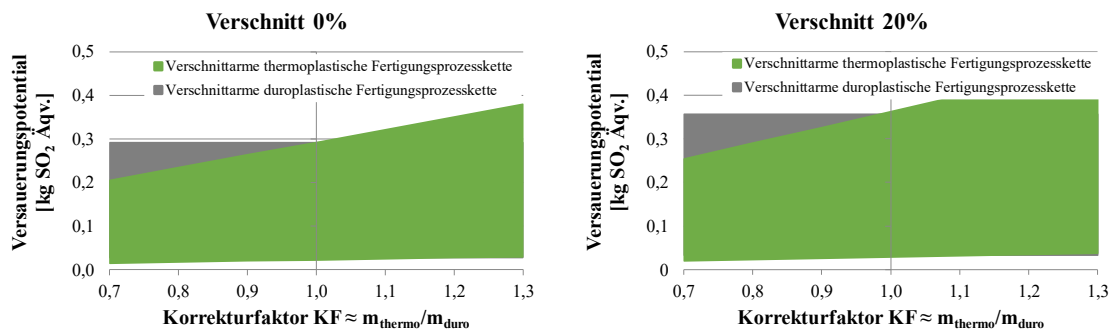


Abb. 7-8: Vergleich verschnittarme duro- und thermoplastische Fertigungsprozesskette am Beispiel des Versauerungspotentials

Das Ozonabbaupotential kann nicht ausgewertet werden, da beim verwendeten Epoxidharz Datensatz (PlasticsEurope) keine Quantifizierung des ODP nach CML 2001 – Januar 2016 erfolgt. Ein Vergleich mit einem anderen Kunststoff ist daher nicht möglich.

8 Zusammenfassung und Ausblick

In dieser Arbeit konnten für alle relevanten Prozessschritte zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Duroplasten und Thermoplasten für die Zielapplikation Automobilindustrie, die für eine Ökobilanz notwendigen Energie- und Stoffflüsse erhoben werden. Hinsichtlich des gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarfs haben neben der Bauteilgeometrie, die Aushärte- bzw. Imprägnierdauer und bei den thermoplastischen Prozessschritten die Art der Pressenbeheizung bei der Imprägnierung und die Konfiguration des IR-Strahlers bei der Umformung den größten Einfluss. Durch die eigenen Messreihen wurden somit mögliche Stellgrößen zur Reduktion des Energieverbrauchs identifiziert. Die erhobenen Datensätze weisen darüber hinaus eine sehr gute Detailtiefe und Belastbarkeit auf, so dass nur bei signifikanten Anlagenoptimierungen eine Aktualisierung erfolgen muss.

Darauf aufbauend wurde ein parametrisiertes Ökobilanz-Modell entwickelt, welches die Analyse der Umweltwirkungen für unterschiedlichste Produktionsrandbedingungen ermöglicht. Eine Kombination von statistischen Methoden sowie der UBA-Methode zur Rangbildung von Wirkungskategorien erlaubte eine umfassende, effiziente und systematische Analyse zur Identifikation von ökologischen Einflussgrößen und deren Interaktionen. Bei der Vorhersage der Produktionseinstellungen für definierte Umweltwirkungen sowie bei der Quantifizierung dieser, musste die Plausibilität der Ergebnisse allerdings überprüft werden. Aufgrund der beschränkten Auflösung des statistischen Vorhersagemodells können bei kleineren Änderungen in den Umweltwirkungen Artefakte entstehen. Eine erste Abschätzung der notwendigen Produktionsrandbedingungen für definierte Umweltwirkungen ist daher mit den statistischen Vorhersagemodellen möglich, die tatsächlich resultierenden Umweltwirkungen auf Basis dieser Produktionseinstellungen sollten aber direkt im Ökobilanz-Modell berechnet werden.

Bei den durchgeführten ökologischen Analysen konnte festgestellt werden, dass das Eutrophierungs- und das Treibhauspotential in der Carbonfaserherstellung und in den Fertigungsprozessketten die größte ökologische Priorität aufweisen. Beim Eutrophierungspotential ist insbesondere der hohe spezifische Beitrag, welcher hauptsächlich auf die freigesetzten Stickstoffverbindungen in der Carbonfaserherstellung zurückzuführen ist, für die Priorisierung verantwortlich. Das Treibhauspotential hingegen wird aufgrund der anderen beiden produkt-unabhängigen Bewertungskriterien – ökologische Gefährdung und Distance-to-Target – so hoch eingestuft.

Weiterhin hat sich gezeigt, dass für ein durchschnittliches Produktionsszenario die Faserherstellung nahezu alle Wirkungskategorien¹ dominiert. Lediglich beim elementaren abiotischen Ressourcenverbrauch hat bei den duroplastischen Fertigungsverfahren die Epoxidharzherstellung, aufgrund des hierfür notwendigen Natriumchlorids, den höchsten Anteil. In dieser Wirkungskategorie weisen auch die Folgeprozessschritte für die Bauteilfertigung den größten Einfluss auf, wobei diese beim Einsatz der verschnittarmen thermoplastischen Fertigungsprozesskette einen maximalen Wert von 20% erreichen. Mit steigender Verschnitttrate oder der Verwendung eines Epoxidharzes sinkt der Anteil. Beim Treibhauspotential kann ein durchschnittlicher Einfluss von ca. 15% durch die Matrixherstellung und 10% durch die Bauteilfertigung festgestellt werden. Auch dieser Anteil sinkt mit steigender Verschnitttrate. Das Eutrophierungspotential wird hingegen weder durch die Matrixherstellung noch von den nachfolgenden Prozessschritten beeinflusst, nahezu 100% der Umweltwirkung wird durch die Carbonfaserherstellung verursacht.

Auf Basis dieser Detailbetrachtungen wurden die Umweltwirkungen der verschiedenen Fertigungsprozessketten miteinander verglichen. Bei faserdominierenden Wirkungskategorien, wie das Eutrophierungspotential, weist bei gleichem gewichtsspezifischem Nutzen der gefertigten Bauteile die Herstellungsprozesskette mit der geringeren Verschnitttrate niedrigere Umweltwirkungen auf. Für das Treibhauspotential konnten unterschiedliche Ergebnisse ermittelt werden. Je nach gewählten Produktionsrandbedingungen und Verschnitttraten, kann bei gleichem gewichtsspezifischen Nutzen die eine oder andere Fertigungsprozesskette zu geringeren Umweltwirkungen führen.

8.1 Beantwortung der Forschungsfragen

Weiterhin konnte durch die methodische Vorgehensweise die in Kapitel 0 gestellten Forschungsfragen beantwortet werden. Der Fokus wird hierbei auf die beiden Wirkungskategorien mit der größten ökologischen Priorität – Eutrophierungs- und Treibhauspotential – gelegt. Eine Ausnahme bildet die Fragestellung hinsichtlich der Carbonfaserherstellung. Diese wird aufgrund der hohen Relevanz der Umweltwirkungen in der Carbonfaserherstellung für alle Wirkungskategorien beantwortet.

Wie wirken sich die Produktionsrandbedingungen in der Carbonfaserherstellung auf die Umweltwirkungen aus? Welche Produktionsparameter haben dabei den größten Einfluss und wie interagieren diese miteinander?

Beim elementaren und fossilen Ressourcenverbrauch sowie beim Ozonabbau- und Treibhauspotential haben die Energiequelle, die Energiezusammensetzung (elektrisch,

¹ ADPe, ADPf, EP, ODP, POCP, GWP, AP

thermisch) und der Produktionsstandort den größten Einfluss. Sofern der länderspezifische Strom Mix eingesetzt wird, sind bei einer europäischen Produktion aufgrund des hohen Anteils an erneuerbaren Energien die entsprechenden Umweltwirkungen sehr gering. Ein deutlicher Anstieg des elementaren Ressourcenverbrauchs sowie des Ozonabbaupotentials ist bei einer Produktion in den USA aufgrund des bei der Energiebereitstellung notwendigen Bleiverbrauchs und der freigesetzten FCKWs festzustellen. Beim Treibhauspotential führt der Produktionsstandort Japan, aufgrund der höheren Kohlenstoffdioxidfreisetzung bei der Stromherstellung, zu den größten Umweltwirkungen. Eine andere Energiezusammensetzung, d.h. beispielsweise ein höherer thermischer Anteil, führt beim Treibhaus- und Ozonabbaupotential, sofern der länderspezifische Strom Mix verwendet wird, zu einer Reduktion der Umweltwirkungen. Beim fossilen abiotischen Ressourcenverbrauch ist hingegen bei allen Produktionsstandorten eine Zunahme zu erkennen.

Wenn erneuerbare Energien für die Strombereitstellung verwendet werden, verursacht Strom aus Wasserkraft die geringsten Umweltwirkungen. Der Einsatz von Strom aus Windkraft führt aufgrund der benötigten Rohstoffe zum Bau der Windkraftanlagen sogar zu einem Anstieg des elementaren Ressourcenverbrauchs im Vergleich zum Strom Mix. Ansonsten sind ähnliche Wirkungen wie beim Strom aus Wasserkraft festzustellen. Insbesondere beim fossilen Ressourcenverbrauch und beim Treibhauspotential wirkt sich, sofern der Strom aus erneuerbaren Energien bereitgestellt wird, eine Energiezusammensetzung mit hohem elektrischem Anteil positiv auf die Umweltwirkungen aus. Der Produktionsstandort hat hingegen nur noch einen geringen Einfluss, wobei die geringsten Umweltwirkungen bei einer europäischen Produktion erzielt werden.

Bei den restlichen drei Wirkungskategorien – Eutrophierungs-, Versauerungs- und Photochemischen Oxidantienbildungspotentials – haben die Materialausbeute und der modellierte Faserdatensatz den größten Einfluss. Bei den beiden erst genannten Wirkungskategorien kann durch eine höhere Materialausbeute bzw. einem geringeren PAN-Faserbedarf sowie durch eine stickstoffmonoxidfreie Nachverbrennung der Ammoniak- und Blausäureemissionen (Faserdatensatz 2) die Umweltwirkungen reduziert werden. Das POCP verhält sich hingegen konträr. Die Freisetzung von Stickstoffmonoxiden führt zu einer Reduktion des POCP, daher wirken sich alle Maßnahmen, die zu einer Erhöhung dieser Emissionen führen positiv auf die Umweltwirkung aus.

Zusammenfassend ist festzuhalten, dass eine europäische stickstoffmonoxidfreie Carbonfaserproduktion mit einer autarken Energieversorgung aus Wasserkraft und einer hohen Materialausbeute zu den geringsten Umweltwirkungen führt.

In welchem Wertebereich können die Umweltwirkungen der unterschiedlichen Fertigungsprozessketten variieren? Sind Wechselwirkungen zwischen den einzelnen Produktionsparametern erkennbar und wie signifikant sind diese?

Für die beiden Wirkungskategorien mit der größten ökologischen Priorität – Eutrophierungs- und Treibhauspotential – sind die Wertebereiche in Tab. 8-1 dargestellt.

Tab. 8-1: Übersicht der Spannweite der Wirkungskategorien mit der höchsten ökologischen Priorität pro kg gefertigtes Bauteil

Duroplast	EP [kg Phosphat-Äqv.]	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]	Thermoplast	EP [kg Phosphat-Äqv.]	GWP [kg CO ₂ - Äqv.]
SotA	3,4 bis 6,8	14 bis 49	SotA	3,4 bis 7,3	14 bis 144
Verschnittarm	3,4 bis 4,9	14 bis 43	Verschnittarm	3,4 bis 4,9	14 bis 47

Hierbei ist zu erkennen, dass die Spannweite des Eutrophierungspotentials bei verschnittarmen Fertigungstechnologien sehr gering ist. Dies lässt sich dadurch erklären, dass das Eutrophierungspotential hauptsächlich durch die freigesetzten Stickstoffverbindungen in der Faserherstellung verursacht wird und bei einer verschnittarmen Fertigungsprozesskette das Prozessfenster bzgl. des Materialbedarfs kleiner ist. Der Wertebereich für das Treibhauspotential ist bei allen Fertigungsprozessketten sehr ähnlich. Die Faserherstellung, der Materialbedarf und die Energiequelle für die Strombereitstellung in der Bauteilfertigung haben den größten Einfluss auf das Treibhauspotential. Eine Ausnahme bildet die thermoplastische SotA Fertigungsprozesskette, was auf den Prozessenergiebedarf in der Bauteilfertigung zurückzuführen ist. Wird für die Organoblechherstellung eine öl beheizte Intervall-Heißpresse eingesetzt, steigt dieser signifikant an. Dieser Effekt wird durch Maßnahmen, die zu einem höheren gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf führen, wie eine geringe Bauteilwandstärke und lange Prozesszeiten verstärkt. Insgesamt kann ausgehend vom mittleren Produktionsszenario das Eutrophierungspotential um durchschnittlich 25% und das Treibhauspotential um durchschnittlich 55% reduziert werden.

Innerhalb der Fertigung ist es oftmals interessant, welche Möglichkeiten zur Energieeinsparung vorhanden sind und in welchem Maß diese zur Reduktion der Umweltwirkungen beitragen. Die Detailuntersuchungen der Fertigungsprozessketten waren überlagert von den Umweltwirkungen der Faserherstellung, es konnten aber keine Interaktionen zwischen den einzelnen Prozessparametern in der Bauteilfertigung festgestellt werden. Maßnahmen, die jeweils zu einer Reduktion des gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarfs führen, tragen auch zu einer Senkung der Umweltwirkungen bei und verstärken sich gegenseitig. Dies gilt auch wenn erneuerbare Energien für die Strombereitstellung eingesetzt werden, wobei die erzielbaren Reduktionspotentiale deutlich geringer sind. Hierbei zeigt Strom aus Wasserkraft die geringsten Umweltwirkungen auf. Für eine energetische und ökologische Optimierung der Fertigungsprozesskette können daher die Ergebnisse der Energieeffizienzanalyse veröffentlicht in Hohmann et al. [74] herangezogen werden.

Ab welcher Verschnitttrate ist der Einsatz einer prozessenergieaufwendigeren Legetechnologie ökologisch sinnvoller als die Verarbeitung von flächigen, textilen Halbzeugen (SotA Prozessketten)?

Auch diese Frage wurde anhand den Wirkungskategorien mit der höchsten ökologischen Priorität beantwortet. Weiterhin muss bei einer Gegenüberstellung unterschiedlicher

Prozessketten sichergestellt sein, dass der Nutzen der hergestellten Produkte vergleichbar ist. Da sowohl die SotA als auch die verschnittarmen Fertigungsprozessketten je nach Bauteilkomplexität und Lastanforderungen aus technologischer bzw. funktioneller Sicht Vor- und Nachteile aufweisen, wurde ein Korrekturfaktor als zusätzliche Variable eingeführt.

Die Ausprägung des Eutrophierungspotentials wird nahezu ausschließlich von den Umweltwirkungen der Faserherstellung und des Materialbedarfs in der Bauteilfertigung beeinflusst. Dementsprechend wird, sofern die Verschnittraten bei den Fertigungsprozessketten gleich sind, d.h. der Verschnitt in der SotA Fertigungsprozesskette der Verschnittarmen entspricht, die Prozesskette mit den geringeren Umweltwirkungen über den gewichtsspezifischen Nutzen bestimmt. Weisen die Produkte beider Fertigungsprozessketten die gleichen Funktionseigenschaften bei identischem Gewicht auf, haben diese auch die gleichen Umweltwirkungen. Wird bei einer Fertigungsprozesskette mehr Material benötigt um die gleichen Funktionseigenschaften zu erzielen, sind die Umweltwirkungen dieser auch höher. Sobald der Verschnitt der SotA Fertigungsprozesskette höher ist als der der verschnittarmen Fertigungsprozesskette, führt die Herstellung eines Produkts mit der verschnittarmen Fertigungsprozesskette unabhängig vom zu verarbeitenden Matrixsystem zu geringeren Umweltwirkungen. Bei einem doppelt bzw. dreifach so hohen Materialverschnitt in der SotA Prozesskette, muss das entsprechende Produkt einen um 15 bzw. 25% höheren Nutzen bzw. geringeres Gewicht aufweisen, um vergleichbare Umweltwirkungen in der Herstellungsphase zu erreichen.

Beim Treibhauspotential, hat die duroplastische SotA Fertigungsprozesskette bei vergleichbarem Materialverschnitt und bei gleichen gewichtsspezifischen Funktionseigenschaften geringfügig niedrigere Umweltwirkungen. Dieser Effekt wird verstärkt, wenn in der Produktion der Strom Mix verwendet wird und Randbedingungen vorherrschen, die zu einem hohen gewichtsspezifischen Prozessenergiebedarf führen. Bereits ab einem textilen Verschnitt (2D) von ca. 5% in der SotA Fertigungsprozesskette, stellt die verschnittarme Fertigungsprozesskette, sofern die gleichen gewichtsspezifischen Funktionseigenschaften durch das Produkt erfüllt werden können, die Prozesskette mit dem geringeren Treibhauspotential dar. Bei den thermoplastischen Fertigungsprozessketten ist sofern Produktionsrandbedingungen gewählt werden, die zu geringen Treibhausgasemissionen führen, ein ähnliches Verhalten feststellbar. Wenn Produktionsrandbedingungen vorliegen, die zu einem hohen Prozessenergiebedarf führen, weist unabhängig von der Verschnitttrate der SotA Fertigungsprozesskette, die verschnittarme Fertigungsprozesskette die geringeren Umweltwirkungen auf.

Welchen Einfluss hat die Bauteilfunktionalität bei einem ökologischen Vergleich von duroplastischen und thermoplastischen Fertigungsprozessketten?

Um diese Fragestellung zu beantworten, wurden exemplarisch die beiden verschnittarmen Fertigungsprozessketten miteinander verglichen. Hierbei konnte, wie auch beim

Vergleich der SotA und verschnittarmen Prozesskette festgestellt werden, dass beim Eutrophierungspotential die Produktionsparameter in der Bauteilfertigung nahezu keinen Einfluss haben. Lediglich der Material- bzw. Faserverschnitt und -bedarf ist relevant (vgl. Abb. 7-5). Die Fertigungsprozesskette mit dem geringsten Materialbedarf führt daher auch zu den niedrigsten Umweltwirkungen. Dieser wird über den anfallenden Materialverschnitt, aber auch über die matrixabhängigen gewichtsspezifischen Funktionseigenschaften definiert.

Die Treibhausgasemissionen sind, sofern bei gleichem Materialbedarf die gleiche Bauteilfunktionalität gegeben ist, bei der duroplastischen Fertigungsprozesskette i.V. zur Thermoplastischen geringer. Der Unterschied nimmt mit steigender Verschnitttrate zu. Während bei einer verschnittfreien Produktion das thermoplastische Bauteil mindestens um 10% leichter bzw. einen höheren Nutzen aufweisen muss, um die gleichen Umweltwirkungen zu erzielen, sind es bei einer durchschnittlichen Verschnitttrate von 20% schon bis zu 15%.

8.2 Ausblick

Bei allen durchgeführten Untersuchungen weist das Eutrophierungspotential, aufgrund der bei der Carbonfaserherstellung freigesetzten Stickstoffverbindungen, eine hohe ökologische Priorität auf. Um das Eutrophierungspotential zu senken gibt es zwei unterschiedliche Ansätze. Zum einen wurde aufgrund der Datenunsicherheit in dieser Arbeit das Extrema in Form von unterschiedlich freigesetzten Stickstoffverbindungen betrachtet. Bei einem Großteil dieser Emissionen handelt es sich aber vermutlich um Luftstickstoff, der nicht zur Eutrophierung beiträgt. Eine exaktere Datenerhebung könnte daher zu einer deutlichen Reduktion des Eutrophierungspotentials führen. Weiterhin können die Umweltwirkungen der restlichen Stickstoffemissionen durch den Einsatz einer Stickstoffaufbereitung gesenkt werden. Die Erkenntnisse dieser Arbeit hinsichtlich der weiteren Wirkungskategorien ändern sich hierdurch aber nicht.

Das Treibhauspotential der thermoplastischen SotA Fertigungsprozessketten wird u.a. durch den eingesetzten Pressentyp bei der Organoblechherstellung beeinflusst. Die bisherige Datenlage lässt vermuten, dass die elektrische Beheizung zu einer signifikanten Reduktion des Prozessenergiebedarfs führt. Um eine belastbare Aussage treffen zu können, sollten allerdings weitere Messreihen für unterschiedliche Anlagentypen beider Beheizungsarten erfolgen.

Eine große Herausforderung bei der Bewertung der Umweltwirkungen von CFK-Strukturen, ist der Umgang mit Produktionsabfällen. In dieser Arbeit wurden die Abfallströme aufgrund der verfügbaren Datenlage und der methodischen Komplexität nicht weiter betrachtet. Technologisch ist es bereits möglich, Produktionsabfälle in die Wertschöp-

fungskette beispielsweise in Form von Vliesen zurückzuführen [112-115]. Je nach Bilanzierungs- bzw. Allkokationsmethode [116,117] kann hierdurch der ökologische Einfluss des Produktionsabfalls reduziert werden. Für eine fundierte Bewertung müssen allerdings neben den anfallenden Energie- und Stoffströmen beim Recyceln und der Wiederaufbereitung der Fasern auch die funktionellen Eigenschaften der Rezyklatfaser- i.V. zu Neufasernmaterialien bekannt sein.

Zusammenfassend konnten durch die durchgeführten Analysen erste Aussagen über die ökologischen Vorteile sowie die entsprechenden Einflussgrößen bei den jeweiligen Fertigungsprozessketten getroffen werden. Sofern die Material- bzw. Prozesskettenwahl einen Einfluss auf die Bauteilfunktionalität hat, muss für eine fundierte und ganzheitliche Aussage die Nutzungsphase berücksichtigt werden. Die in dieser Arbeit generierten Erkenntnisse sind daher als Basis für weiterführende produktspezifische Analysen zu verstehen, welche sofern notwendig, die Nutzungs- und EoL-Phase mitbeinhalten.

Literaturverzeichnis

- [1] Eickenbusch H., Krauss O.: *Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien*. VDI Zentrum Ressourceneffizienz Kurzanalyse Nr. 3 und Dokumentation des Fachgesprächs, März 2013.
- [2] Edenhofer O., et al.: *Mitigation of Climate Change*. Contribution of Working Group III to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, Cambridge University Press, USA, 2014.
- [3] Schmitz S., Paulini I.: *Bewertung in Ökobilanzen - Methode des Umweltbundesamtes zur Normierung von Wirkungsindikatoren, Ordnung (Rangbildung) von Wirkungskategorien und zur Auswertung nach ISO 14042 und 14043*. Umweltbundesamt Texte 92|99 Version '99.
- [4] Schauerte O.: *Werkstoffe für die Elektromobilität*. Werkstoffplus Auto 2017, Stuttgart, Februar 2017.
- [5] Reddemann J.: *Nachhaltiger Leichtbau durch Thermoplastische CFK-Verarbeitung im In-Mould-Prozess*. Werkstoffplus Auto 2017, Stuttgart Februar 2017.
- [6] E-mobil BW GmbH: *Leichtbau in Mobilität und Fertigung - Ökologische Aspekte*. 2013
- [7] Hilmer P.: *Ressourceneffizienz von Fertigungsverfahren für Faserverbundwerkstoffe*. Doktorarbeit, TU Braunschweig, 2015.
- [8] Kienzle S.: *Future vehicle body concepts*. Werkstoffplus Auto 2017, Stuttgart, Februar 2017.
- [9] Hattrup-Silberberg M.: *CO₂-Regulierung sorgt bis 2030 für dreistelliges Milliardenwachstum im Leichtbau*. <https://www.mckinsey.de/co2-regulierung-sorgt-bis-2030-f%C3%BCr-dreistelliges-milliardenwachstum-im-leichtbau>. Zugriff am 21.08.2017.
- [10] Leohold J.: *Chancen und Grenzen für einen nachhaltigen FVK-Einsatz im Automobil*. CCEV Automotive Forum 2011, Ingolstadt, Juni 2011.
- [11] Albrecht S., Hohmann A., Schüppel D.: *MAI Enviro | MAI Enviro 2.0*. MAI Carbon Ergebniskonferenz, Augsburg, Juli 2017.
- [12] DIN EN ISO 14040: *Umweltmanagement – Ökobilanz – Grundsätze und Rahmenbedingungen*.
- [13] Albrecht S., Hohmann A.: *MAI Enviro –Vorstudie zur Lebenszyklusanalyse mit ökobilanzieller Bewertung relevanter Fertigungsprozessketten für CFK-Strukturen*. CCEV AG Umweltaspekte, Augsburg, Dezember 2014.
- [14] Reinhardt S.K.C.: *Bewertung der Ressourceneffizienz in der Fertigung*. Doktorarbeit, TU München, 2013.

- [15] Weidema Bo P.: *Comparing Three Life Cycle Impact Assessment Methods from an Endpoint Perspective*; Journal of Industrial Ecology 19(1), 2014.
- [16] Duflou J.R., et al.: *Environmental impact analysis of composite use in car manufacturing*. CIRP Annals - Manufacturing Technology 58:9-12, 2009.
- [17] Hohmann A., et al.: *MAI Enviro - Vorstudie zur Lebenszyklusanalyse mit öko-bilanzieller Bewertung relevanter Fertigungsprozessketten*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2015.
- [18] Das S.: *Life cycle assessment of carbon fiber-reinforced polymer composites*. International Journal of Life Cycle Assessment 16:268-282, 2011.
- [19] Suzuki T., Takahashi J.: *LCA of lightweight vehicles by using CFRP for mass-produced vehicles*. <https://www.researchgate.net/publication>. Zugriff am 05.07.2017.
- [20] <http://www.sglacf.com/en/production/moses-lake-usa/production-process-mol.html>. Zugriff am 11.08.2017.
- [21] GaBi-Datensatz Strom-Mix EU-28, UUID {0A1B40DB-5645-4DB8-A887-EB09300B7B74}, Dokumentation direkt aus der Datenbank Version 8.6 SP33.
- [22] GaBi-Datensatz Strom-Mix USA, UUID {6B6FC994-8476-44A3-81CC-9829F2DFE992}, Dokumentation direkt aus der Datenbank Version 8.6 SP33.
- [23] Kraus T., Kühnel M., Witten E.: *Composite-Marktbericht 2016 - Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen*. CCeV und AVK, November 2016.
- [24] Kraus T., Kühnel M., Witten E.: *Composite-Marktbericht 2015 - Marktentwicklungen, Trends, Ausblicke und Herausforderungen*. CCeV und AVK, September 2015.
- [25] Das S., Warren J., West D., Schexnayder S.M.: *Global Carbon Fiber Composites Supply Chain Competitiveness Analysis*. Technical Report, Clean Energy Manufacturing Analysis Center, Mai 2016.
- [26] Griffing E.: *Carbon fiber from PAN – Contents of Factory Gate of Factory Gate Life Cycle Inventory Summary*. 2009.
- [27] Achternbosch M., Bräutigam K.-R., Kupsch C., Reßler B., Sardemann G.: *Analyse der Umweltauswirkungen bei der Herstellung, dem Einsatz und der Entsorgung von CFK- bzw. Aluminiumrumpfkompnenten*. Wissenschaftliche Berichte FZKA 6879, Forschungszentrum Karlsruhe, 2003.
- [28] Stiller H.: *Material Intensity of Advanced Composite Materials*. Wuppertal Papers Nr. 90, <https://epub.wupperinst.org/files/926/WP90.pdf>. Zugriff am 05.07.2017.

- [29] De Vegt O.M., Haije W.G.: *Comparative environmental life cycle assessment of composite materials*. ECN-I--97-050, Dezember 1997.
- [30] Meng F., McKechnie J., Turner T.A., Pickering S.J.: *Energy and environmental assessment and reuse of fluidised bed recycled carbon fibres*. Composites: Part A 100:206-214, Mai 2017.
- [31] Khalil Y.F.: *Eco-efficient lightweight carbon-fiber reinforced polymer for environmentally greener commercial aviation industry*. Sustainable Production and consumption 12:16-26, Mai 2017.
- [32] Hedlund-Åström A.: *Model for End of Life Treatment of Polymer Composite Materials*. Doktorarbeit, Royal Institute of Technology Stockholm, 2005.
- [33] Wetjen D.: *Wechselwirkung von Carbonfasern, Schlichte und epoxidbasierter polymerer Matrix in carbonfaserverstärkten Kunststoffen*. Doktorarbeit, Universität Augsburg, 2016.
- [34] Universität Augsburg: *MAI Polymer - Zentrum für Faser-Matrix-Anbindung: Anwendungsangepasste thermoplastische Matrix/Schlichte-Systeme*. Abschlussbericht, FKZ 03MAI11A, April 2016.
- [35] Orlishausen M.: *Bestimmung des Faservolumengehalts kohlenstofffaserverstärkter Kunststoffe mittels thermogravimetrischer Analyse*. Masterarbeit, Universität Augsburg, 2015.
- [36] Kupfer T., et al.: *GaBi Database & Modelling Principles*. www.gabi-software.com/fileadmin/GaBi_Databases/GaBi_Modeling_Principles_2017. Zugriff am 05.05.2017
- [37] Morgan P.: *Carbon fibers and their composites*. Taylor & Francis, London, 2005.
- [38] Beckmann M.: *Beschreibung unterschiedlicher Techniken und deren Entwicklungspotentiale zur Minderung von Stickstoffoxiden im Abgas von Abfallverbrennungsanlagen und Ersatzbrennstoff-Kraftwerken hinsichtlich Leistungsfähigkeit, Kosten und Energieverbrauch*. Umweltbundesamt, Texte 71/2011, März 2011.
- [39] Song Y.S., Youn J.R., Gutowski T.G.: *Life cycle energy analysis of fiber-reinforced composites*. Composites: Part A 40:1257–1265, Mai 2009.
- [40] Witik R.A., Gaille F., Teuscher R., et al.: *Economic and environmental assessment of alternativ production methods for composite aircraft components*. Journal of Cleaner Production 29-30:91-102, März 2012.
- [41] Plastics Europe: *Daten und Fakten zu Kunststoff 2007 – Kunststoffproduktion, Verbrauch und Verwertung in Europa 2007*. Kunststoff-Werkstoff des 21. Jahrhunderts, Oktober 2008.

- [42] Mersiowsky I.: *Eco-profiles and Environmental Declarations*. PlasticsEurope, Version 2.0, April 2011.
- [43] Suzuki T., Takahashi J.: *Prediction of Energy Intensity of Carbon fiber reinforced plastics for mass-produced passenger cars*. 9th Japan International SAMPE Symposium, Dezember 2005.
- [44] Pervaiz M., Sain M.M.: *Carbon storage potential in natural fiber composites*. Resources, Conservation and Recycling 39:325-340, 2003.
- [45] Lindner F., Schmitt R.: *Goal-oriented Life Cycle Investigations for composite manufacturing chains*. The 22nd CIRP conference on Life Cycle Engineering, Procedia CIRP 29:438-443, 2015.
- [46] Dhingra R., Overly J.G., Davis G.A.: *Life-cycle environmental evaluation of aluminium and composite intensive vehicles*. Center for Clean Products and Clean Technologies, März 1999.
- [47] Zushi H., Takahashi J., et al.: *Life Cycle Assessment and Long Term CO₂ Reduction Estimation of Ultra Lightweight Vehicles Using CFRP*. Key Engineering Materials 243-244:45-50, Juli 2003.
- [48] Ehrenberger S.: *Ökologische Bilanzierung von Leichtbaukonzepten im Automobilbau*. AK Umweltaspekte des CCeV, Mai 2012.
- [49] Tokieda J., Junji Tokieda Ozawa T., Yoshida T., Aida S., Oya L.: *The MIRAI – Life cycle Assessment report for communication*; Toyota Motor Corporation, Juni 2015.
- [50] Ecabert B., Wakeman M.D., Blanc I., et al.: *Coupled cost and life cycle modeling of composite car-bodies for the Korean tilting train express project*. SAMPE EUROPE International Conference 2006, Paris, 2006.
- [51] Rankine R.K., Chick J.P., Harrison G.P.: *Energy and carbon audit of a rooftop wind turbine*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Vol. 220 Part A: Journal of Power and Energy, 2006.
- [52] Duflou J.R., Deng Y., van Acker K., Dewulf W.: *Do fiber-reinforced polymer composites provide environmentally benign alternatives? A life-cycle-assessment-based study*. MRS BULLETIN 37:374-382, April 2012.
- [53] Engels A., Roehrig M., Witte T.: *Possible optimization of the energy balance in the automotive sector by the use of carbon composite structures*. Evolving Energy-IEF International Energy Congress, Procedia Engineering 49:303-309, August 2012.
- [54] Scelsi L., Bonner M., Hodzic A., Soutis C., Wilson C., Scaife R., Ridgway K.: *Potential emissions savings of lightweight composite aircraft components evaluated through life cycle assessment*. eXPRESS Polymer Letters 5(3):209-217, 2011.

- [55] Timmis A., Hodzic A., et al.: *Environmental impact assessment of aviation emission reduction through the implementation of composite materials*. International Journal of Life Cycle Assessment, 20(2):233-243, 2015.
- [56] Nothdurft N.: *Integrierte Umweltkostenrechnung von Faserverbundfertigungsprozessen am Beispiel einer CFK-Flügelrippe*. Diplomarbeit, TU Braunschweig in Zusammenarbeit mit dem DLR Braunschweig; 2016.
- [57] Jahn J.: *Prozesskettenvergleich von CFK-Produkten - Umsetzungsbeispiele aus Sport- und Medizintechnik*. GFB-Kolloquium, Augsburg, September 2017.
- [58] Bockelmann P.: *Process Control in Compression Molding of Composites*. Doktorarbeit, TU München, 2017.
- [59] Doege E., Derenthal M.-J., Palis F., Willenberg M.: *Senkung des Energieverbrauchs mechanischer Tiefziehpressen*. EFB-Forschungsbericht Nr. 157, 2001.
- [60] RECIPE: *2005 European benchmarking survey of energy consumption and adoption of best practice; Analysis of a survey of the European plastics processing industry conducted from April to September 2005*. September 2005.
- [61] Thiriez A., Gutowski T.: *An environmental analysis of injection molding*. Electronics and the Environment, Proceedings of the 2006 IEEE International Symposium, Mai 2006.
- [62] Diaz N., Ninomiya K., Noble J., Dornfeld D.: *Environmental impact characterization of milling and implications for potential energy savings in industry*. 5th CIRP Conference on High Performance Cutting 2012, Procedia CIRP 1:518-523, 2012.
- [63] Dahmus J.B., Gutowski T.G.: *An environmental analysis of machining*. Proceedings of IMECE04, ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition, USA, November 2004.
- [64] Ciceri N.D., Gutowski T.G., Garetti M.: *A Tool to Estimate Materials and Manufacturing Energy for a Product; Sustainable Systems and Technology (ISSST)*. 2010 IEEE International Symposium, May 2010.
- [65] Drechsler K.: *Flexible intelligente Bearbeitungstechnologien für komplexe Faserverbundbauteile*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2016.
- [66] Frick G.P.: *Technische und wirtschaftliche Aspekte einer roboterbasierten Fertigungszelle zur kombinierten Bearbeitung von CFK-Strukturen*. Bachelorarbeit, Universität Augsburg, 2015.
- [67] Witten E., Mathes V.: *Handbuch Faserverbundkunststoffe/Composites - Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen*. AVK – Industrievereinigung Verstärkte Kunststoff e e.V., Springer Vieweg, 4. Auflage, 2014.

- [68] Hodzic A., Soutis C., Wilson C., Scaife R., Ridgway K.: *Advanced composite manufacturing methods and life cycle analysis of emission savings*. Seico 10 SAMPE EUROPE 31st Conference proceedings, 2010.
- [69] Arikan E., Kammerhofer P., Reppe M., Weiland J.: *LEETORB – Lightweight, Energy-Efficient Tooling for the Manufacturing of Rotor Blades*. FP7-JTI Technical Report – Project ID: 325936, https://cordis.europa.eu/result/rcn/184040_en.html. Zugriff am 09.06.2018.
- [70] Arikan E., et al.: *Energy efficiency and ecological benefits of a self-heated CFRP tool designed for resin transfer moulding*. ECCM17 Conference proceedings, München, 2016.
- [71] Dreyer L.C., et al.: *Comparison of Three Different LCIA Methods: EDIP97, CML2001 and Eco-indicator 99 Does it matter which one you choose?*. International Journal of Life Cycle Assessment 8:191-200, 2003.
- [72] <http://www.plasticseurope.org>. Zugriff am 31.05.2017
- [73] <http://www.worldsteel.org>. Zugriff am 31.05.2017
- [74] Hohmann et al.: *Recommendations for resource efficient and environmentally responsible manufacturing of CFRP products*. Carbon Composites e.V., Juni 2018.
- [75] Drechsler K., Ebel C., Zaremba S.: *Production Technologies for Composite Parts*. Vorlesungsunterlagen der TU München Lehrstuhl LCC, 2015.
- [76] Sattler, S.: *Vollautomatisierte Preformherstellung für die Carbon-Bauteilfertigung. Für die Großserie*. Lightweight design 8(1):56-58, 2015.
- [77] Cherif C.: *Textile Werkstoffe für den Leichtbau. Techniken - Verfahren - Materialien - Eigenschaften*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2011.
- [78] BMW AG (2010): *Pressemappe - Innovationstage - Mobilität der Zukunft*. <https://www.press.bmwgroup.com/deutschland/article/detail/T0081729DE/presse-mappe-innovationstage-mobilitaet-der-zukunft?language=de>. Zugriff am am 30.04.2017.
- [79] Friedrich H.E.: *Leichtbau in der Fahrzeugtechnik*. Springer Vieweg (ATZ / MTZ-Fachbuch), 2. Auflage, 2017.
- [80] Flemming M., Ziegmann G., Roth S.: *Faserverbundbauweisen: Halbzeuge und Bauweisen*. Springer-Verlag, Berlin, 2013
- [81] Schlimbach J.: *Prozesskette zur ressourceneffizienten Composite-Herstellung für die E-Mobilität – PRESCHE*. VDI Fortschritt-Berichte Reihe 5 Nr. 757, VDI Verlag, Düsseldorf, 2015.
- [82] Marsh G.: *Wing Worker for the World*. Reinforced Plastics 54(3):24-28, Juni 2010.

- [83] Lorincz J.: *Composites fly lighter, stronger - Tape laying and fibre placement systems automate composite structure production and reduce costs*. <http://advancedmanufacturing.org>. Zugriff am 05.07.2017.
- [84] Schmitt S.: *High performance composites manufacturing using advanced automated fiber placement (AFP)*. Symposium anlässlich des 5. Geburtstags des Lehrstuhls für Carbon Composites der TU München, 2014.
- [85] Drechsler K., Chatzigeorgiou L., Niefnecker D., Hoffmann J., Schießler C., Schmitt S., Wirtz T.: *Fiber Placement Technologien für komplexe Luftfahrtstrukturen – Von der anwendungsorientierten Forschung bis zum Technologietransfer im industriellen Umfeld*. Präsentation auf dem Deutschen Luftfahrt- und Raumfahrtkongress, Augsburg, 2014.
- [86] Hohmann A., et al.: *Resource efficiency and environmental impact of fiber reinforced plastic processing technologies*. Springer Verlag Production Engineering 1-13, 2018.
- [87] Witzel V., Karb I.: *Legekopf und Vorrichtung zum Aufbau eines dreidimensionalen Vorformlings für ein Bauteil aus einem Faserverbundwerkstoff*. Europäische Patentschrift, EP 2 836 355 B1, Oktober 2017.
- [88] Göttinger M., Kaiser M.: *Vorrichtung und Verfahren zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoff-Bauteilen darstellen*. Europäische Patentschrift, EP 2 694 264 B1, August 2015.
- [89] Rimmel O., Mack J., Becker D., Mitschang P.: *Automatisierte Faserdirektablage mit Online-Bebinderung*. Lightweight design 10(2):56–61, 2017.
- [90] Rimmel O., Becker D., Mitschang P.: *Maximizing the out-of-plane-permeability of preforms manufactured by dry fiber placement*. Advanced Manufacturing: Polymer & Composites Science 2(3-4):93-102, 2016.
- [91] Neitzel M., Mitschang P., Breuer U.: *Handbuch Verbundwerkstoffe. Werkstoffe, Verarbeitung, Anwendung*. Carl Hanser Fachbuchverlag, 2. Auflage München 2014.
- [92] Dirschmid F., Weiss T.: *Die CFK-Karosserie des BMW i8 und deren Auslegung*. Karosseriebautage Hamburg, Springer Fachmedien Wiesbaden, 2014.
- [93] Hofbauer D., Kroll L., Kaufmann J., Repper A., Pfitzer H.: *Faserverbundtechnologien für Automobilkomponenten in der Großserie*. Lightweight Design 7(6):40-45, 2014.
- [94] Fries E., Renkl J., Schmidhuber S., Betsche M.: *Hochdruck-RTM-Technologie gewinnt an Flexibilität*. Compositesworld 12-14, September 2012.

- [95] Kugler M.: *Kostenprognosemodell zur Wirtschaftlichkeitsanalyse von CFK-Fertigungsprozessketten*. Masterarbeit, Institut für Materials Resource Management, Universität Augsburg, 2017.
- [96] Breuer U.P.: *Beitrag zur Umformtechnik gewebeverstärkter Thermoplaste*. Doktorarbeit, Universität Kaiserslautern, 1997.
- [97] AUDI AG: *MAI plast – Entwicklung kosteneffizienter Verarbeitungstechnologien zur automatisierten Prozessierung von thermo-plastischen Hochleistungsverbundwerkstoffen für Großserienanwendungen*. Abschlussbericht, FKZ 03MAI01A, Dezember 2015.
- [98] GaBi-Datensatz Strom-Mix DE, UUID {A1388758-0402-40C4-976B-6A805C8E46E0}, Dokumentation direkt aus der Datenbank Version 8.6 SP33.
- [99] Jewell W., Van (Amy) Le K., Manley K., Otis R.: *Design of a Unit Process: Thermoforming*. PTFE 4210: Polymer & Fiber Engineering Design II, April 2012.
- [100] Dörnen C.: *Charakterisierung eines Infrarot-Heizstrahlersystems*. Praktikum, Institut für Physik, Universität Augsburg, 2015.
- [101] Razavi S., Gupta H.V.: *What do we mean by sensitivity analysis? The need for comprehensive characterization of “global” sensitivity in Earth and Environmental systems models*. Water Resources Research 51: 3070-3092, 2015.
- [102] Truong K.: *Energieeffizienzanalyse unterschiedlicher Hilfsprozesse*. Praktikum, Hochschule Augsburg, 2016.
- [103] Bissinger P.: *Energetische Charakterisierung der Fiberforge-Technologie*. Bachelorarbeit, Hochschule Augsburg, 2014.
- [104] MKS Umetrics: *User Guide to MODDE version 10.1*. Schweden, Februar 2014.
- [105] Faber M.H.: *Statistics and Probability Theory*. Springer Science+Business Media B.V., 2012.
- [106] Montgomery, D.C.: *Design and analysis of experiments*. John Wiley & Sons, Inc., 7. Auflage, 2009.
- [107] Albrecht I.: *Wahrscheinlichkeitstheorie und Statistik: Grundlagen - Resultate – Anwendungen*. B.G. Teubner Verlag; 1. Auflage, Juni 2001.
- [108] Siebertz K., van Bebbber D., Hochkirchen T.: *Statistische Versuchsplanung - Design of Experiments (DoE)*. Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2010.
- [109] Kleppmann W.: *Versuchsplanung – Produkte und Prozess optimieren*. Carl Hanser Verlag München Wien, 7. aktualisierte und erweiterte Auflage, 2011.
- [110] <https://www.universiteitleiden.nl/en/research/research-output/science/cml-ia-characterisation-factors#downloads>. Zugriff am 28.08.2017

- [111] Bertau M., Müller A., Fröhlich P., Katzberg M., Büchel K.H., Moretto H.H., Werner D.: *Industrielle Anorganische Chemie*. John Wiley & Sons, 4. Auflage, 2013.
- [112] Manis F., Schmiege M., Sauer M., Drechsler K.: *Properties of second life carbon fibre reinforced polymers*. Im Tagungsband des 21. Symposium Verbundwerkstoffe und Werkstoffverbunde, Juli 2015.
- [113] Wölling J., Schmiege M., Manis F., Drechsler K.: *Nonwovens from recycled carbon fibres – comparison of processing technologies*. 1st CIRP Conference on Composite Materials Parts Manufacturing, Procedia CIRP 66:271-276, 2017.
- [114] Meng F., McKechnie J., Pickering S.J.: *An assessment of financial viability of recycled carbon fibre in automotive applications*. Composites Part A 109:207-220, 2018.
- [115] Schwingenschlögl A., Endres A., Harbers T., Lütke C., Teufl D.: *Use of recycled (carbon) fibers in wetlaid-nonwovens - Current status, potentials and ongoing research efforts*. Konferenzbeitrag CAMX 2016 - The Composite and Advanced Materials Expo, USA, 2016.
- [116] Koffler C., Florin J.: *Tackling the downcycling issue – A revised approach to value-corrected substitution in life cycle assessment of aluminum (VCS 2.0)*. Sustainability 2013 5:4546-4560, Oktober 2013.
- [117] Ekvall T., Tillmann A.M.: *Open-loop recycling: Criteria for allocation procedures*. International Journal of Life Cycle Assessment, 2(3):155-162, 1997.
- [118] <http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-database-2017-lci-documentation/professional-database-2017/>. Zugriff am 30.05.2017.
- [119] <http://www.gabi-software.com/support/gabi/gabi-database-2017-lci-documentation/extension-database-x-machining-processes/>. Zugriff am 30.05.2017.
- [120] Steiner R., et al.: *Metals Processing and Compressed Air Supply*. Ecoinvent Report Nr. 23, 2007.
- [121] Jörg A.T., Wagener H.-W.: *Energiebilanz beim Betrieb von Exzenterpressen für die Blechumformung*. Stahl und Eisen 107(21), 1987.

A Anhang

a Hintergrunddatensätze

Tab. A-1: Verwendete Hintergrunddatensätze [118,119]

Baustein	Datensatzbezeichnung in der GaBi Datenbank
PAN-Faser	Polyacrylonitrile Fibres (PAN); from acrylonitrile and methacrylate; production mix, at plant; PAN without additives EU-28 UUID: db00901a-338f-11dd-bd11-0800200c9a66
Stickstoff	Nitrogen (gaseous); via cryogenic air separation; production mix, at plant; 1.250 kg/m ³ , 14.0 g/mol EU-28 UUID: 4a259aec-c66f-4375-aa9e-5b8c745addc0
Schwefelsäure	Sulphuric acid (96%); concentrated, sulphur dioxide route; single route, at plant; 96%, 1.84 g/cm ³ EU-28 UUID: b9c0154-1389-4f19-bcc1-15acc086624e
Ammoniumchlorid	31,8% Ammonia mix (NH ₃); Haber-Bosch process, from natural gas; production mix, at plant; 0.7714 kg/m ³ , 17.03 g/mol EU-28 UUID: 7963a3c7-823f-47a7-a761-cd04a4fecc40 68,2% Hydrogen chloride; technology mix; production mix for PVC production, at plant RER UUID: c71f9b0f-be89-4be7-a00c-086230324492
Epoxidharz (Matrix und Binder)	Epoxy resin; technology mix; production mix, at producer RER UUID: 49268476-816a-4a86-abb9-080e730bff6f
PU (Matrix und Binder)	47% Methylenediphenyl diisocyanate ((p)MDI); phosgenation of methylenedianiline (MDA); production mix, at plant; polymeric MDI ((p)MDI) EU-27 UUID: d7679212-da86-4656-b9d7-24423e64a68d 53% Polether polyol, production mix DE UUID: 0CA1283F-507C-46BC-A632-F37AFC25D61D
UP (Matrix und Binder)	Polyester Resin unsaturated (UP); esterification and polymerization, from propylene glycol, phthalic anhydride and styrene; single route, at plant; 1.22 to 1.38 g/cm ³ DE UUID: b6801f51-3d8e-47d1-96bb-dbbea7b14e16
PA6-Granulat (Matrix und Binder)	Polyamide 6.6 Granulate (PA 6.6) Mix; technology mix; consumption mix, to consumer; PA 6.6 granulate DE UUID: ece7efc0-b02a-4d80-9328-32a969bdab2c
PP-Granulat (Matrix und Binder)	Polypropylene granulate (PP) mix; technology mix; consumption mix, to consumer; 0.86 to 0.95 g/cm ³ , 43 MJ net calorific value

Baustein	Datensatzbezeichnung in der GaBi Datenbank
	DE UUID: 313b4865-e554-4f3a-bbaf-ecab7c15c061
Folienherstellung	Plastic Film (PE, PP, PVC); single route, at plant; PE, PP, PVC GLO UUID: 7094f46a-2202-44e5-a1cc-8e939be9ff6b
Nähgarn	Polyethylene terephthalate fibres (PET); esterification of dimethyl terephthalate with ethylene glycol; single route, at plant; 1.38 g/cm ³ , 192.17 g/mol per repeating unit; EU-28 UUID: db00901c-338f-11dd-bd11-0800200c9a66
EU Strom Mix	Electricity grid mix 1kV-60kV; AC, technology mix; consumption mix, to consumer; 1kV - 60kV EU-28 UUID: 0a1b40db-5645-4db8-a887-eb09300b7b74
EU Strom aus Windkraft	Electricity from wind power; AC, technology mix of onshore and offshore; production mix, at plant; 1kV - 60kV EU-28 UUID: fe1c3d03-072b-4da7-8fff-3505f9b01efc
EU Strom aus Wasserkraft	Electricity from hydro power; AC, technology mix of run-off-river, storage and pump storage; production mix, at power plant; 1kV - 60kV EU-28 UUID: 99aa831c-4c28-438f-a87a-82382f5ef5df
Japan Strom Mix	Electricity grid mix 1kV-60kV; AC, technology mix; consumption mix, to consumer; 1kV - 60kV JP UUID: 19169ab6-39e6-4cb6-88a3-871648b2cb7f
Japan Strom aus Windkraft	Electricity from wind power; AC, technology mix of onshore and offshore; production mix, at plant; 1kV - 60kV JP UUID: 21ac06e3-a2f8-4ea9-9a14-dba519d157a2
Japan Strom aus Wasserkraft	Electricity from hydro power; AC, technology mix of run-off-river, storage and pump storage; production mix, at power plant; 1kV - 60kV JP UUID: b7eb436c-3147-4306-8f15-0e33d41d0151
USA Strom Mix	Electricity grid mix; AC, technology mix; consumption mix, to consumer; <1kV US UUID: 6B6FC994-8476-44A3-81CC-9829F2DFE992
USA Strom aus Windkraft	Electricity from wind power; AC, technology mix of onshore and offshore; production mix, at plant; 1kV - 60kV US UUID: 2396c794-75d3-48b3-8933-6eebb701d1b7
USA Strom aus Wasserkraft	Electricity from hydro power; AC, technology mix of run-off-river, storage and pump storage; production mix, at power plant; 1kV - 60kV US UUID: b551703f-a21d-40a4-a018-e3b195d85e42
DE Strom Mix	Electricity grid mix 1kV-60kV; AC, technology mix; consumption mix, to consumer; 1kV - 60kV

Baustein	Datensatzbezeichnung in der GaBi Datenbank
	DE UUID: a1388758-0402-40c4-976b-6a805c8e46e0
DE Strom aus Wasserkraft	Electricity from hydro power; AC, technology mix of run-off-river, storage and pump storage; production mix, at power plant; 1kV - 60kV DE UUID: 86a54b74-fc71-41fa-8bb0-4722e8c61357
DE Strom aus Biomasse	Electricity from biomass (solid); AC, mix of direct and CHP, technology mix regarding firing and flue gas cleaning; production mix, at power plant; 1kV - 60kV DE UUID: 61c386e2-65cf-4d79-af2f-1892799ac11b
DE Strom aus Photovoltaik	Electricity from photovoltaic; AC, technology mix of CIS, CdTE, mono crystalline and multi crystalline; production mix, at plant; 1kV - 60kV DE UUID: 9e55ee0e-2539-4015-ab03-a01529a91e57
EU Thermische Energie	Thermal energy from natural gas; technology mix regarding firing and flue gas cleaning; production mix, at heat plant; 100% efficiency EU-28 UUID: cfe8972e-6b51-4a17-b499-d78477fa4294
JP Thermische Energie	Thermal energy from natural gas; technology mix regarding firing and flue gas cleaning; production mix, at heat plant; 100% efficiency JP UUID: 6d45970c-0e42-4edd-b14e-12e2cd63e7ae
USA Thermische Energie	Thermal energy from natural gas; technology mix regarding firing and flue gas cleaning; production mix, at heat plant; 100% efficiency US UUID: 885a8641-0eae-4f2f-b191-ccc7335325bc
DE Thermische Energie	Thermal energy from natural gas; technology mix regarding firing and flue gas cleaning; production mix, at heat plant; 100% efficiency DE UUID: 009f27a6-f336-4200-81c0-28e4fa5638a4
Druckluft	Compressed air 7 bar (medium power consumption); 7 bar, medium efficiency; consumption mix, at plant; medium electricity consumption GLO UUID: 591678ea-db78-427a-8b62-f0c2a329c5bb
Prozess- /Kühlwasser	Process water; ion exchange, from groundwater; single route, at plant; 1000 kg/m ³ , 18 g/mol; EU-28 UUID: db009015-338f-11dd-bd11-0800200c9a66
IR-Heizung (Thermoformen von Kunststoffen)	Infrared Thermoforming (LDPE, HDPE, PS, PVC, PMMA, PA-6); production mix, at plant GLO UUID: fb81f05c-84f5-4583-ac68-91d03c894268

b Experimentelle Daten

Hilfsprozesse

Tab. A-2: Hilfsprozesse – Anlagendaten

CNC-Cutter					
Typ::	Geeignet für Carbonfasertextile				
Zuschneidefläche:	1,3 m x 2,5 m				
Slitter					
Typ:	Scherenschnitt mit angetriebenen Ober- und Untermessern				
Arbeitsbreite:	50 bis 600 mm				
Materialdicke:	0,1 bis 0,5 mm				
Max. Schnittgeschwindigkeit:	25 m/min				
Herstellbare Materialbreite:	6,35 bis 150 mm				
Schnittbreitentoleranz:	+/- 0,1 mm				
Hochdruckinjektionsanlage					
Anlagentyp:	2K-Injektionsanlage				
	Typ 1	Typ 2			
Max. Harzmenge:	~ 25 Liter	~ 23 Liter			
Max. Härtermenge:	~ 14 Liter	~ 23 Liter			
Max. Austragsmenge:	~ 8 Liter/min	12 Liter/min			
Max. Betriebsdruck:	290 bar	290 bar			
Vakuumpumpe					
	Typ 1	Typ 2	Typ 3	Typ 4	Typ 5
Saugvermögen:	5 m ³ /h	10 m ³ /h	25 m ³ /h	250 m ³ /h	260 m ³ /h

Tab. A-3: Hilfsprozesse – Versuchsmatrix

CNC-Cutter					
Vermessung drei verschiedener Bedeckungsgrade des Zuschnitttischs					
Slitter					
Variation der Schnittgeschwindigkeit von 3 m/min bis 20 m/min für Tape und Tow schlitzen					
Hochdruckinjektionsanlage					
Vermessung drei verschiedener Harztemperaturen (35 °C 60 °C 80 °C) und Injektionsdrücke					
Vakuumpumpe (Druckdifferenz zu atm)					
Pumpe 1	Pumpe 2	Pumpe 3	Pumpe 4	Pumpe 5	
6 h @ 50 mbar	6 h @ 50 mbar				
6 h @ 400 mbar	6 h @ 400 mbar				
6 h @ 700 mbar	6 h @ 700 mbar				
6 h @ 940 mbar	6 h @ 940 mbar	10 min @ 940 mbar	2 h @ 940 mbar	2min @ 940 mbar	

Dry-Fiber-Placement

Tab. A-4: Dry-Fiber-Placement – Anlagendaten

Legesystem:	Zwei unterschiedliche Roboterbasierte Legetechnologien (6-achs) mit/ohne einer zusätzlichen Liniennearachse
Roboter:	KR150, KR180, KR210, KR240
Max. Beschleunigung:	1 m/s ²
Max. Geschwindigkeit:	2 m/s
Legebreite:	ca. 200 mm und 50 mm
Positioniersystem:	Vertikal und Horizontal
Spulengatter:	Elektrisch angetriebene Spulen mit/ohne Bedruckung
Materialtyp:	Rovings oder Bindergarne
Fixierung:	Klebstoffauftrag, der über ein IR-Lampe erwärmt wird; Aktivierung von Bindergarne mittels IR- oder Lasersystem

Tab. A-5: Dry-Fiber-Placement – Versuchsmatrix

Datenerhebung	
Gesamtenergiebedarf:	Anlagentyp 1: Separater Schaltschrank für Spulengatter, Roboter, Legesystem (Förder- und Aktivierungseinheit) und Klebstoffbeheizung Anlagentyp 2: Separater Schaltschrank für Roboter und Legesystem (Spulengatter, Förder- und Aktivierungseinheit)
Druckluftverbrauch:	Separater Versuchsaufbau, Aufwand abhängig vom Anlagentyp
Kühlwasserbedarf:	Wird nur benötigt, wenn ein Laser als Aktivierungseinheit für Bindergarne eingesetzt wird; der Bedarf ist von der Laserleistung abhängig und kann dem Datenblatt entnommen werden
Anlagentyp 1	
Spulengatter Abzugsgeschwindigkeit	Leerlauf (ohne/mit Kühlung) und Vermessung von drei Abzugsgeschwindigkeiten
Legekopf Abzugsgeschwindigkeit	Leerlauf und Vermessung von drei Abzugsgeschwindigkeiten
IR Aktivierungseinheit	Korrelation eingestellter Heizleistung zum realen Verbrauch für drei Wert und unterschiedliche Heizzeiten; Korrelation der Lagenorientierung zur Heizzeit
Klebstoffbeheizung	Energiebedarf zum Aufheizen des Klebstoffs und zum Halten der Temperatur
Druckluftverbrauch	Volumenstrom für jeden Roving während des Legen
Gesamtenergiebedarf	Vermessung einer ebenen Platte und eines doppelt-gekrümmten Bauteils
Anlagentyp 2	
Spulengatter Abzugsgeschwindigkeit	Korrelation von sechs Abzugsgeschwindigkeiten und Umdrehungsgeschwindigkeiten zum Leistungsbedarf
Legekopf Abzugsgeschwindigkeit	Leerlaufleistung und Materialförderung an/aus
IR Aktivierungseinheit	Korrelation von vier verschiedenen Heizleistungen zum realen Verbrauch, gemittelt über unterschiedliche Legegeschwindigkeiten/ Heizzeiten (6 m Legelänge mit 0,3 m/s; 0,5 m/s und 1 m/s)

Laser Aktivierungseinheit	Korrelation von sieben verschiedenen nominellen Leistungswerten zum realen Verbrauch, gemittelt über unterschiedliche Legegeschwindigkeiten/ Heizzeiten; Legefläche 800 mm x 600 mm [0 90 +45 -45] _{sym} ; Lage 1 2: 0,4 m/s, 500 W; Lage 3 4: 0,4 m/s, 1.000 W; Lage 5 6: 0,4 m/s, 1.500 W; Lage 7 8: 0,4 m/s, 2.000 W; Lage 1 2: 0,8 m/s, 2.000 W; Lage 3 4: 0,8 m/s, 2.500 W; Lage 5 6: 0,8 m/s, 3.000 W; Lage 7 8 0,8 m/s, 3.500 W
Druckluftverbrauch	Korrelation des Druckluftverbrauchs mit vier verschiedenen eingestellten Prozessdrücken an jedem Verbraucher (Spulengatter, Legekopf, Aktivierungseinheit, Legerolle)
Gesamtenergiebedarf	Platte mit zwei verschiedene Legegeschwindigkeiten; doppelgekrümmtes Bauteil mit einer Legegeschwindigkeit

Roboter System

Leerlaufleistung:	KR150 KR180 KR210 KR240		
Bewegungsdistanz:	Max. Bewegungsdistanz aller 6 Achsmotoren (PTP und linear)		
Robotertyp	KR210	KR180	
Bewegungsart	PTP	PTP	linear
Gewicht Endeffektor 0 kg	Eingestellte Geschwindigkeit: 0 0,1 0,2 1,0 2,0 m/s	Eingestellte Geschwindigkeit: 0 0,2 1,0 1,5 2,0 m/s	Eingestellte Geschwindigkeit: 0 0,2 1,0 1,5 2,0 m/s
Gewicht Endeffektor 80 kg	Eingestellte Geschwindigkeit: 0 0,2 1,0 2,0 m/s	---	---
Gewicht Endeffektor 140 kg	Eingestellte Geschwindigkeit: 0 0,2 1,0 2,0 m/s	---	---

IR-Strahler

Tab. A-6: IR-Strahler – Anlagendaten

Anlagenkonfiguration:	Mittelwellenstrahler (Metallfolie)
IR-Strahler-Fläche:	~0,5 m x 0,5 m
Heizleistung:	~ 40 kW/m ²

Tab. A-7: IR-Strahler – Versuchsmatrix

Untersuchung aller 60 Kombinationen aus:	
IR-Strahler-Temperatur:	100 °C 125 °C 150 °C 175 °C 200 °C
Lagenanzahl:	4 6 8 10 (Faserflächengewicht 266 g/m ²)
Abstand zwischen IR-Strahler und Preform:	100 mm 150 mm 200 mm

Hydraulische Pressen

Tab. A-8: Hydraulische Pressen – Anlagendaten

Nr.	Nennschließkraft [kN]	Nutzfläche [m ²]	Hubgeschwindigkeit [mm/s]	Quelle
1	650	Keine Angabe	Keine Angabe	[59]
2	1.730	Keine Angabe	Keine Angabe	[58]
3	3.500	Keine Angabe	Keine Angabe	[59]

Nr.	Nennschließkraft [kN]	Nutzfläche [m ²]	Hubgeschwindigkeit [mm/s]	Quelle
4	6.000	6	100	Eigene Datenerhebung
5	6.300	1,8	800	Eigene Datenerhebung
6	10.000	Keine Angabe	Keine Angabe	[120,121]
7	36.000	6,1	1.200	Eigene Datenerhebung
8	38.000	Keine Angabe	Keine Angabe	[59]

Tab. A-9: Hydraulische Pressen – Versuchsmatrix

Variation der Pressenkraft und Hubgeschwindigkeit beim Öffnen, Schließen und Halten)					
Presse 1		Presse 4		Presse 7	
Pressenkraft	Hubgeschwindigkeit	Pressenkraft	Hubgeschwindigkeit	Pressenkraft	Hubgeschwindigkeit
0 kN	100 mm/s	500 kN	600 mm/s	500 kN	800 mm/s
300 kN	100 mm/s	1.000 kN	600 mm/s	1.000 kN	400 mm/s
1.000 kN	100 mm/s	2.000 kN	600 mm/s	1.000 kN	600 mm/s
2.000 kN	100 mm/s	3.000 kN	400 mm/s	1.000 kN	800 mm/s
3.000 kN	100 mm/s	3.000 kN	600 mm/s	1.000 kN	1.200 mm/s
		3.000 kN	800 mm/s	2.000 kN	800 mm/s
				3.000 kN	800 mm/s

Eigenbeheizte Werkzeuge

Tab. A-10: Eigenbeheizte Werkzeuge – Werkzeug- und Anlagendaten

Werkzeug	
Werkzeugmaterial:	Stahl
Wärmeübertragungsmedium:	Wasser
Sonstiges:	Isolation zwischen Presse und Werkzeug
Temperier Gerät	
Heizleistung	8 kW bis 30 kW für eine Werkzeughälfte
Kühlleistung	~ 55 kW
Kühlwasserbedarf	~ 15 l/min

Tab. A-11: Eigenbeheizte Werkzeuge – Versuchsmatrix

	Werkzeug 1	Werkzeug 2	Werkzeug 3	Werkzeug 4	Werkzeug 5
Bauteilgröße	0,16 m ²	0,6 m ²	1,0 m ²	0,24 m ²	0,39 m ²
Werkzeugmasse	1.145 kg	6.000 kg	4.333 kg	1.548 kg	3.014 kg
Heizphase					
	RT --> 80 °C	RT --> 80 °C	---	RT --> 67 °C	---
	RT --> 100 °C	RT --> 100 °C	---	RT --> 108 °C	---
	RT --> 120 °C	RT --> 120 °C	---		---

	Werkzeug 1	Werkzeug 2	Werkzeug 3	Werkzeug 4	Werkzeug 5
Haltephase	Min. 15 min @ 80 °C	Min. 15 min @ 80 °C	Min. 15 min @ 80 °C	Min. 50 min @ 67 °C	Min. 40 min @ 80 °C
	Min. 15 min @ 100 °C	Min. 15 min @ 100 °C	Min. 15 min @ 100 °C	Min. 50 min @ 108 °C	Min. 40 min @ 100 °C
	Min. 15 min @ 120 °C	Min. 15 min @ 120 °C	Min. 15 min @ 120 °C	Min. 50 min @ 147 °C	Min. 40 min @ 120 °C

Heißpresse

Tab. A-12: Heißpresse - Anlagendaten

	Presse 1	Presse 2
Nennschließkraft	3.200 kN	1.400 kN
Nutzfläche	~ 1 m ²	~ 0,5 m ²
Hubgeschwindigkeit	Bis zu 100 mm/s	Bis zu 110 mm/s
Max. Temperatur	400 °C	360 °C
Heizungsart	Elektrisch beheizt	Öl als Wärmeübertragungsmedium

Tab. A-13: Heißpresse - Versuchsmatrix

Variation der Pressenkraft und Hubgeschwindigkeit beim Öffnen, Schließen und in der Haltephase				
	Presse 1		Presse 2	
	Pressenkraft	Hubgeschwindigkeit	Pressenkraft	Hubgeschwindigkeit
	0 kN	5 mm/s	0 kN	110 mm/s
	0 kN	25 mm/s	50 kN	110 mm/s
	0 kN	50 mm/s	500 kN	110 mm/s
	0 kN	75 mm/s	1.000 kN	110 mm/s
	0 kN	100 mm/s	1.370 kN	110 mm/s
	500 kN	100 mm/s		
	1.000 kN	100 mm/s		
	2.000 kN	100 mm/s		
	3.200 kN	100 mm/s		
Variation der Temperatur				
	Presse 1		Presse 2	
Heizphase	RT --> 80 °C		RT --> 80 °C	
	RT --> 120 °C		RT --> 120 °C	
	RT --> 200 °C		RT --> 200 °C	
	RT --> 280 °C		RT --> 280 °C	
			RT --> 360 °C	
Haltephase	Min. 20 min @ 80 °C		Min. 20 min @ 80 °C	
	Min. 20 min @ 120 °C		Min. 20 min @ 120 °C	
	Min. 20 min @ 200 °C		Min. 20 min @ 200 °C	

Variation der Pressenkraft und Hubgeschwindigkeit beim Öffnen, Schließen und in der Haltephase	
Min. 20 min @ 280 °C	Min. 20 min @ 280 °C
	Min. 20 min @ 360 °C

Thermoplastisches Legen

Tab. A-14: Thermoplastisches Legen - Anlagendaten

Anlagenkonfiguration:	Gantry System
Legefläche:	2 m x 2 m
Tapebreite:	50 mm bis 150 mm
Schweißsystem:	Via Ultraschall
Erstlagenfixierung:	Via Gebläse
Anzahl der Gebläse:	4 à 1 m ²

Tab. A-15: Thermoplastisches Legen – Versuchsmatrix

Datenerhebung	
Gesamtenergiebedarf	Ein Schaltschrank; Einzelvermessungen wurden realisiert indem der entsprechende Verbrauch hinzugeschaltet worden ist.
Druckluftbedarf	Messung während dem Anlagenbetrieb, d.h. beim Legen
Einzelvermessung	
Tischrotation	Drei verschieden Rotationsgeschwindigkeiten für eine 360° Umdrehung
Lineare Tischbewegung	Drei verschiedene Tape Positionen
Ultraschall Verschweißung	Unterschiedliche Anzahl an parallel verschweißten Punkten
Gebläse	Variabler Tischbedeckungsgrad (0% 25% 50% 75% 100%) für eine unterschiedliche Anzahl an aktivierten Gebläse Zonen (1 bis 4)
Fertigung von faserverstärkten Thermoplastplatten	
Lagenanzahl und Orientierung	8; [0° 90° +45° -45°] _{sym}
	Versuch 1 Versuch 2 Versuch 3 Versuch 4 Versuch 5 Versuch 6 Versuch 7
Bauteilbreite	1,75 m 1,75 m 0,875 m 0,875 m 0,5 m 1,75 m 1,75 m
Bauteillänge	1,75 m 1,75 m 0,875 m 0,875 m 0,5 m 0,875 m 0,875 m
Tapebreite	150 mm 50 mm 150 mm 50 mm 75 mm 150 mm 50 mm

c Produktionsparameter

Tab. A-16: Variierbare Parameter im Ökobilanz-Modell

Hauptplan	von	bis	Einheit	Beschreibung
Auswahl Binder (Binder)	1	5	-	[1] EP; [2] PU; [3] UP; [4] PP; [5] PA6
Verschnitt bei der Endbearbeitung (cuttings_f)	0	1	-	
Matrixreste (cuttings_m)	0	1	-	
Auswahl Fasertyp Subpreform 1 (Fiber_SP1)	1	5	-	[1] GF; [2] CF; [3] rF aus Abfall (Glas- und/oder Carbon; [4] rCF aus Pyrolyse; [5] Gemischte Glas- und Carbonfaser
Auswahl Fasertyp Subpreform 2 (Fiber_SP2)				
Auswahl Fasertyp Subpreform 3 (Fiber_SP3)				
Auswahl Fasertyp Subpreform 4 (Fiber_SP4)				
Auswahl Fasertyp Subpreform 5 (Fiber_SP5)				
Auswahl Fasertyp kontinuierliche Verfahren (Fiber_ConTech)				
Auswahl Fasertyp Spritzguss (Fiber_IM)				
Werkzeugmasse (m)	0	40000	kg	
Auswahl Matrixdatensatz (Matrix)	1	5	-	[1] EP; [2] PU; [3] UP; [4] PP; [5] PA6
Carbonfaseranteil (mCF)	0	1	-	Massenanteil der Carbonfaser an der Gesamtfaser; Relevant für rF und gemischte Glas- und Carbonfaser
Fertigungsprozesskette (MPC)	1	2	-	[1] = zwei-stufig --> Preforming + Formen + Aushärten; [2] = ein-stufig --> kontinuierliche Verfahren --> Wickeln & Pultrusion
Rüstzeit (mt)	0	8	h	Dauer für die Werkzeuigrüstung (pro Woche einmal); relevant für Pultrusion; RTM WCM; Thermoformen; Umformen und Aushärten duroplastischer Organobleche
Binderanteil (Pb)	0	0,1	-	Binderanteil bezogen auf die Fasermasse
Energieart bei der Bauteilproduktion (Pet)	0	3	-	Energieart bei der Bauteilproduktion; [0] = Strom Mix; [1] = Wasserkraft; [2] = Biomasse; [3] = Photovoltaik
Nähgarnanteil (Pst)	0	0,1	-	Nähgarnanteil bezogen auf die Fasermasse
Auswahl Ausschnitt (.r)	0	1	-	[0] = kein Ausschnitt/ Loch; [1] = Ausschnitt/ Loch; relevant bei Fertigungsverfahren, wo der Ausschnitt direkt bei der Fertigung mitberücksichtigt werden kann
Matrixdichte (rhoM)	0,9	1,5	g/cm ³	
Ausschnittlänge (rl)	0	2	m	Nur relevant, wenn ein Ausschnitt vorhanden ist
Ausschnittbreite (rw)	0	2	m	Nur relevant, wenn ein Ausschnitt vorhanden ist
Durchschnittliche Harzaustragsmenge (ior)	0	4	kg/min	
Schichtanzahl (shift)	1	3	-	
Werkzeugtemperatur (Temp)	40	210	°C	Relevant für Pultrusion; RTM WCM; Thermoformen; Umformen und Aushärten duroplastischer Organobleche
Dauer Anlagenbestückung und Bauteilnahme (tp)	0	30	s	

Hauptplan	von	bis	Einheit	Beschreibung
Anlagenauslastung (ur)	0	10	- [kg/m ³]	Flächige Auslastung der Presse [-] von 0 bis 1; Massen zu Nutzvolumen bezogene Auslastung des Umluftofens [kg/m ³] (nur relevant beim Wickeln) von 0 bis 10
Betriebsstunden pro Schicht (wh)	0	8	h	
Auswahl Anzahl Subpreforms (Material mixer of five components)				
Massenanteil der 2. Subpreform am Gesamtbauenteil (m2)	0	1	-	Massenanteil der 1. Subpreform wird automatisch berechnet; sobald Massenanteile (≠ 0) für die jeweilige Subpreform angegeben ist, muss für diese die Plan- und Prozessparameter angegeben werden. Dies beinhaltet auch die dazugehörige Faserauswahl.
Massenanteil der 3. Subpreform am Gesamtbauenteil (m3)	0	1	-	
Massenanteil der 4. Subpreform am Gesamtbauenteil (m4)	0	1	-	
Massenanteil der 5. Subpreform am Gesamtbauenteil (m5)	0	1	-	
Faserauswahl Ebene -2 : Glasfaser Produktion				
Produktionsstandort (Gb)	1	2	-	[1] = Deutschland; [2] = Europa
Faserauswahl Ebene -2 : Carbonfaser Produktion				
Materialausbeute (CFy)	0,45	0,55	-	Umwandlung PAN- in Carbonfaser
Energiezusammensetzung (CFec)	0	2	-	[0] = Strom Mix; [1] = Elektrisch dominierend; [2] = Thermisch dominierend
Produktionsstandort (CFb)	0	3	-	[0] = Global; [1] = EU; [2] = USA; [3] = Japan
Energieart (CFet)	0	3	-	[0] = Strom Mix; [1] = Wasserkraft; [2] = Windkraft
Transport ja/nein (CFt)	0	1	-	[0] = ja; [1] = nein
Datensatz (Fiber)	1	3	-	[1] = CF (Faserdatensatz 1); [2] = CF (Faserdatensatz 2); [3] CF (Industrie)
Faserauswahl Ebene -2 : rCF aus Pyrolyse				
Pyrolyseofenauslastung (Auslastung)	0,1	4	kg	bezogen auf ein Nutzraumvolumen von 440 x 700 x 540 mm ³ bzw. 166 Liter
Energierückgewinnung bei der Nachverbrennung (EE_rueck)	0	1	-	[0] = keine Rückgewinnung; [1] = freigesetzte Energie bei der Nachverbrennung wird zurückgewonnen
Faservolumengehalt des Abfalls (FVG)	0,0001	1	-	
Preforming Ebene -1				
Preforming Ebene -1	von	bis	Einheit	Beschreibung
Flächengewicht (aw)	80	600	g/m ²	
Verschnitt beim 2D-Zuschnitt (cuttings_2D)	0	1	-	bezogen auf die Subpreform
Verschnitt beim 3D-Zuschnitt (cuttings_3D)	0	1	-	bezogen auf die Subpreform (entfällt bei der thermoplastischen Bauweise)
Spulenreste (cuttings_ft)	0	1	-	bezogen auf die Subpreform
Faservolumengehalt (FVC)	0	0,7	-	bezogen auf die Subpreform
Bauteillänge (l)	0	2	m	bezogen auf die Subpreform
Legegeschwindigkeit (lr)	0,5	1000	kg/h U/min m/min	AFP DFP: Legerate, [kg/h], 0 bis 250kg/h; TFP: Rotationsgeschwindigkeit, [U/min], 300 bis 1000 U/min

Preforming Ebene -1	von	bis	Einheit	Beschreibung
Auswahl Preformingverfahren (Preform)	1	12	-	[1] = Gewebe; [2] = NCF; [3] = Vlies; [4] = TFP; [5] = DFP; [6] = Flechten; [7] = TS-AFP; [8] = TP-AFP; [9] = TP-ATL; [10] = Organoblech aus Vliesen; [11] = Organoblech aus Geweben; [12] = kurzfaserverstärktes Organoblech;
Faserdichte (rhoF)	1,7	2,5	g/cm ³	gemittelte Faserdichte
Bauteildicke (t)	0	4	mm	bezogen auf die Subpreform
Bauteilbreite (w)	0	2	m	Bauteilbreite oder Flechtkerndurchmesser bezogen auf die Subpreform
Preforming Ebene -2: 3D-Preforming				
Legewinkel (a)	0	90	grad	Relevant für AFP DFP ATL Flechten
Anzahl Roboter, Stickköpfe (n)	1	4	-	Flechten Anzahl Roboter; Sticken Anzahl Stickköpfe
Titer (Titer)	0	0,01	kg/m	3k = 0,0002; 6k = 0,0004; 12k = 0,0008; 24k = 0,0016; 50k = 0,0033
Preforming Prozessebene 3D-Preforming: Flechten				
mit/ ohne Stehfäden (braid)	0	1	-	[0] = ohne Stehfäden ; [1] = mit Stehfäden
Preforming Prozessebene 3D-Preforming: DFP				
Ausführung Spulengatter (creel)	0	2	-	[0] nicht bedruckt / nicht klimatisiert; [1] bedruckt / nicht klimatisiert; [2] bedruckt / klimatisiert
Ausführung Fixierungseinheit (heat)	0	2	-	[0] Klebstofffixierung; [1] Fixierung dr. Binder und IR; [2] Fixierung dr. Binder und Laser
Legebreite des Legekopfs (lw)	50	300	mm	
Rollenbreite von Mutterspule (rw)	0	600	mm	nur relevant, wenn Tow geslittet wird
Auswahl Bindergartyp (slit)	0	1	-	[0] gespreizt; [1] geslittet
Preforming Prozessebene 3D-Preforming: Hydraulische Presse				
Pressendruck (pp)	0	10	bar	
Pressenzeit (pt)	15	60	s	
Preforming Prozessebene 3D-Preforming: IR-Heizung				
Prozesszeit (ht)	15	60	s	
Zieltemperatur (rT)	100	300	°C	entspricht der Strahler-Temperatur
Preforming Prozessebene 3D-Preforming: Vliese				
Herstellungsverfahren (textile)	1	2	-	[1] = Nasslegeverfahren; [2] = trockenlegeverfahren

Preforming Planebene -2: Organosheet				
Auswahl Pressentyp (hp)	0	1	-	[0] = electric; [1] = oil heated press
Auswahl einstufige oder zweistufige Verarbeitung (stage)	1	2	-	[1] = ein-stufig; [2] = zwei-stufig; relevant für ATL AFP Vlies - Organobleche; ATL-Platten, AFP-Platten und Vliese werden im zwei-stufigen Prozess in einer Intervall-Heizpresse konsolidiert, mittels IR auf Schmelztemperatur erneut erwärmt und in einem isothermen Pressenwerkzeug abgekühlt; in einem ein-stufigen Prozess entfällt die Konsolidierung in der Intervall-Heizpresse bei ATL- & AFP-Platten; bei Vlies-Organoblechen erfolgt in einem ein-stufigen Prozess das Konsolidieren und Umformen in einer variothermen Presse
Preforming Prozessebene Organosheet: Vliese				
Herstellungsverfahren (textile)	1	2	-	[1] = Nasslegeverfahren; [2] = trocken- Legeverfahren
Preforming Prozessebene Organosheet: Slitter				
Rollenbreite von Mutterspule (rw)	0	600	mm	
Preforming Prozessebene Organosheet: TP-AFP				
Ausführung Spulengatter (creel)	0	2	-	[0] nicht bedruckt / nicht klimatisiert; [1] bedruckt / nicht klimatisiert; [2] bedruckt / klimatisiert
Ausführung Fixierungseinheit (heat)	0	2	-	[0] Klebstofffixierung; [1] Fixierung dr. Binder und IR; [2] Fixierung dr. Binder und Laser
Legebreite des Legekopfs (lw)	25	300	mm	
Preforming Prozessebene Organosheet: TP-ATL				
Tapebreite (tw)	6,35	150	mm	
Umformen, Injektion und Aushärten Planebene -1				
Aushärtezeit (ct)	0	240	min	entspricht nur der Umform- bzw. Aushärtezeit (ohne Pressen öffnen / schließen)
Auswahl Umform- und Aushärteprozess (Curing)	1	3	-	[1] RTM WCM; [2] Thermoplastisches Formen; [3] Duroplastisches Formen und Aushärten
Faservolumengehalt (FVC)	0	0,7	-	Misch-Faservolumengehalt
Harzaustragsmenge (ior)	0	4	kg/min	
Harztemperatur vor Injektion (itm)	25	120	°C	Härtertemperatur ist standardmäßig auf 35°C eingestellt
Bauteillänge (l)	0	2	m	Bauteillänge des finalen Bauteils
Pressendruck (pp)	0	120	bar	
Faserdichte (rhoF)	1,7	2,5	g/cm ³	Mischfaserdichte
Bauteildicke (t)	0	4	mm	Bauteildicke des finalen Bauteils
Saugvermögen der Vakuumpumpe (vs)	5	260	m ³ /h	
Bauteilbreite (w)	0	2	m	Bauteilbreite des finalen Bauteils, bei Profilen Flechtkerndurchmesser

Umformen Injektion Aushärten Plan- ebene -2: TP Formen	von	bis	Ein- heit	Beschreibung
Auswahl Prozessführung (Forming)	1	2	-	[1] isothermer Prozess; [2] variothermer Prozess; sofern für TP-Vliese eine einstufige Verarbeitung (stage) im Plan Organosheet ausgewählt worden ist, muss hier eine variotherme Prozessführung gewählt werden
Faservolumengehalt der Spritzgussmasse [FVC_IM]	0	0,7	-	nur relevant wenn das Bauteil hinterspritzt wird, derzeit nur bei einer isothermen Prozessführung möglich
Massenanteil der Spritzgussmasse am Gesamtbauteil (IM)	0	1	-	nur relevant wenn das Bauteil hinterspritzt wird, derzeit nur bei einer isothermen Prozessführung möglich
Faserdichte der Spritzgussfaser (rho_IM)	1,7	2,5	g/cm ³	nur relevant wenn das Bauteil hinterspritzt wird, derzeit nur bei einer isothermen Prozessführung möglich
U I A Prozessebene TP-Formen: Heizpresse (variotherm)				
Auswahl Pressentyp (hp)	0	1	-	[0] = elektrisch beheizt; [1] = öl beheizt
Kontinuierliche Verfahren Planebene -1				
Auswahl Technologie (ConTech)	1	3	-	[1] Pultrusion mit Tränkungsbad; [2] Pultrusion mit Injektion; [3] Wickeln
Spulenreste (cuttings_ft)	0	1	-	bezogen auf die Subpreform
Dissolver Geschwindigkeit (ds)	0	2000	U/min	
Mischungsdauer im Dissolver (dt)	0	4	min/kg	
Faservolumengehalt (FVC)	0	0,7	-	
Bauteil- Profillänge (l)	0	2	m	bezogen auf die Subpreform
Legegeschwindigkeit (lr)	0	2	m/min	
Faserdichte (rhoF)	1,7	2,5	g/cm ³	
Bauteildicke (t)	0	4	mm	(w*t) = Profilquerschnittsfläche bei der Pultrusion
Saugvermögen der Vakuumpumpe (vs)	5	260	m ³ /h	
Bauteilbreite (w)	0	2	m	(w*t) = Profilquerschnittsfläche bei der Pultrusion
Kontinuierliche Verfahren Prozessebene: Umluftofen				
Luftzirkulation (air)	0	1	-	[0] = Umluft = 100% = Zirkulation; [1] = Frischluft = 100% Luftaustausch
Aushärtedauer Stufe1 (ct1)	0	240	min	
Aushärtedauer Stufe 2 (ct2)	0	240	min	
Zyklusverlauf (cycle)	0	2	-	[0] = isotherm; [1] = variotherm 1-stufig; [2] = variotherm 2-stufig
Heizrate Stufe 1 (hr1)	0	4	K/min	
Heizrate Stufe 2 (hr2)	0	4	K/min	
Aushärtetemperatur Stufe 1 (T1)	40	250	°C	
Aushärtetemperatur Stufe 2 (T2)	40	250	°C	
Nutzraum Ofen (us)	1,5	24	m ³	
Mechanische Nachbearbeitung Planebene -1				
Auswahl Technologie (Machining)	0	2	-	[0] nur Stoffflüsse werden berücksichtigt; [1] Fräsen; [2] Wasserstrahlschneiden
Anteil recyclebarer Abfälle (rc)	0	1	-	massenbezogen auf den Gesamtabfall

Tab. A-17: Produktionsparameter für die SotA duroplastische Fertigungsprozesskette

Allgemeine Parameter			
Faserdichte	1,78 g/cm ³	Arbeitsstunden pro Schicht	8 h
Harzsystem	Epoxidharz	Rüstdauer Werkzeug	4 h
Harzdichte	1,17 g/cm ³	Entformungsdauer	10 s
Faservolumengehalt	50%		
Preforming			
Textilherstellung		Umformung (nur beim RTM)	
Flächengewicht	250 g/m ²	IR-Strahler-Temperatur	200 °C
Bindersystem	Epoxid	Heiz- und Umformdauer	30 s
Nähfaden- und Binderanteil	1,6% 5%	Prozessdruck	5 bar
RTM WCM			
Eigenbeheiztes Werkzeug		Hochdruckinjektionsanlage	
Werkzeugmasse zu Bauteilfläche	7153 kg/m ²	Harztemperatur vor Injektion	60 °C
Werkzeugtemperatur	120 °C	Harzaustragsmenge	2 kg/min
Prozessdruck	80 bar		
Nachbearbeitung			
Verfahren	Fräsen	Anteil recycelbarer Verschnitte	0,75

Tab. A-18: Produktionsparameter für die verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette

Allgemeine Parameter			
Faserdichte	1,78 g/cm ³	Arbeitsstunden pro Schicht	8 h
Harzsystem	Epoxidharz	Rüstdauer Werkzeug	4 h
Harzdichte	1,17 g/cm ³	Entformungsdauer	10 s
Faservolumengehalt	50%		
Preforming			
Dry-Fiber-Placement			
Flächengewicht	200 g/m ²	Rollenbreite Mutterspule	300 mm
Bindersystem	Epoxidharz	Spulengatter	Nicht klimatisiert und bedruckt
Binderanteil	5%	Umformung (nur beim RTM)	
Legerate	25 kg/h	IR-Strahler-Temperatur	200 °C
Legewinkel (Mittelwert)	30°	Heiz- und Umformdauer	30 s
Legekopfbreite	200 mm	Prozessdruck	5 bar
RTM WCM			
Eigenbeheiztes Werkzeug		Hochdruckinjektionsanlage	
Werkzeugmasse zu Bauteilfläche	7153 kg/m ²	Harztemperatur vor Injektion	60 °C
Werkzeugtemperatur	120 °C	Harzaustragsmenge	2 kg/min
Prozessdruck	80 bar		
Nachbearbeitung			
Verfahren	Fräsen	Anteil recycelbarer Verschnitte	0,75

Tab. A-19: Produktionsparameter für die SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette

Allgemeine Parameter			
Faserdichte	1,78 g/cm ³	Arbeitsstunden pro Schicht	8 h
Harzsystem	PA6	Rüstdauer Werkzeug	4 h
Harzdichte	1,14 g/cm ³	Entformungsdauer	10 s
Preforming			
Flächengewicht Gewebe	250 g/m ²	Faservolumengehalt	50%
Umformen			
Eigenbeheiztes Werkzeug		IR-Strahler	
Werkzeugmasse zu Bauteilfläche	7153 kg/m ²	IR-Strahler-Fläche	3 m ²
Werkzeugtemperatur	80 °C	IR-Strahler-Material	Metallgitter
Prozessdruck	8 bar	IR-Heizzeit	1,5 min
Umformprozesszeti	1,5 min		
Nachbearbeitung			
Verfahren	Fräsen	Anteil recycelbarer Verschnitte	0,75

Tab. A-20: Produktionsparameter für die verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette

Allgemeine Parameter			
Faserdichte	1,78 g/cm ³	Arbeitsstunden pro Schicht	8 h
Harzsystem	PA6	Rüstdauer Werkzeug	4 h
Harzdichte	1,14 g/cm ³	Entformungsdauer	10 s
Preforming			
Flächengewicht Tape	200 g/m ²	Faservolumengehalt	50%
Tapebreite	100 mm		
Umformen			
Eigenbeheiztes Werkzeug		IR-Strahler	
Werkzeugmasse zu Bauteilfläche	7153 kg/m ²	IR-Strahler-Fläche	3 m ²
Werkzeugtemperatur	80 °C	IR-Strahler-Material	Metallgitter
Prozessdruck	8 bar	IR-Heizzeit	1,5 min
Umformprozesszeti	1,5 min		
Nachbearbeitung			
Verfahren	Fräsen	Anteil recycelbarer Verschnitte	0,75

d Statistische Versuchspläne

Tab. A-21: Screening Carbonfaserherstellung linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV

No	Run Order	Incl/ Excl	Produktionsgebiet	Energieart	Energiequelle	Transport	Ausbeute	Datensatz
1	13	Incl	1-EU	1-electrical	0-energy mix	0-yes	0,45	1-literature -1
2	14	Incl	3-JP	1-electrical	0-energy mix	0-yes	0,55	1-literature -1
3	17	Incl	1-EU	2-thermal	0-energy mix	0-yes	0,55	2- literature -2
4	15	Incl	3-JP	2-thermal	0-energy mix	0-yes	0,45	2- literature -2
5	18	Incl	1-EU	1-electrical	1-hydro power	0-yes	0,55	2- literature -2
6	12	Incl	3-JP	1-electrical	1-hydro power	0-yes	0,45	2- literature -2
7	6	Incl	1-EU	2-thermal	1-hydro power	0-yes	0,45	1-literature -1
8	11	Incl	3-JP	2-thermal	1-hydro power	0-yes	0,55	1-literature -1
9	8	Incl	1-EU	1-electrical	0-energy mix	1-no	0,45	2- literature -2
10	10	Incl	3-JP	1-electrical	0-energy mix	1-no	0,55	2- literature -2
11	1	Incl	1-EU	2-thermal	0-energy mix	1-no	0,55	1-literature -1
12	16	Incl	3-JP	2-thermal	0-energy mix	1-no	0,45	1-literature -1
13	3	Incl	1-EU	1-electrical	1-hydro power	1-no	0,55	1-literature -1
14	9	Incl	3-JP	1-electrical	1-hydro power	1-no	0,45	1-literature -1
15	7	Incl	1-EU	2-thermal	1-hydro power	1-no	0,45	2- literature -2
16	5	Incl	3-JP	2-thermal	1-hydro power	1-no	0,55	2- literature -2
17	2	Incl	1-EU	1-electrical	0-energy mix	0-yes	0,5	1-literature -1
18	19	Incl	1-EU	1-electrical	0-energy mix	0-yes	0,5	1-literature -1
19	4	Incl	1-EU	1-electrical	0-energy mix	0-yes	0,5	1-literature -1

Tab. A-22: Screening Carbonfaserherstellung Modellgüte – linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV

Wirkungskategorie	Transformation	R ²	R ² adj	Q ²	Condition number	Model terms	DF lack of fit
ADPe	Power ((Y)**2)	0,919189	0,879	0,764985	1,45774	7	10
ADPf	Power ((Y)**0,723)	0,901466	0,852	0,734495	1,45774	7	10
EP	None	0,866574	0,8	0,616433	1,45774	7	10
ODP	NegLog (-10Log(10-Y))	0,986294	0,979	0,961643	1,45774	7	10
POCP	Log (10Log(10*Y))	0,917009	0,876	0,773993	1,45774	7	10
GWP	None	0,990721	0,986	0,973413	1,45774	7	10
AP	Power ((Y)**1,75)	0,872583	0,809	0,630581	2,13039	22	5

Tab. A-23: Optimierung Carbonfaserherstellung – quadratischer D-optimaler Versuchsplan

Nr.	Run Order	Incl/ Excl	Produktionsgebiet	Energieart	Energiequelle	Ausbeute	Datensatz
1	14	Incl	0- global production mix	0- standard	0- energy mix	0,55	1- literature-1
2	27	Incl	1- EU	0- standard	0- energy mix	0,55	1- literature-1
3	49	Incl	3- JP	0- standard	0- energy mix	0,45	1- literature-1
4	37	Incl	0- global production mix	1- electrical	0- energy mix	0,5	1- literature-1
5	36	Incl	1- EU	1- electrical	0- energy mix	0,45	1- literature-1
6	5	Incl	2- USA	1- electrical	0- energy mix	0,55	1- literature-1
7	23	Incl	0- global production mix	2- thermal	0- energy mix	0,45	1- literature-1
8	38	Incl	2- USA	2- thermal	0- energy mix	0,45	1- literature-1
9	44	Incl	3- JP	2- thermal	0- energy mix	0,55	1- literature-1
10	16	Incl	2- USA	0- standard	1- hydro power	0,45	1- literature-1
11	34	Incl	3- JP	0- standard	1- hydro power	0,55	1- literature-1
12	4	Incl	0- global production mix	1- electrical	1- hydro power	0,55	1- literature-1
13	19	Incl	1- EU	1- electrical	1- hydro power	0,5	1- literature-1
14	47	Incl	3- JP	1- electrical	1- hydro power	0,45	1- literature-1
15	31	Incl	0- global production mix	2- thermal	1- hydro power	0,5	1- literature-1
16	29	Incl	1- EU	2- thermal	1- hydro power	0,45	1- literature-1
17	48	Incl	2- USA	2- thermal	1- hydro power	0,55	1- literature-1
18	15	Incl	0- global production mix	0- standard	2- wind energy	0,45	1- literature-1
19	13	Incl	1- EU	0- standard	2- wind energy	0,45	1- literature-1
20	46	Incl	2- USA	0- standard	2- wind energy	0,55	1- literature-1
21	28	Incl	1- EU	1- electrical	2- wind energy	0,55	1- literature-1
22	3	Incl	2- USA	1- electrical	2- wind energy	0,45	1- literature-1
23	25	Incl	3- JP	1- electrical	2- wind energy	0,55	1- literature-1
24	1	Incl	0- global production mix	2- thermal	2- wind energy	0,55	1- literature-1
25	40	Incl	1- EU	2- thermal	2- wind energy	0,5	1- literature-1
26	10	Incl	3- JP	2- thermal	2- wind energy	0,45	1- literature-1
27	39	Incl	0- global production mix	0- standard	0- energy mix	0,45	2- literature-2
28	52	Incl	2- USA	0- standard	0- energy mix	0,55	2- literature-2
29	24	Incl	3- JP	0- standard	0- energy mix	0,55	2- literature-2
30	17	Incl	1- EU	1- electrical	0- energy mix	0,55	2- literature-2

Nr.	Run Order	Incl/ Excl	Produktionsgebiet	Energieart	Energiequelle	Ausbeute	Datensatz
31	43	Incl	2- USA	1- electrical	0- energy mix	0,45	2- literature-2
32	18	Incl	3- JP	1- electrical	0- energy mix	0,45	2- literature-2
33	41	Incl	0- global production mix	2- thermal	0- energy mix	0,55	2- literature-2
34	50	Incl	1- EU	2- thermal	0- energy mix	0,45	2- literature-2
35	51	Incl	0- global production mix	0- standard	1- hydro power	0,55	2- literature-2
36	6	Incl	1- EU	0- standard	1- hydro power	0,45	2- literature-2
37	30	Incl	0- global production mix	1- electrical	1- hydro power	0,45	2- literature-2
38	7	Incl	2- USA	1- electrical	1- hydro power	0,55	2- literature-2
39	8	Incl	3- JP	1- electrical	1- hydro power	0,55	2- literature-2
40	11	Incl	1- EU	2- thermal	1- hydro power	0,55	2- literature-2
41	33	Incl	2- USA	2- thermal	1- hydro power	0,45	2- literature-2
42	26	Incl	3- JP	2- thermal	1- hydro power	0,45	2- literature-2
43	2	Incl	1- EU	0- standard	2- wind energy	0,55	2- literature-2
44	32	Incl	2- USA	0- standard	2- wind energy	0,45	2- literature-2
45	35	Incl	3- JP	0- standard	2- wind energy	0,45	2- literature-2
46	53	Incl	0- global production mix	1- electrical	2- wind energy	0,55	2- literature-2
47	42	Incl	1- EU	1- electrical	2- wind energy	0,45	2- literature-2
48	12	Incl	0- global production mix	2- thermal	2- wind energy	0,45	2- literature-2
49	22	Incl	2- USA	2- thermal	2- wind energy	0,55	2- literature-2
50	9	Incl	3- JP	2- thermal	2- wind energy	0,55	2- literature-2
51	20	Incl	3- JP	2- thermal	2- wind energy	0,5	2- literature-2
52	21	Incl	3- JP	2- thermal	2- wind energy	0,5	2- literature-2
53	45	Incl	3- JP	2- thermal	2- wind energy	0,5	2- literature-2

Tab. A-24: Optimierung Carbonfaserherstellung Modellgüte quadratischer D-optimaler Versuchsplan

	Transformation	R ²	R ² adj.	Q ²	Condition number	Model terms	DF lack of fit
PED	None	1	1	0,999	7,4036	26	25
ADPe	Power ((Y)**-0,1947)	0,998	0,995	0,984	4,94283	32	19
ADPf	None	0,998	0,997	0,991	4,48926	25	26
EP	Exp (Exp(Y))	1	1	1	6,36743	16	35
ODP	Log (10Log(Y))	1	0,999	0,996	4,71711	31	20
POCP	None	1	1	1	7,31261	22	29

	Transformation	R ²	R ² adj.	Q ²	Condition number	Model terms	DF lack of fit
GWP	Power ((Y)**-0,379)	0,999	0,998	0,994	4,77144	30	21
AP	None	1	1	1	7,68046	31	20

Tab. A-25: Screening SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV

No	Run Order	Incl/Excl	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste	Bauteilfläche	Energiequelle	Bauteildicke	Pressenauslastung	CF-Herstellung	Textiler Verschnitt (2D)	Preform Verschnitt (3D)	Aushärzeit	RTM WCM	Vakuumpumpe Typ
1	2	Incl	0	0	0,5	0-Mix	1	0,5	min	0	0	3	WCM	10
2	25	Incl	0,1	0	0,5	0-Mix	1	1	min	0	0,2	10	WCM	250
3	5	Incl	0	0,1	0,5	0-Mix	1	1	max	0	0	3	RTM	250
4	14	Incl	0,1	0,1	0,5	0-Mix	1	0,5	max	0	0,2	10	RTM	10
5	26	Incl	0	0	1,5	0-Mix	1	1	max	0,2	0,2	3	WCM	10
6	6	Incl	0,1	0	1,5	0-Mix	1	0,5	max	0,2	0	10	WCM	250
7	22	Incl	0	0,1	1,5	0-Mix	1	0,5	min	0,2	0,2	3	RTM	250
8	27	Incl	0,1	0,1	1,5	0-Mix	1	1	min	0,2	0	10	RTM	10
9	23	Incl	0	0	0,5	1-Wasserkraft	1	0,5	max	0,2	0,2	10	RTM	250
10	11	Incl	0,1	0	0,5	1-Wasserkraft	1	1	max	0,2	0	3	RTM	10
11	9	Incl	0	0,1	0,5	1-Wasserkraft	1	1	min	0,2	0,2	10	WCM	10
12	12	Incl	0,1	0,1	0,5	1-Wasserkraft	1	0,5	min	0,2	0	3	WCM	250
13	7	Incl	0	0	1,5	1-Wasserkraft	1	1	min	0	0	10	RTM	250
14	17	Incl	0,1	0	1,5	1-Wasserkraft	1	0,5	min	0	0,2	3	RTM	10
15	21	Incl	0	0,1	1,5	1-Wasserkraft	1	0,5	max	0	0	10	WCM	10
16	15	Incl	0,1	0,1	1,5	1-Wasserkraft	1	1	max	0	0,2	3	WCM	250
17	33	Incl	0	0	0,5	0-Mix	3	0,5	min	0,2	0	10	RTM	10
18	16	Incl	0,1	0	0,5	0-Mix	3	1	min	0,2	0,2	3	RTM	250
19	8	Incl	0	0,1	0,5	0-Mix	3	1	max	0,2	0	10	WCM	250
20	32	Incl	0,1	0,1	0,5	0-Mix	3	0,5	max	0,2	0,2	3	WCM	10
21	10	Incl	0	0	1,5	0-Mix	3	1	max	0	0,2	10	RTM	10
22	31	Incl	0,1	0	1,5	0-Mix	3	0,5	max	0	0	3	RTM	250

No	Run Order	Incl/Excl	Verschmitt Nachbearbeitung	Matrixreste	Bauteilfläche	Energiequelle	Bauteildicke	Pressenauslastung	CF-Herstellung	Textiler Verschmitt (2D)	Preform Verschnitt (3D)	Aushärtezeit	RTM WCM	Vakuumpumpe Typ
23	18	Incl	0	0,1	1,5	0-Mix	3	0,5	min	0	0,2	10	WCM	250
24	24	Incl	0,1	0,1	1,5	0-Mix	3	1	min	0	0	3	WCM	10
25	1	Incl	0	0	0,5	1-Wasserkraft	3	0,5	max	0	0,2	3	WCM	250
26	30	Incl	0,1	0	0,5	1-Wasserkraft	3	1	max	0	0	10	WCM	10
27	4	Incl	0	0,1	0,5	1-Wasserkraft	3	1	min	0	0,2	3	RTM	10
28	29	Incl	0,1	0,1	0,5	1-Wasserkraft	3	0,5	min	0	0	10	RTM	250
29	20	Incl	0	0	1,5	1-Wasserkraft	3	1	min	0,2	0	3	WCM	250
30	34	Incl	0,1	0	1,5	1-Wasserkraft	3	0,5	min	0,2	0,2	10	WCM	10
31	13	Incl	0	0,1	1,5	1-Wasserkraft	3	0,5	max	0,2	0	3	RTM	10
32	28	Incl	0,1	0,1	1,5	1-Wasserkraft	3	1	max	0,2	0,2	10	RTM	250
33	35	Incl	0,05	0,05	1	0-Mix	2	0,75	min	0,1	0,1	6,5	WCM	130
34	3	Incl	0,05	0,05	1	0-Mix	2	0,75	min	0,1	0,1	6,5	WCM	130
35	19	Incl	0,05	0,05	1	0-Mix	2	0,75	min	0,1	0,1	6,5	WCM	130

Tab. A-26: Screening SotA Fertigungsprozesskette für duroplast basierte CFK – Modellgüte linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV

	Transformation	R ²	R ² adj.	Q ²	Condition number	Model terms	DF lack of fit
PED	Log (10Log(Y))	0,977	0,965	0,941	1,1726	13	20
ADPe	Power ((Y)**-1,04)	0,951	0,924	0,871	1,1726	13	20
ADPf	Log (10Log(Y))	0,985	0,977	0,961	1,1726	13	20
EP	Log (10Log(Y))	1	0,999	0,999	1,1726	13	20
ODP	Power ((Y)**0,113)	0,989	0,984	0,973	1,1726	13	20
POCP	None	0,975	0,962	0,932	1,1726	13	20
GWP	Log (10Log(Y))	0,972	0,956	0,927	1,1726	13	20
AP	Log (10Log(Y))	0,998	0,997	0,995	1,1726	13	20

Tab. A-27: Szenario-Analyse SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – quadratischer D-optimaler Versuchsplan

Exp No	Run Order	Incl/Excl	cuttings_f	cuttings_m	Bauteilfläche	Energiequelle	Bauteildicke	CF-Herstellung	cuttings_2D	cuttings_3D	Aushärtezeit
1	19	Incl	0,1	0,1	1	1-Wasserkraft	1	min	0	0	3
2	8	Incl	0	0	1,5	1-Wasserkraft	1	min	0	0	3
3	50	Incl	0	0,05	0,5	3-photovoltaics	2	min	0	0	3
4	3	Incl	0	0,1	0,5	2-bio mass	1	mittel	0	0	3
5	46	Incl	0,1	0	1,5	2-bio mass	1	mittel	0	0	3
6	25	Incl	0,05	0	1,5	11-Wasserkraft	2	mittel	0	0	3
7	5	Incl	0,1	0,1	1,5	0-mix	3	mittel	0	0	3
8	27	Incl	0	0,1	1,5	3-photovoltaics	1	max	0	0	3
9	42	Incl	0	0	1,5	0-mix	3	max	0	0	3
10	32	Incl	0,1	0	0,5	2-bio mass	3	max	0	0	3
11	10	Incl	0	0,1	1	1-Wasserkraft	3	max	0,1	0	3
12	86	Incl	0	0	0,5	0-mix	1	min	0,2	0	3
13	53	Incl	0	0,1	1,5	2-bio mass	2	min	0,2	0	3
14	66	Incl	0,1	0,1	0,5	2-bio mass	3	min	0,2	0	3
15	44	Incl	0,1	0	1,5	3-photovoltaics	3	min	0,2	0	3
16	58	Incl	0,05	0,1	1	3-photovoltaics	2	mittel	0,2	0	3
17	67	Incl	0	0	0,5	0-mix	3	mittel	0,2	0	3
18	64	Incl	0,1	0	0,5	3-photovoltaics	1	max	0,2	0	3
19	35	Incl	0,1	0,1	0,5	1-Wasserkraft	3	mittel	0	0,1	3
20	15	Incl	0,1	0,05	1,5	0-mix	3	min	0,1	0,1	3
21	63	Incl	0,1	0,1	1,5	2-bio mass	3	max	0,2	0,1	3
22	71	Incl	0,1	0	1,5	3-photovoltaics	1	min	0	0,2	3
23	39	Incl	0	0,1	0,5	0-mix	3	min	0	0,2	3
24	22	Incl	0	0	0,5	2-bio mass	3	min	0	0,2	3
25	17	Incl	0	0	0,5	3-photovoltaics	1	mittel	0	0,2	3
26	89	Incl	0	0,1	1,5	3-photovoltaics	3	mittel	0	0,2	3
27	26	Incl	0,1	0	0,5	0-mix	1	max	0	0,2	3
28	41	Incl	0	0	1,5	2-bio mass	1	max	0	0,2	3
29	81	Incl	0	0,1	1,5	1-Wasserkraft	2	max	0	0,2	3
30	30	Incl	0,1	0,1	0,5	3-photovoltaics	3	max	0	0,2	3
31	33	Incl	0	0,05	1	1-Wasserkraft	1	min	0,2	0,2	3
32	76	Incl	0,1	0	0,5	0-mix	3	min	0,2	0,2	3
33	34	Incl	0,1	0,1	1,5	1-Wasserkraft	3	min	0,2	0,2	3
34	59	Incl	0	0,1	0,5	3-photovoltaics	3	min	0,2	0,2	3
35	54	Incl	0,05	0	1,5	0-mix	1	mittel	0,2	0,2	3

Exp No	Run Order	Incl/Excl	cuttings_f	cuttings_m	Bauteilfläche	Energie- quelle	Bauteildicke	CF-Herstel- lung	cuttings_2D	cuttings_3D	Aushärzeit
36	16	Incl	0,1	0,1	0,5	2-bio mass	1	mittel	0,2	0,2	3
37	45	Incl	0	0	1,5	2-bio mass	3	mittel	0,2	0,2	3
38	56	Incl	0	0,1	0,5	0-mix	1	max	0,2	0,2	3
39	2	Incl	0	0	0,5	1-Wasserkraft	3	max	0,2	0,2	3
40	57	Incl	0,1	0,1	0,5	3-photovoltaics	1	mittel	0	0	5
41	87	Incl	0	0,1	1,5	1-Wasserkraft	1	mittel	0,2	0	5
42	90	Incl	0	0	0,5	2-bio mass	1	max	0,2	0	5
43	84	Incl	0,1	0,1	0,5	0-mix	3	max	0,2	0	5
44	55	Incl	0,05	0,1	1,5	2-bio mass	1	min	0	0,2	5
45	36	Incl	0	0	1	1-Wasserkraft	3	mittel	0	0,2	5
46	1	Incl	0	0,1	0,5	2-bio mass	3	max	0	0,2	5
47	13	Incl	0,1	0	1,5	1-Wasserkraft	1	max	0,1	0,2	5
48	23	Incl	0,1	0	0,5	3-photovoltaics	3	mittel	0,2	0,2	5
49	83	Incl	0	0	1,5	3-photovoltaics	2	max	0,2	0,2	5
50	80	Incl	0	0	1	2-bio mass	1	min	0	0	10
51	51	Incl	0,1	0	0,5	0-mix	3	min	0	0	10
52	29	Incl	0	0,1	1,5	1-Wasserkraft	3	min	0	0	10
53	21	Incl	0	0,05	0,5	3-photovoltaics	3	mittel	0	0	10
54	73	Incl	0	0	0,5	1-Wasserkraft	1	max	0	0	10
55	28	Incl	0,1	0,1	0,5	2-bio mass	1	max	0	0	10
56	40	Incl	0,1	0,05	1,5	1-Wasserkraft	3	max	0	0	10
57	48	Incl	0	0	1,5	2-bio mass	3	max	0	0	10
58	9	Incl	0,05	0,1	0,5	0-mix	1	mittel	0,1	0	10
59	82	Incl	0	0	1,5	3-photovoltaics	1	mittel	0,1	0	10
60	14	Incl	0,1	0,1	1,5	3-photovoltaics	3	max	0,1	0	10
61	72	Incl	0,05	0,05	1,5	3-photovoltaics	1	min	0,2	0	10
62	91	Incl	0	0,1	1,5	0-mix	3	min	0,2	0	10
63	75	Incl	0	0	0,5	1-Wasserkraft	3	min	0,2	0	10
64	47	Incl	0,1	0	0,5	1-Wasserkraft	1	mittel	0,2	0	10
65	31	Incl	0,1	0,1	1,5	2-bio mass	3	mittel	0,2	0	10
66	68	Incl	0,1	0	1,5	0-mix	1	max	0,2	0	10
67	79	Incl	0	0,1	0,5	3-photovoltaics	1	max	0,2	0	10
68	52	Incl	0	0,1	1,5	0-mix	2	mittel	0	0,1	10
69	37	Incl	0,1	0	1	3-photovoltaics	1	max	0	0,1	10
70	49	Incl	0	0,1	0,5	2-bio mass	1	min	0,2	0,1	10
71	62	Incl	0	0	1,5	1-Wasserkraft	3	max	0,2	0,1	10
72	12	Incl	0	0,05	1,5	0-mix	1	min	0	0,2	10

Exp No	Run Order	Incl/Excl	cuttings_f	cuttings_m	Bauteilfläche	Energie- quelle	Bauteildicke	CF-Herstel- lung	cuttings_2D	cuttings_3D	Aushärtezeit
73	69	Incl	0,1	0	0,5	1-Wasserkraft	1	min	0	0,2	10
74	7	Incl	0	0,1	0,5	3-photovoltaics	1	min	0	0,2	10
75	6	Incl	0,1	0,1	1	2-bio mass	3	min	0	0,2	10
76	77	Incl	0	0	1,5	3-photovoltaics	3	min	0	0,2	10
77	61	Incl	0,1	0,1	1,5	1-Wasserkraft	1	mittel	0	0,2	10
78	38	Incl	0,05	0	0,5	2-bio mass	2	mittel	0	0,2	10
79	43	Incl	0,1	0	1,5	0-mix	3	mittel	0	0,2	10
80	70	Incl	0,05	0,1	1,5	0-mix	3	max	0	0,2	10
81	20	Incl	0	0	0,5	0-mix	3	max	0,1	0,2	10
82	88	Incl	0,1	0,1	1,5	0-mix	1	min	0,2	0,2	10
83	60	Incl	0,1	0	1,5	2-bio mass	1	min	0,2	0,2	10
84	92	Incl	0	0	0,5	0-mix	1	mittel	0,2	0,2	10
85	65	Incl	0,1	0,05	1,5	3-photovoltaics	1	mittel	0,2	0,2	10
86	85	Incl	0	0,1	0,5	1-Wasserkraft	3	mittel	0,2	0,2	10
87	4	Incl	0,1	0,1	0,5	1-Wasserkraft	1	max	0,2	0,2	10
88	74	Incl	0	0,1	1,5	2-bio mass	1	max	0,2	0,2	10
89	78	Incl	0,1	0	0,5	2-bio mass	3	max	0,2	0,2	10
90	11	Incl	0,05	0,05	1	3-photovoltaics	2	max	0,1	0,1	5
91	18	Incl	0,05	0,05	1	3-photovoltaics	2	max	0,1	0,1	5
92	24	Incl	0,05	0,05	1	3-photovoltaics	2	max	0,1	0,1	5

Tab. A-28: Optimierung SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Modellgüte quadratischer D-optimaler Versuchsplan

	Transformation	R ²	R ² adj.	Q ²	Condition number	Model terms	DF lack of fit
PED	Power ((Y)**-0,228)	0,999	0,998	0,996	7,34301	45	45
ADPe	Power ((Y)**-0,779)	0,999	0,998	0,996	9,52456	48	42
ADPf	Power ((Y)**-0,307)	0,999	0,998	0,996	4,66407	45	45
EP	Power ((Y)**-0,585)	1	1	1	11,4896	45	45
ODP	Power ((Y)**0,594)	1	1	0,999	9,40228	43	47
POCP	NegLog(-10(Log(100-Y)	1	1	1	12,3767	38	52
GWP	Power ((Y)**-0,221)	0,999	0,998	0,995	7,47224	45	45
AP	Power ((Y)**0,703)	1	1	1	12,0431	58	32

Tab. A-29: Screening verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette – linearer teilfaktorierlicher Versuchsplan Auflösung IV

No	Run Order	Incl/Excl	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste	Bauteilfläche [m ²]	Energiequelle	Bauteildicke [mm]	Pressenauslastung	CF-Herstellung	Preform Verschnitt (3D)	Aushärtezeit [min]	RTM WCM	Vakuumpumpe Typ [m ³ /h]	Rovingtyp	Legesystem
1	32	Incl	0	0	0,5	0-Mix	1	0,5	min	0	3	WCM	10	12k	Coriolis IR
2	27	Incl	0,1	0	0,5	0-Mix	1	1	min	0	10	RTM	10	50k	Composi-tence
3	20	Incl	0	0,1	0,5	0-Mix	1	1	max	0	3	WCM	250	50k	Composi-tence
4	11	Incl	0,1	0,1	0,5	0-Mix	1	0,5	max	0	10	RTM	250	12k	Coriolis IR
5	16	Incl	0	0	1,5	0-Mix	1	1	max	0,1	10	WCM	10	12k	Coriolis IR
6	31	Incl	0,1	0	1,5	0-Mix	1	0,5	max	0,1	3	RTM	10	50k	Composi-tence
7	3	Incl	0	0,1	1,5	0-Mix	1	0,5	min	0,1	10	WCM	250	50k	Composi-tence
8	9	Incl	0,1	0,1	1,5	0-Mix	1	1	min	0,1	3	RTM	250	12k	Coriolis IR
9	7	Incl	0	0	0,5	1-Wasser-kraft	1	0,5	max	0,1	10	RTM	250	50k	Coriolis IR
10	10	Incl	0,1	0	0,5	1-Wasser-kraft	1	1	max	0,1	3	WCM	250	12k	Composi-tence
11	18	Incl	0	0,1	0,5	1-Wasser-kraft	1	1	min	0,1	10	RTM	10	12k	Composi-tence
12	30	Incl	0,1	0,1	0,5	1-Wasser-kraft	1	0,5	min	0,1	3	WCM	10	50k	Coriolis IR
13	29	Incl	0	0	1,5	1-Wasser-kraft	1	1	min	0	3	RTM	250	50k	Coriolis IR

No	Run Order	Incl/Excl	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste	Bauteilfläche [m ²]	Energiequelle	Bauteildicke [mm]	Pressenauslastung	CF-Herstellung	Preform Verschnitt (3D)	Aushärzeit [min]	RTM WCM	Vakuumpumpe Typ [m ³ /h]	Rovingtyp	Legesystem
14	12	Incl	0,1	0	1,5	1-Wasser-kraft	1	0,5	min	0	10	WCM	250	12k	Composi-tence
15	28	Incl	0	0,1	1,5	1-Wasser-kraft	1	0,5	max	0	3	RTM	10	0,0008	Composi-tence
16	1	Incl	0,1	0,1	1,5	1-Wasser-kraft	1	1	max	0	10	WCM	10	50k	Coriolis IR
17	19	Incl	0	0	0,5	0-Mix	3	0,5	min	0,1	3	RTM	250	12k	Composi-tence
18	21	Incl	0,1	0	0,5	0-Mix	3	1	min	0,1	10	WCM	250	50k	Coriolis IR
19	35	Incl	0	0,1	0,5	0-Mix	3	1	max	0,1	3	RTM	10	50k	Coriolis IR
20	15	Incl	0,1	0,1	0,5	0-Mix	3	0,5	max	0,1	10	WCM	10	12k	Composi-tence
21	23	Incl	0	0	1,5	0-Mix	3	1	max	0	10	RTM	250	12k	Composi-tence
22	34	Incl	0,1	0	1,5	0-Mix	3	0,5	max	0	3	WCM	250	50k	Coriolis IR
23	6	Incl	0	0,1	1,5	0-Mix	3	0,5	min	0	10	RTM	10	50k	Coriolis IR
24	14	Incl	0,1	0,1	1,5	0-Mix	3	1	min	0	3	WCM	10	12k	Composi-tence
25	5	Incl	0	0	0,5	1-Wasser-kraft	3	0,5	max	0	10	WCM	10	50k	Composi-tence
26	4	Incl	0,1	0	0,5	1-Wasser-kraft	3	1	max	0	3	RTM	10	12k	Coriolis IR
27	26	Incl	0	0,1	0,5	1-Wasser-kraft	3	1	min	0	10	WCM	250	12k	Coriolis IR

No	Run Order	Incl/Excl	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste	Bauteilfläche [m ²]	Energiequelle	Bauteildicke [mm]	Pressenauslastung	CF-Herstellung	Preform Verschnitt (3D)	Aushärtezeit [min]	RTM WCM	Vakuumpumpe Typ [m ³ /h]	Rovingtyp	Legesystem
28	13	Incl	0,1	0,1	0,5	1-Wasserkraft	3	0,5	min	0	3	RTM	250	50k	Composi-tence
29	8	Incl	0	0	1,5	1-Wasserkraft	3	1	min	0,1	3	WCM	10	50k	Composi-tence
30	25	Incl	0,1	0	1,5	1-Wasserkraft	3	0,5	min	0,1	10	RTM	10	12k	Coriolis IR
31	24	Incl	0	0,1	1,5	1-Wasserkraft	3	0,5	max	0,1	3	WCM	250	12k	Coriolis IR
32	2	Incl	0,1	0,1	1,5	1-Wasserkraft	3	1	max	0,1	10	RTM	250	50k	Composi-tence
33	22	Incl	0,05	0,05	1	0-Mix	2	0,75	min	0,05	6,5	WCM	130	24k	Coriolis IR
34	33	Incl	0,05	0,05	1	0-Mix	2	0,75	min	0,05	6,5	WCM	130	24k	Coriolis IR
35	17	Incl	0,05	0,05	1	0-Mix	2	0,75	min	0,05	6,5	WCM	130	24k	Coriolis IR

Tab. A-30: Screening verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette – Modellgüte linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV

	Transformation	R ²	R ² adj.	Q ²	Condition number	Model terms	DF lack of fit
PED	Power ((Y)**-0,167)	0,957	0,931	0,871	1,21192	14	19
ADPe	Power ((Y)**-1,82)	0,947	0,914	0,842	1,21192	14	19
ADPf	Log (10Log(Y))	0,97	0,951	0,909	1,21192	14	19
EP	None	0,996	0,994	0,989	1,21192	14	19
ODP	Power ((Y)**0,268)	0,982	0,971	0,945	1,21192	14	19
POCP	None	0,995	0,992	0,985	1,21192	14	19
GWP	Log (10Log(Y))	0,951	0,921	0,853	1,21192	14	19
AP	Power ((Y)**0,251)	0,998	0,997	0,994	1,21192	14	19

Tab. A-31: Optimierung verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette – quadratisch D-optimaler Versuchsplan

Exp No	Run Order	Incl/Excl	cuttings_f	cuttings_m	Bauteilfläche	Energie- quelle	Bauteildicke	CF-Herstel- lung	cuttings_3D	Aushärzeit
1	55	Incl	0	0,1	1,5	0-mix	1	min	0	3
2	38	Incl	0	0	0,5	2-bio mass	1	min	0	3
3	60	Incl	0	0	1,5	3-phovoltaics	1	min	0	3
4	61	Incl	0,1	0,1	1,5	2-bio mass	3	min	0	3
5	40	Incl	0	0,1	0,5	3-phovoltaics	3	min	0	3
6	74	Incl	0,05	0,05	0,5	0-mix	1	mittel	0	3
7	15	Incl	0	0,1	1,5	2-bio mass	1	mittel	0	3
8	27	Incl	0,1	0,1	1	1-Wasserkraft	3	mittel	0	3
9	35	Incl	0,1	0	0,5	3-phovoltaics	3	mittel	0	3
10	65	Incl	0,1	0	0,5	1-Wasserkraft	1	max	0	3
11	18	Incl	0	0,05	1,5	1-Wasserkraft	2	max	0	3
12	36	Incl	0,1	0,05	0,5	2-bio mass	2	max	0	3
13	58	Incl	0	0,1	0,5	0-mix	3	max	0	3
14	26	Incl	0,1	0	1,5	0-mix	3	max	0	3
15	1	Incl	0,1	0,1	0,5	1-Wasserkraft	2	min	0,05	3
16	16	Incl	0	0,05	0,5	1-Wasserkraft	1	min	0,1	3
17	33	Incl	0,1	0	0,5	3-phovoltaics	1	min	0,1	3
18	39	Incl	0,1	0	0,5	0-mix	3	min	0,1	3
19	53	Incl	0	0	1,5	1-Wasserkraft	3	min	0,1	3
20	5	Incl	0,1	0,1	1,5	3-phovoltaics	3	min	0,1	3
21	37	Incl	0,1	0	1,5	1-Wasserkraft	1	mittel	0,1	3
22	68	Incl	0,1	0,1	0,5	2-bio mass	1	mittel	0,1	3
23	50	Incl	0	0,1	1,5	0-mix	3	mittel	0,1	3
24	77	Incl	0	0	0,5	2-bio mass	3	mittel	0,1	3
25	32	Incl	0	0	0,5	0-mix	1	max	0,1	3
26	17	Incl	0,1	0,1	1	0-mix	1	max	0,1	3
27	54	Incl	0,05	0	1,5	2-bio mass	1	max	0,1	3
28	80	Incl	0	0,1	0,5	3-phovoltaics	1	max	0,1	3
29	20	Incl	0,1	0,05	0,5	1-Wasserkraft	3	max	0,1	3
30	67	Incl	0	0	1,5	3-phovoltaics	3	max	0,1	3
31	21	Incl	0,1	0	0,5	1-Wasserkraft	3	min	0	5
32	29	Incl	0	0,1	0,5	1-Wasserkraft	1	mittel	0	5
33	63	Incl	0	0	1,5	0-mix	3	mittel	0	5
34	73	Incl	0,1	0,1	1,5	3-phovoltaics	1	max	0	5
35	52	Incl	0	0,1	1,5	2-bio mass	3	max	0,05	5

Exp No	Run Order	Incl/Excl	cuttings_f	cuttings_m	Bauteilfläche	Energie- quelle	Bauteildicke	CF-Herstel- lung	cuttings_3D	Aushärzeit
36	64	Incl	0,1	0,1	1,5	1-Wasserkraft	1	min	0,1	5
37	72	Incl	0	0,1	1	2-bio mass	2	min	0,1	5
38	3	Incl	0	0,1	0,5	3-phovoltaics	2	mittel	0,1	5
39	28	Incl	0,1	0	1,5	2-bio mass	3	mittel	0,1	5
40	22	Incl	0,1	0,1	0,5	3-phovoltaics	1	min	0	10
41	7	Incl	0	0	0,5	0-mix	3	min	0	10
42	78	Incl	0	0,1	1,5	1-Wasserkraft	3	min	0	10
43	71	Incl	0,1	0	1,5	3-phovoltaics	3	min	0	10
44	34	Incl	0,1	0	1,5	1-Wasserkraft	1	mittel	0	10
45	62	Incl	0,1	0	0,5	2-bio mass	1	mittel	0	10
46	70	Incl	0,1	0,1	1,5	0-mix	2	mittel	0	10
47	46	Incl	0	0	0,5	1-Wasserkraft	3	mittel	0	10
48	44	Incl	0	0,1	0,5	2-bio mass	3	mittel	0	10
49	12	Incl	0	0,1	1,5	3-phovoltaics	3	mittel	0	10
50	69	Incl	0,1	0	0,5	0-mix	1	max	0	10
51	19	Incl	0	0,1	1,5	0-mix	1	max	0	10
52	13	Incl	0,05	0,1	1	2-bio mass	1	max	0	10
53	51	Incl	0	0	0,5	3-phovoltaics	1	max	0	10
54	57	Incl	0,1	0,1	0,5	1-Wasserkraft	3	max	0	10
55	6	Incl	0	0	1,5	2-bio mass	3	max	0	10
56	9	Incl	0,1	0,05	1,5	2-bio mass	1	min	0,05	10
57	25	Incl	0,1	0,1	1	0-mix	3	min	0,05	10
58	10	Incl	0	0,1	1	0-mix	1	mittel	0,05	10
59	66	Incl	0	0	1,5	1-Wasserkraft	1	max	0,05	10
60	47	Incl	0,05	0	0,5	2-bio mass	3	max	0,05	10
61	24	Incl	0,05	0,1	0,5	0-mix	1	min	0,1	10
62	11	Incl	0,1	0	1,5	0-mix	1	min	0,1	10
63	48	Incl	0,05	0	1	1-Wasserkraft	1	min	0,1	10
64	30	Incl	0	0,1	1,5	3-phovoltaics	1	min	0,1	10
65	2	Incl	0,1	0,1	0,5	2-bio mass	3	min	0,1	10
66	42	Incl	0	0	0,5	3-phovoltaics	3	min	0,1	10
67	14	Incl	0,1	0,1	0,5	1-Wasserkraft	1	mittel	0,1	10
68	79	Incl	0	0	1,5	2-bio mass	1	mittel	0,1	10
69	56	Incl	0,1	0	1,5	3-phovoltaics	1	mittel	0,1	10
70	59	Incl	0,1	0	0,5	0-mix	3	mittel	0,1	10
71	31	Incl	0,05	0,1	1,5	1-Wasserkraft	3	mittel	0,1	10
72	75	Incl	0	0,05	0,5	2-bio mass	1	max	0,1	10

Exp No	Run Order	Incl/Excl	cuttings_f	cuttings_m	Bauteilfläche	Energie- quelle	Bauteildicke	CF-Herstel- lung	cuttings_3D	Aushärzeit
73	8	Incl	0,1	0,1	1,5	2-bio mass	2	max	0,1	10
74	49	Incl	0	0,05	1,5	0-mix	3	max	0,1	10
75	76	Incl	0	0,1	0,5	1-Wasserkraft	3	max	0,1	10
76	41	Incl	0,1	0	1,5	1-Wasserkraft	3	max	0,1	10
77	43	Incl	0,1	0,1	0,5	3-phovoltaics	3	max	0,1	10
78	23	Incl	0,05	0,05	1	3-phovoltaics	2	max	0,05	5
79	45	Incl	0,05	0,05	1	3-phovoltaics	2	max	0,05	5
80	4	Incl	0,05	0,05	1	3-phovoltaics	2	max	0,05	5

Tab. A-32: Optimierung verschnittarme duroplast-basierte CFK-Fertigungsprozesskette - Modellgüte quadratisch D-optimaler Versuchsplan

	Transformation	R ²	R ² adj.	Q ²	Condi- tion number	Model terms	DF lack of fit
PED	Power ((Y)**-0,375)	0,999	0,997	0,992	9,33284	49	29
ADPe	Power ((Y)**-1,28)	0,998	0,996	0,989	8,68058	46	32
ADPf	Power ((Y)**-0,145)	0,999	0,997	0,993	8,79808	39	39
EP	Power ((Y)**-0,768)	1	1	1	2,74424	25	53
ODP	Power ((Y)**0,878)	1	1	0,999	6,74028	43	35
POCP	None	1	1	1	7,52135	33	45
GWP	Power ((Y)**-0,177)	0,997	0,995	0,99	8,75501	37	41
AP	None	1	1	1	7,04869	45	33

Tab. A-33: Screening SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – linearer teilfaktorieller Versuchsplanung Auflösung IV

No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteilfläche	Bauteildicke	Pressenaustattung	Flächengewicht Gewebe	Pressentyp	Prozesszeit Imprägnierung	Prozessdruck Imprägnierung	IR-Heizfeld	Organoblech Verschnitt	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste
1	5	Incl	min	0-mix	0,5	1	0,5	125	elek	5	20	1,5	0	0	0
2	27	Incl	max	0-mix	0,5	1	0,5	500	elek	5	60	6	0	0,1	0,1

No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteilfläche	Bauteildicke	Pressenauslastung	Flächengewicht Gewebe	Presentyp	Prozesszeit Imprägnierung	Prozessdruck Imprägnierung	IR-Heizfeld	Organoblech Verschnitt	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste
3	33	Incl	min	1-Was-serkraft	0,5	1	0,5	500	oel	5	20	1,5	0,4	0,1	0,1
4	21	Incl	max	1-Was-serkraft	0,5	1	0,5	125	oel	5	60	6	0,4	0	0
5	26	Incl	min	0-mix	1,5	1	0,5	500	oel	15	60	1,5	0	0	0
6	2	Incl	max	0-mix	1,5	1	0,5	125	oel	15	20	6	0	0,1	0,1
7	6	Incl	min	1-Was-serkraft	1,5	1	0,5	125	elek	15	60	1,5	0,4	0,1	0,1
8	29	Incl	max	1-Was-serkraft	1,5	1	0,5	500	elek	15	20	6	0,4	0	0
9	30	Incl	min	0-mix	0,5	3	0,5	125	oel	15	60	6	0,4	0,1	0
10	28	Incl	max	0-mix	0,5	3	0,5	500	oel	15	20	1,5	0,4	0	0,1
11	10	Incl	min	1-Was-serkraft	0,5	3	0,5	500	elek	15	60	6	0	0	0,1
12	34	Incl	max	1-Was-serkraft	0,5	3	0,5	125	elek	15	20	1,5	0	0,1	0
13	7	Incl	min	0-mix	1,5	3	0,5	500	elek	5	20	6	0,4	0,1	0
14	14	Incl	max	0-mix	1,5	3	0,5	125	elek	5	60	1,5	0,4	0	0,1
15	1	Incl	min	1-Was-serkraft	1,5	3	0,5	125	oel	5	20	6	0	0	0,1
16	35	Incl	max	1-Was-serkraft	1,5	3	0,5	500	oel	5	60	1,5	0	0,1	0
17	11	Incl	min	0-mix	0,5	1	1	125	elek	15	20	6	0,4	0	0,1
18	13	Incl	max	0-mix	0,5	1	1	500	elek	15	60	1,5	0,4	0,1	0
19	9	Incl	min	1-Was-serkraft	0,5	1	1	500	oel	15	20	6	0	0,1	0
20	12	Incl	max	1-Was-serkraft	0,5	1	1	125	oel	15	60	1,5	0	0	0,1
21	8	Incl	min	0-mix	1,5	1	1	500	oel	5	60	6	0,4	0	0,1
22	32	Incl	max	0-mix	1,5	1	1	125	oel	5	20	1,5	0,4	0,1	0

No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteilfläche	Bauteildicke	Pressenauslastung	Flächengewicht Gewebe	Pressentyp	Prozesszeit Imprägnierung	Prozessdruck Imprägnierung	IR-Heizfeld	Organoblech Verschnitt	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste
23	23	Incl	min	1-Was-serkraft	1,5	1	1	125	elek	5	60	6	0	0,1	0
24	24	Incl	max	1-Was-serkraft	1,5	1	1	500	elek	5	20	1,5	0	0	0,1
25	15	Incl	min	0-mix	0,5	3	1	125	oel	5	60	1,5	0	0,1	0,1
26	3	Incl	max	0-mix	0,5	3	1	500	oel	5	20	6	0	0	0
27	25	Incl	min	1-Was-serkraft	0,5	3	1	500	elek	5	60	1,5	0,4	0	0
28	20	Incl	max	1-Was-serkraft	0,5	3	1	125	elek	5	20	6	0,4	0,1	0,1
29	17	Incl	min	0-mix	1,5	3	1	500	elek	15	20	1,5	0	0,1	0,1
30	16	Incl	max	0-mix	1,5	3	1	125	elek	15	60	6	0	0	0
31	22	Incl	min	1-Was-serkraft	1,5	3	1	125	oel	15	20	1,5	0,4	0	0
32	18	Incl	max	1-Was-serkraft	1,5	3	1	500	oel	15	60	6	0,4	0,1	0,1
33	4	Incl	min	0-mix	1	2	0,75	312,5	elek	10	40	3,75	0,2	0,05	0,05
34	31	Incl	min	0-mix	1	2	0,75	312,5	elek	10	40	3,75	0,2	0,05	0,05
35	19	Incl	min	0-mix	1	2	0,75	312,5	elek	10	40	3,75	0,2	0,05	0,05

Tab. A-34: Screening SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Modellgüte linearer teil-faktorieller Versuchsplanung Auflösung IV

	Transformation	R ²	R ² adj.	Q ²	Condi-tion number	Model terms	DF lack of fit
PED	Power ((Y)**-0,793)	0,826	0,719	0,479	1,1726	14	19
ADPe	Power ((Y)**-0,478)	0,879	0,803	0,626	1,1726	14	19
ADPf	Power ((Y)**-0,562)	0,841	0,743	0,526	1,1726	14	19
EP	Power ((Y)**-0,133)	0,999	0,998	0,998	1,1726	14	19
ODP	Power ((Y)**-0,215)	0,854	0,764	0,559	1,1726	14	19

	Transformation	R²	R² adj.	Q²	Condition number	Model terms	DF lack of fit
POCP	None	0,946	0,913	0,835	1,1726	14	19
GWP	Power ((Y)**-0,797)	0,818	0,706	0,452	1,1726	14	19
AP	Power ((Y)**0,194)	0,972	0,955	0,915	1,1726	14	19

Tab. A-35: Detailanalyse SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – quadratischer D-optimaler Versuchsplan

No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteildicke	Pressenauslastung	Presstyp	Prozesszeit Imprägnierung	Prozessdruck Imprägnierung	Organoblech Verschnitt	Verschnitt Nachbearbeitung
1	81	Incl	mittel	3- photovoltaik	2	0,5	0-elek	5	20	0	0
2	28	Incl	min	2- bio mass	3	0,5	0-elek	5	20	0	0
3	73	Incl	max	1-Wasserkraft	3	0,8	0-elek	5	20	0	0
4	43	Incl	mittel	0-mix	3	1	0-elek	5	20	0	0
5	39	Incl	mittel	1-Wasserkraft	1	0,5	1-oel	5	20	0	0
6	65	Incl	mittel	3- photovoltaik	3	1	1-oel	10	20	0	0
7	59	Incl	min	1-Wasserkraft	1	1	0-elek	15	20	0	0
8	53	Incl	max	2- bio mass	1	0,5	1-oel	15	20	0	0
9	3	Incl	min	0-mix	3	0,5	1-oel	15	20	0	0
10	29	Incl	mittel	1-Wasserkraft	3	0,5	0-elek	15	40	0	0
11	80	Incl	min	3- photovoltaik	1	1	0-elek	5	60	0	0
12	17	Incl	max	3- photovoltaik	3	0,5	1-oel	5	60	0	0
13	55	Incl	mittel	1-Wasserkraft	2	1	1-oel	5	60	0	0
14	15	Incl	mittel	2- bio mass	1	0,5	0-elek	10	60	0	0
15	1	Incl	mittel	3- photovoltaik	1	0,5	1-oel	15	60	0	0
16	69	Incl	min	1-Wasserkraft	3	0,8	1-oel	15	60	0	0
17	92	Incl	max	0-mix	1	1	1-oel	15	60	0	0
18	56	Incl	mittel	2- bio mass	1	1	0-elek	5	20	0,2	0
19	37	Incl	max	1-Wasserkraft	1	1	1-oel	5	40	0,2	0
20	57	Incl	min	0-mix	1	0,5	0-elek	5	60	0,2	0
21	49	Incl	max	2- bio mass	3	1	0-elek	15	60	0,2	0
22	45	Incl	mittel	2- bio mass	3	0,5	0-elek	5	20	0,4	0
23	67	Incl	min	1-Wasserkraft	3	1	0-elek	5	20	0,4	0
24	74	Incl	min	3- photovoltaik	1	0,5	1-oel	5	20	0,4	0
25	54	Incl	max	0-mix	3	0,5	1-oel	5	20	0,4	0

No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteildicke	Pressenauslastung	Pressentyp	Prozesszeit Imprägnierung	Prozessdruck Imprägnierung	Organoblech Verschnitt	Verschnitt Nachbearbeitung
26	87	Incl	max	3- photovoltaik	1	1	1-oel	5	20	0,4	0
27	60	Incl	mittel	0-mix	1	0,5	1-oel	10	20	0,4	0
28	30	Incl	min	3- photovoltaik	3	0,8	0-elek	15	20	0,4	0
29	62	Incl	min	0-mix	1	1	0-elek	15	20	0,4	0
30	79	Incl	max	1-Wasserkraft	2	0,5	1-oel	15	20	0,4	0
31	83	Incl	max	3- photovoltaik	1	0,5	0-elek	15	40	0,4	0
32	90	Incl	mittel	2- bio mass	2	0,8	1-oel	15	40	0,4	0
33	9	Incl	mittel	3- photovoltaik	3	1	0-elek	5	60	0,4	0
34	78	Incl	max	2- bio mass	1	0,8	1-oel	5	60	0,4	0
35	76	Incl	min	0-mix	3	1	1-oel	5	60	0,4	0
36	4	Incl	min	2- bio mass	2	0,5	0-elek	15	60	0,4	0
37	23	Incl	mittel	0-mix	3	0,5	0-elek	15	60	0,4	0
38	68	Incl	mittel	1-Wasserkraft	1	1	0-elek	15	60	0,4	0
39	26	Incl	max	3- photovoltaik	3	1	1-oel	15	60	0,4	0
40	27	Incl	mittel	2- bio mass	3	1	0-elek	15	20	0	0,05
41	14	Incl	min	3- photovoltaik	3	0,5	0-elek	5	60	0	0,05
42	61	Incl	max	1-Wasserkraft	1	0,5	0-elek	15	60	0	0,05
43	19	Incl	min	2- bio mass	1	1	1-oel	15	60	0	0,05
44	21	Incl	mittel	1-Wasserkraft	3	0,5	1-oel	15	60	0,2	0,05
45	34	Incl	max	2- bio mass	3	0,5	1-oel	10	20	0,4	0,05
46	20	Incl	min	2- bio mass	1	0,8	0-elek	5	40	0,4	0,05
47	13	Incl	min	1-Wasserkraft	1	0,5	1-oel	15	40	0,4	0,05
48	77	Incl	mittel	1-Wasserkraft	3	1	0-elek	5	20	0	0,1
49	72	Incl	mittel	2- bio mass	2	0,5	1-oel	5	20	0	0,1
50	6	Incl	max	1-Wasserkraft	3	0,5	1-oel	5	20	0	0,1
51	18	Incl	min	0-mix	1	1	1-oel	5	20	0	0,1
52	70	Incl	min	3- photovoltaik	1	0,5	0-elek	10	20	0	0,1
53	48	Incl	max	0-mix	1	0,5	0-elek	15	20	0	0,1
54	86	Incl	max	2- bio mass	1	1	0-elek	15	20	0	0,1
55	38	Incl	mittel	1-Wasserkraft	1	1	1-oel	15	20	0	0,1
56	71	Incl	min	3- photovoltaik	3	1	1-oel	15	20	0	0,1
57	42	Incl	mittel	3- photovoltaik	1	1	1-oel	5	40	0	0,1
58	47	Incl	max	2- bio mass	1	0,5	0-elek	5	60	0	0,1
59	89	Incl	min	1-Wasserkraft	1	0,5	1-oel	5	60	0	0,1
60	46	Incl	mittel	0-mix	3	0,5	1-oel	5	60	0	0,1

No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteildicke	Pressenauslastung	Pressentyp	Prozesszeit Imprägnierung	Prozessdruck Imprägnierung	Organoblech Verschnitt	Verschnitt Nachbearbeitung
61	10	Incl	max	2- bio mass	3	1	1-oel	5	60	0	0,1
62	11	Incl	mittel	0-mix	1	0,8	0-elek	15	60	0	0,1
63	85	Incl	min	0-mix	3	1	0-elek	15	60	0	0,1
64	66	Incl	max	3- photovoltaik	3	1	0-elek	15	60	0	0,1
65	33	Incl	max	2- bio mass	3	0,5	1-oel	15	60	0	0,1
66	75	Incl	max	0-mix	3	0,8	0-elek	10	20	0,2	0,1
67	41	Incl	min	1-Wasserkraft	3	0,5	0-elek	15	20	0,2	0,1
68	36	Incl	max	3- photovoltaik	1	0,8	1-oel	15	20	0,2	0,1
69	35	Incl	max	1-Wasserkraft	1	0,5	0-elek	5	20	0,4	0,1
70	58	Incl	min	0-mix	3	0,5	0-elek	5	20	0,4	0,1
71	2	Incl	max	3- photovoltaik	3	1	0-elek	5	20	0,4	0,1
72	82	Incl	mittel	1-Wasserkraft	3	0,8	1-oel	5	20	0,4	0,1
73	8	Incl	mittel	2- bio mass	1	0,5	0-elek	15	20	0,4	0,1
74	5	Incl	mittel	3- photovoltaik	1	1	0-elek	15	20	0,4	0,1
75	7	Incl	max	1-Wasserkraft	3	1	0-elek	15	20	0,4	0,1
76	44	Incl	mittel	3- photovoltaik	3	0,5	1-oel	15	20	0,4	0,1
77	32	Incl	mittel	0-mix	3	1	1-oel	15	20	0,4	0,1
78	16	Incl	min	2- bio mass	3	1	1-oel	15	20	0,4	0,1
79	88	Incl	mittel	1-Wasserkraft	2	0,5	0-elek	10	40	0,4	0,1
80	50	Incl	mittel	3- photovoltaik	1	0,5	0-elek	5	60	0,4	0,1
81	64	Incl	max	1-Wasserkraft	3	0,5	0-elek	5	60	0,4	0,1
82	22	Incl	max	0-mix	1	1	0-elek	5	60	0,4	0,1
83	91	Incl	min	1-Wasserkraft	1	1	0-elek	5	60	0,4	0,1
84	40	Incl	min	2- bio mass	3	0,5	1-oel	5	60	0,4	0,1
85	31	Incl	mittel	2- bio mass	1	1	1-oel	5	60	0,4	0,1
86	63	Incl	min	3- photovoltaik	2	1	1-oel	10	60	0,4	0,1
87	51	Incl	min	3- photovoltaik	1	0,5	0-elek	15	60	0,4	0,1
88	25	Incl	mittel	2- bio mass	3	1	0-elek	15	60	0,4	0,1
89	52	Incl	max	0-mix	1	0,5	1-oel	15	60	0,4	0,1
90	84	Incl	max	3- photovoltaik	2	0,8	1-oel	10	40	0,2	0,05
91	12	Incl	max	3- photovoltaik	2	0,8	1-oel	10	40	0,2	0,05
92	24	Incl	max	3- photovoltaik	2	0,8	1-oel	10	40	0,2	0,05

Tab. A-36: Detailanalyse SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Modellgüte quadratischer D-optimaler Versuchsplan

	Transformation	R²	R² adj.	Q²	Condition number	Model terms	DF lack of fit
PED	Power ((Y)**-1,04)	0,998	0,995	0,983	4,84965	59	31
ADPe	Power ((Y)**-0,133)	0,998	0,996	0,988	6,99791	52	38
ADPf	Power ((Y)**-1,05)	0,997	0,993	0,983	4,57935	51	39
EP	Power ((Y)**-0,339)	1	1	1	7,57659	50	40
ODP	Power ((Y)**-0,646)	0,997	0,993	0,981	4,37655	47	43
POCP	None	1	1	0,999	6,35702	26	64
GWP	Power ((Y)**-0,754)	0,996	0,991	0,976	4,54664	52	38
AP	Power ((Y)**0,6)	0,996	0,993	0,989	2,84647	31	59

Tab. A-37: Screening verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette – linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV

No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteilfläche	Bauteildicke	Pressentyp Tape	Tapebreite	Pressentyp Konsolidieren	IR-Heizfeld	Organoblech Verschnitt	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste
1	20	Incl	min	0-mix	0,5	1	elek	50	elek	1,5	0	0	0
2	25	Incl	max	0-mix	0,5	1	elek	150	elek	1,5	0,1	0,1	0
3	19	Incl	min	1-Wasserkraft	0,5	1	elek	150	oel	1,5	0	0	0,1
4	18	Incl	max	1-Wasserkraft	0,5	1	elek	50	oel	1,5	0,1	0,1	0,1
5	30	Incl	min	0-mix	1,5	1	elek	150	oel	6	0,1	0	0
6	12	Incl	max	0-mix	1,5	1	elek	50	oel	6	0	0,1	0
7	16	Incl	min	1-Wasserkraft	1,5	1	elek	50	elek	6	0,1	0	0,1
8	7	Incl	max	1-Wasserkraft	1,5	1	elek	150	elek	6	0	0,1	0,1
9	14	Incl	min	0-mix	0,5	3	elek	50	oel	6	0,1	0,1	0,1
10	32	Incl	max	0-mix	0,5	3	elek	150	oel	6	0	0	0,1
11	29	Incl	min	1-Wasserkraft	0,5	3	elek	150	elek	6	0,1	0,1	0
12	11	Incl	max	1-Wasserkraft	0,5	3	elek	50	elek	6	0	0	0
13	27	Incl	min	0-mix	1,5	3	elek	150	elek	1,5	0	0,1	0,1
14	31	Incl	max	0-mix	1,5	3	elek	50	elek	1,5	0,1	0	0,1
15	13	Incl	min	1-Wasserkraft	1,5	3	elek	50	oel	1,5	0	0,1	0
16	24	Incl	max	1-Wasserkraft	1,5	3	elek	150	oel	1,5	0,1	0	0
17	9	Incl	min	0-mix	0,5	1	oel	50	elek	6	0	0,1	0,1
18	34	Incl	max	0-mix	0,5	1	oel	150	elek	6	0,1	0	0,1
19	1	Incl	min	1-Wasserkraft	0,5	1	oel	150	oel	6	0	0,1	0

No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteilfläche	Bauteildicke	Pressentyp Tape	Tapebreite	Pressentyp Konsolidieren	IR-Heizfeld	Organoblech Verschnitt	Verschnitt Nachbearbeitung	Matrixreste
20	8	Incl	max	1-Wasserkraft	0,5	1	oel	50	oel	6	0,1	0	0
21	4	Incl	min	0-mix	1,5	1	oel	150	oel	1,5	0,1	0,1	0,1
22	15	Incl	max	0-mix	1,5	1	oel	50	oel	1,5	0	0	0,1
23	23	Incl	min	1-Wasserkraft	1,5	1	oel	50	elek	1,5	0,1	0,1	0
24	28	Incl	max	1-Wasserkraft	1,5	1	oel	150	elek	1,5	0	0	0
25	22	Incl	min	0-mix	0,5	3	oel	50	oel	1,5	0,1	0	0
26	6	Incl	max	0-mix	0,5	3	oel	150	oel	1,5	0	0,1	0
27	21	Incl	min	1-Wasserkraft	0,5	3	oel	150	elek	1,5	0,1	0	0,1
28	33	Incl	max	1-Wasserkraft	0,5	3	oel	50	elek	1,5	0	0,1	0,1
29	2	Incl	min	0-mix	1,5	3	oel	150	elek	6	0	0	0
30	17	Incl	max	0-mix	1,5	3	oel	50	elek	6	0,1	0,1	0
31	26	Incl	min	1-Wasserkraft	1,5	3	oel	50	oel	6	0	0	0,1
32	5	Incl	max	1-Wasserkraft	1,5	3	oel	150	oel	6	0,1	0,1	0,1
33	10	Incl	min	0-mix	1	2	elek	100	elek	3,75	0,05	0,05	0,05
34	3	Incl	min	0-mix	1	2	elek	100	elek	3,75	0,05	0,05	0,05
35	35	Incl	min	0-mix	1	2	elek	100	elek	3,75	0,05	0,05	0,05

Tab. A-38: Screening-Analyse verschnittarme thermoplastischer Fertigungsprozesskette – Modellgüte linearer teilfaktorieller Versuchsplan Auflösung IV

	Transformation	R ²	R ² adj.	Q ²	Condition number	Model terms	DF lack of fit
PED	Power ((Y)**0,315)	0,94	0,911	0,857	1,21192	12	21
ADPe	Power ((Y)**0,215)	0,965	0,948	0,913	1,21192	12	21
ADPf	Power ((Y)**0,457)	0,954	0,933	0,892	1,21192	12	21
EP	Log (10Log(Y))	1	1	1	1,21192	12	21
ODP	Power ((Y)**0,624)	0,975	0,963	0,939	1,21192	12	21
POCP	None	0,995	0,992	0,987	1,21192	12	21
GWP	Power ((Y)**0,354)	0,934	0,902	0,841	1,21192	12	21
AP	Power ((Y)**0,491)	0,997	0,996	0,993	1,21192	12	21

Tab. A-39: Detailanalyse verschnittarmer thermoplastischer Fertigungsprozesskette Strukturen – quadratischer D-optimaler Versuchsplan

No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteildicke	Pressentyp Tape	Tapebreite	Pressentyp Konsolidierung	IR-Fläche	IR-Material	Verschnitt 2D-Stack	Verschnitt Nachbearbeitung
1	81	Incl	mittel	0-mix	3	1-oel	50	0-elek	1,5	0-quartz	0	0
2	90	Incl	min	3-photovoltaik	3	0-elek	150	0-elek	1,5	0-quartz	0	0
3	104	Incl	min	2- bio mass	1	1-oel	50	1-oel	1,5	0-quartz	0	0
4	94	Incl	max	1-Wasserkraft	1	0-elek	150	1-oel	1,5	0-quartz	0	0
5	114	Incl	mittel	0-mix	1	0-elek	150	0-elek	6	0-quartz	0	0
6	59	Incl	min	1-Wasserkraft	1	1-oel	150	0-elek	6	0-quartz	0	0
7	117	Incl	max	2- bio mass	2	0-elek	50	1-oel	6	0-quartz	0	0
8	68	Incl	mittel	3-photovoltaik	1	1-oel	50	1-oel	6	0-quartz	0	0
9	18	Incl	min	2- bio mass	3	1-oel	150	1-oel	6	0-quartz	0	0
10	105	Incl	max	1-Wasserkraft	3	0-elek	50	0-elek	1,5	1-Metall	0	0
11	99	Incl	max	2- bio mass	1	0-elek	150	0-elek	1,5	1-Metall	0	0
12	34	Incl	min	0-mix	3	0-elek	100	1-oel	1,5	1-Metall	0	0
13	19	Incl	mittel	0-mix	1	1-oel	150	1-oel	1,5	1-Metall	0	0
14	61	Incl	mittel	1-Wasserkraft	3	1-oel	150	0-elek	3	1-Metall	0	0
15	103	Incl	min	2- bio mass	1	0-elek	50	0-elek	6	1-Metall	0	0
16	91	Incl	min	3-photovoltaik	3	1-oel	50	0-elek	6	1-Metall	0	0
17	89	Incl	max	0-mix	3	1-oel	100	0-elek	6	1-Metall	0	0
18	50	Incl	mittel	2- bio mass	3	0-elek	150	0-elek	6	1-Metall	0	0
19	110	Incl	min	3-photovoltaik	1	1-oel	150	1-oel	6	1-Metall	0	0
20	46	Incl	mittel	3-photovoltaik	1	0-elek	50	0-elek	1,5	2-Keramik	0	0
21	65	Incl	max	3-photovoltaik	2	1-oel	50	0-elek	3	2-Keramik	0	0
22	49	Incl	max	1-Wasserkraft	1	0-elek	50	0-elek	6	2-Keramik	0	0
23	40	Incl	mittel	2- bio mass	2	1-oel	50	0-elek	6	2-Keramik	0	0
24	54	Incl	mittel	0-mix	3	0-elek	50	1-oel	6	2-Keramik	0	0
25	47	Incl	min	0-mix	1	1-oel	50	1-oel	6	2-Keramik	0	0
26	111	Incl	mittel	1-Wasserkraft	3	0-elek	100	1-oel	6	0-quartz	0,05	0
27	36	Incl	min	1-Wasserkraft	2	0-elek	50	1-oel	1,5	1-Metall	0,05	0
28	52	Incl	max	3-photovoltaik	3	0-elek	50	1-oel	1,5	1-Metall	0,05	0

No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteildicke	Pressentyp Tape	Tapebreite	Pressentyp Konsolidierung	IR-Fläche	IR-Material	Verschnitt 2D-Stack	Verschnitt Nachbearbeitung
29	100	Incl	max	1-Wasserkraft	3	1-oel	150	0-elek	1,5	2-Keramik	0,05	0
30	56	Incl	mittel	2- bio mass	1	1-oel	150	0-elek	1,5	0-quartz	0,1	0
31	28	Incl	max	1-Wasserkraft	3	1-oel	50	1-oel	1,5	0-quartz	0,1	0
32	26	Incl	max	0-mix	3	0-elek	150	1-oel	1,5	0-quartz	0,1	0
33	15	Incl	min	2- bio mass	3	0-elek	50	0-elek	3	0-quartz	0,1	0
34	96	Incl	max	3-photovoltaik	3	1-oel	150	0-elek	6	0-quartz	0,1	0
35	31	Incl	min	1-Wasserkraft	1	0-elek	50	1-oel	6	0-quartz	0,1	0
36	16	Incl	max	0-mix	1	1-oel	50	1-oel	6	0-quartz	0,1	0
37	69	Incl	min	0-mix	1	1-oel	150	0-elek	1,5	1-Metall	0,1	0
38	53	Incl	mittel	3-photovoltaik	2	0-elek	150	1-oel	1,5	1-Metall	0,1	0
39	67	Incl	max	2- bio mass	3	1-oel	150	1-oel	3	1-Metall	0,1	0
40	35	Incl	max	1-Wasserkraft	1	0-elek	150	0-elek	6	1-Metall	0,1	0
41	30	Incl	min	2- bio mass	1	1-oel	50	1-oel	6	1-Metall	0,1	0
42	11	Incl	max	0-mix	1	0-elek	50	0-elek	1,5	2-Keramik	0,1	0
43	37	Incl	min	1-Wasserkraft	1	1-oel	50	0-elek	1,5	2-Keramik	0,1	0
44	10	Incl	mittel	2- bio mass	3	0-elek	50	1-oel	1,5	2-Keramik	0,1	0
45	3	Incl	min	2- bio mass	1	0-elek	150	1-oel	1,5	2-Keramik	0,1	0
46	8	Incl	max	3-photovoltaik	1	1-oel	150	1-oel	1,5	2-Keramik	0,1	0
47	92	Incl	mittel	0-mix	3	1-oel	150	0-elek	3	2-Keramik	0,1	0
48	5	Incl	min	0-mix	3	0-elek	50	0-elek	6	2-Keramik	0,1	0
49	25	Incl	max	2- bio mass	3	0-elek	150	0-elek	6	2-Keramik	0,1	0
50	45	Incl	min	3-photovoltaik	3	1-oel	100	1-oel	6	2-Keramik	0,1	0
51	43	Incl	mittel	1-Wasserkraft	1	1-oel	150	1-oel	6	2-Keramik	0,1	0
52	95	Incl	max	1-Wasserkraft	3	1-oel	50	1-oel	6	1-Metall	0	0,05
53	9	Incl	mittel	3-photovoltaik	3	0-elek	150	1-oel	6	2-Keramik	0	0,05
54	84	Incl	mittel	3-photovoltaik	3	1-oel	50	1-oel	1,5	2-Keramik	0,05	0,05

No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteildicke	Presentyp Tape	Tapebreite	Presentyp Konsolidierung	IR-Fläche	IR-Material	Verschnitt 2D-Stack	Verschnitt Nachbearbeitung
55	27	Incl	min	3-photovoltaik	1	0-elek	100	0-elek	6	2-Keramik	0,05	0,05
56	79	Incl	mittel	1-Wasserkraft	1	0-elek	150	0-elek	1,5	0-quartz	0,1	0,05
57	116	Incl	max	3-photovoltaik	3	1-oel	100	0-elek	1,5	1-Metall	0,1	0,05
58	107	Incl	mittel	0-mix	1	0-elek	50	0-elek	6	1-Metall	0,1	0,05
59	88	Incl	max	1-Wasserkraft	3	0-elek	50	1-oel	3	2-Keramik	0,1	0,05
60	82	Incl	max	3-photovoltaik	1	0-elek	50	0-elek	1,5	0-quartz	0	0,1
61	72	Incl	min	1-Wasserkraft	3	1-oel	50	0-elek	1,5	0-quartz	0	0,1
62	66	Incl	mittel	3-photovoltaik	1	1-oel	150	0-elek	1,5	0-quartz	0	0,1
63	70	Incl	mittel	2- bio mass	3	0-elek	150	1-oel	1,5	0-quartz	0	0,1
64	98	Incl	min	0-mix	1	1-oel	150	1-oel	1,5	0-quartz	0	0,1
65	77	Incl	max	2- bio mass	3	1-oel	100	0-elek	3	0-quartz	0	0,1
66	29	Incl	min	2- bio mass	1	0-elek	150	0-elek	6	0-quartz	0	0,1
67	21	Incl	max	1-Wasserkraft	3	0-elek	150	0-elek	6	0-quartz	0	0,1
68	97	Incl	min	0-mix	3	0-elek	50	1-oel	6	0-quartz	0	0,1
69	38	Incl	max	1-Wasserkraft	1	1-oel	50	1-oel	6	0-quartz	0	0,1
70	4	Incl	max	0-mix	3	1-oel	50	1-oel	1,5	1-Metall	0	0,1
71	93	Incl	min	2- bio mass	3	1-oel	150	1-oel	1,5	1-Metall	0	0,1
72	60	Incl	mittel	3-photovoltaik	2	0-elek	50	0-elek	3	1-Metall	0	0,1
73	101	Incl	max	2- bio mass	1	1-oel	150	0-elek	6	1-Metall	0	0,1
74	20	Incl	max	0-mix	1	0-elek	150	1-oel	6	1-Metall	0	0,1
75	48	Incl	mittel	1-Wasserkraft	1	0-elek	150	1-oel	6	1-Metall	0	0,1
76	86	Incl	min	2- bio mass	3	0-elek	50	0-elek	1,5	2-Keramik	0	0,1
77	73	Incl	min	1-Wasserkraft	1	0-elek	150	0-elek	1,5	2-Keramik	0	0,1
78	113	Incl	min	3-photovoltaik	1	0-elek	50	1-oel	1,5	2-Keramik	0	0,1
79	63	Incl	mittel	1-Wasserkraft	2	1-oel	100	1-oel	1,5	2-Keramik	0	0,1
80	57	Incl	max	0-mix	3	0-elek	150	1-oel	1,5	2-Keramik	0	0,1
81	71	Incl	mittel	2- bio mass	1	1-oel	150	1-oel	3	2-Keramik	0	0,1
82	41	Incl	mittel	0-mix	1	1-oel	50	0-elek	6	2-Keramik	0	0,1

No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteildicke	Pressentyp Tape	Tapebreite	Pressentyp Konsolidierung	IR-Fläche	IR-Material	Verschnitt 2D-Stack	Verschnitt Nachbearbeitung
83	58	Incl	min	0-mix	3	1-oel	150	0-elek	6	2-Keramik	0	0,1
84	7	Incl	max	3-photovoltaik	3	1-oel	100	1-oel	6	2-Keramik	0	0,1
85	33	Incl	min	1-Wasserkraft	3	0-elek	150	1-oel	6	2-Keramik	0	0,1
86	78	Incl	mittel	0-mix	3	0-elek	150	0-elek	1,5	1-Metall	0,05	0,1
87	42	Incl	max	1-Wasserkraft	1	1-oel	50	0-elek	3	1-Metall	0,05	0,1
88	80	Incl	max	0-mix	1	1-oel	150	0-elek	1,5	0-quartz	0,1	0,1
89	6	Incl	min	1-Wasserkraft	3	1-oel	150	0-elek	1,5	0-quartz	0,1	0,1
90	112	Incl	mittel	0-mix	1	0-elek	50	1-oel	1,5	0-quartz	0,1	0,1
91	39	Incl	min	3-photovoltaik	2	1-oel	50	1-oel	1,5	0-quartz	0,1	0,1
92	115	Incl	mittel	3-photovoltaik	3	0-elek	50	0-elek	6	0-quartz	0,1	0,1
93	22	Incl	min	0-mix	1	1-oel	50	0-elek	6	0-quartz	0,1	0,1
94	2	Incl	mittel	2- bio mass	3	1-oel	50	1-oel	6	0-quartz	0,1	0,1
95	87	Incl	max	3-photovoltaik	1	0-elek	150	1-oel	6	0-quartz	0,1	0,1
96	51	Incl	min	3-photovoltaik	1	0-elek	50	0-elek	1,5	1-Metall	0,1	0,1
97	83	Incl	mittel	2- bio mass	1	1-oel	50	0-elek	1,5	1-Metall	0,1	0,1
98	75	Incl	mittel	1-Wasserkraft	3	0-elek	50	1-oel	1,5	1-Metall	0,1	0,1
99	74	Incl	max	2- bio mass	1	0-elek	100	1-oel	1,5	1-Metall	0,1	0,1
100	109	Incl	min	1-Wasserkraft	1	1-oel	150	1-oel	1,5	1-Metall	0,1	0,1
101	12	Incl	max	2- bio mass	3	0-elek	50	0-elek	6	1-Metall	0,1	0,1
102	1	Incl	min	1-Wasserkraft	2	0-elek	100	0-elek	6	1-Metall	0,1	0,1
103	106	Incl	mittel	3-photovoltaik	1	1-oel	150	0-elek	6	1-Metall	0,1	0,1
104	13	Incl	max	3-photovoltaik	1	1-oel	50	1-oel	6	1-Metall	0,1	0,1
105	55	Incl	min	3-photovoltaik	3	0-elek	150	1-oel	6	1-Metall	0,1	0,1
106	85	Incl	mittel	0-mix	3	1-oel	150	1-oel	6	1-Metall	0,1	0,1
107	17	Incl	max	3-photovoltaik	3	0-elek	150	0-elek	1,5	2-Keramik	0,1	0,1
108	64	Incl	max	2- bio mass	1	1-oel	50	1-oel	1,5	2-Keramik	0,1	0,1
109	32	Incl	min	0-mix	3	1-oel	50	1-oel	1,5	2-Keramik	0,1	0,1
110	108	Incl	mittel	2- bio mass	1	0-elek	50	0-elek	6	2-Keramik	0,1	0,1
111	14	Incl	mittel	1-Wasserkraft	3	1-oel	50	0-elek	6	2-Keramik	0,1	0,1

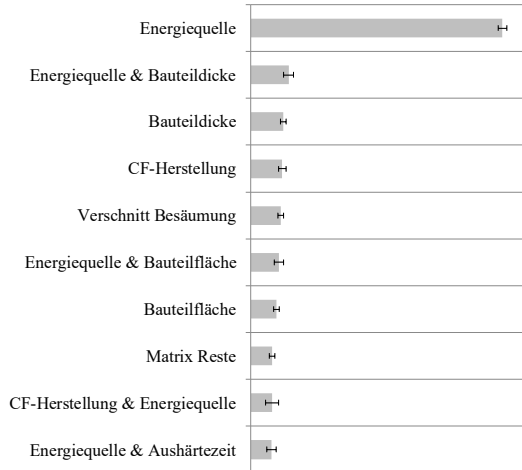
No	Run Order	Incl/Excl	Faserherstellung	Energiequelle	Bauteildicke	Presentyp Tape	Tapebreite	Presesntyp Konsolidierung	IR-Fläche	IR-Material	Verschnitt 2D-Stack	Verschnitt Nachbearbeitung
112	102	Incl	min	2- bio mass	2	1-oel	150	0-elek	6	2-Keramik	0,1	0,1
113	23	Incl	min	0-mix	1	0-elek	150	1-oel	6	2-Keramik	0,1	0,1
114	62	Incl	mittel	2- bio mass	3	0-elek	150	1-oel	6	2-Keramik	0,1	0,1
115	76	Incl	max	3-photovoltaik	2	1-oel	100	1-oel	3	2-Keramik	0,05	0,05
116	44	Incl	max	3-photovoltaik	2	1-oel	100	1-oel	3	2-Keramik	0,05	0,05
117	24	Incl	max	3-photovoltaik	2	1-oel	100	1-oel	3	2-Keramik	0,05	0,05

Tab. A-40: Detailanalyse verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette – Modellgüte quadratischer D-optimaler Versuchsplan

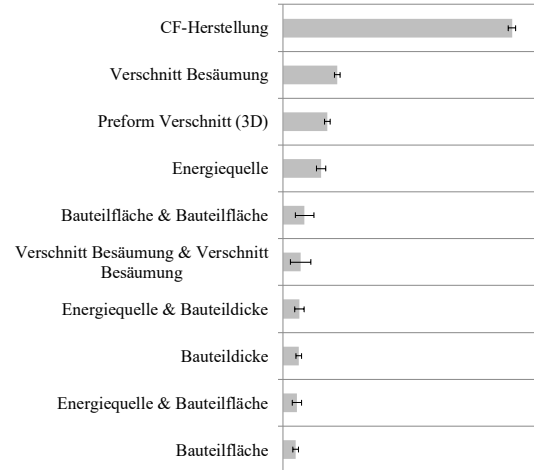
	Transformation	R ²	R ² adj.	Q ²	Condition number	Model terms	DF lack of fit
PED	Power ((Y)**0,428)	0,999	0,998	0,995	5,15038	58	57
ADPe	Power ((Y)**-0,364)	0,992	0,989	0,986	2,46566	26	89
ADPf	Power ((Y)**0,874)	1	0,999	0,996	5,77793	73	42
EP	Power ((Y)**0,4)	1	1	1	9,28478	34	81
ODP	Power ((Y)**0,998)	1	1	1	4,49791	53	62
POCP	None	1	1	1	11,1416	65	50
GWP	Power ((Y)**0,799)	0,999	0,998	0,995	5,76078	72	43
AP	Power ((Y)**0,954)	1	1	1	7,85657	58	57

e Effekte der verschnittarmen Legetechnologien

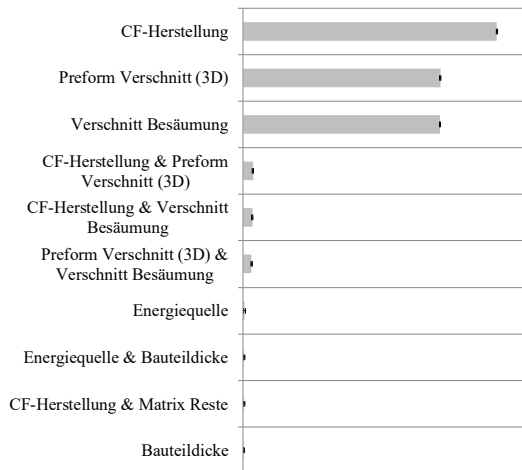
Elementarer Abiotischer Ressourcenverbrauch



Fossiler abiotischer Ressourcenverbrauch



Eutrophierungspotential



Ozonabbaupotential

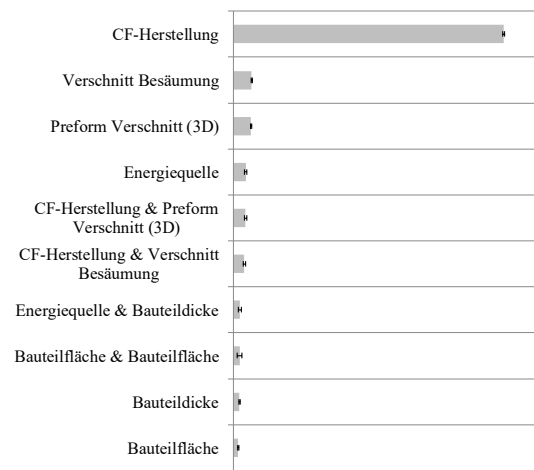
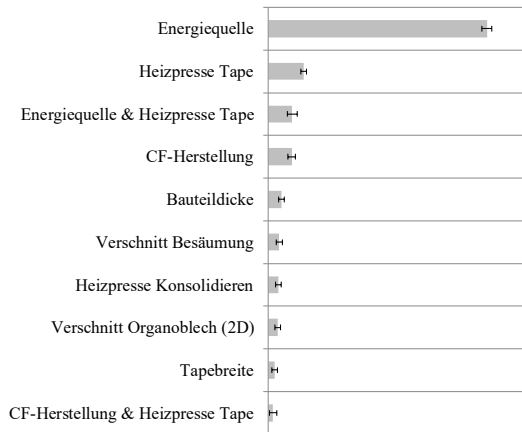


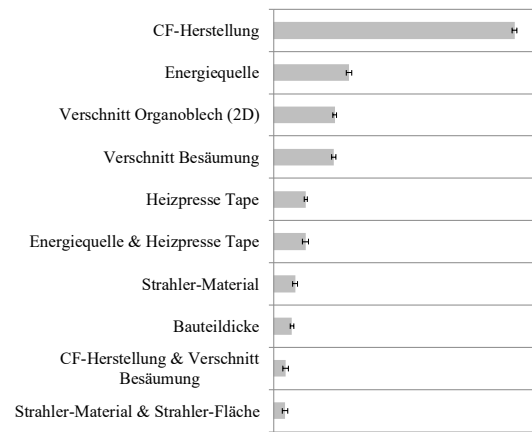


Abb. A-1: Detailanalyse verschnittarmer duroplastischer CFK-Fertigungsprozesskette – Effekte der Produktionsparameter auf die Umweltwirkung

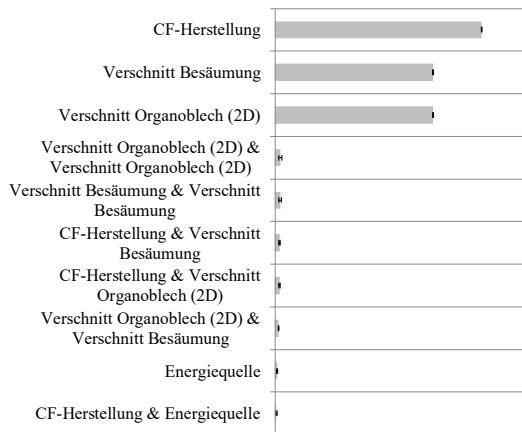
Elementarer abiotischer Ressourcenverbrauch



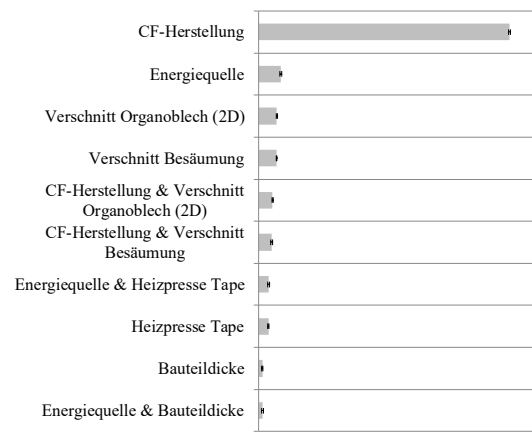
Fossiler abiotischer Ressourcenverbrauch



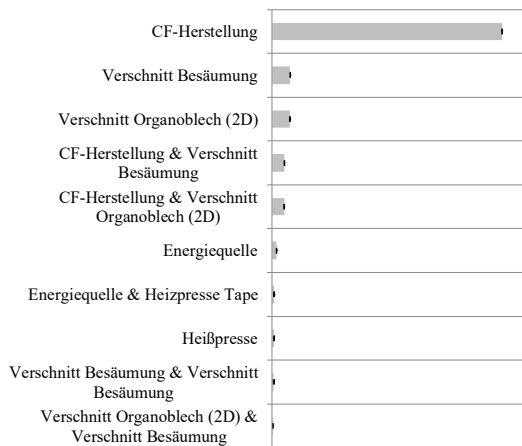
Eutrophierungspotential



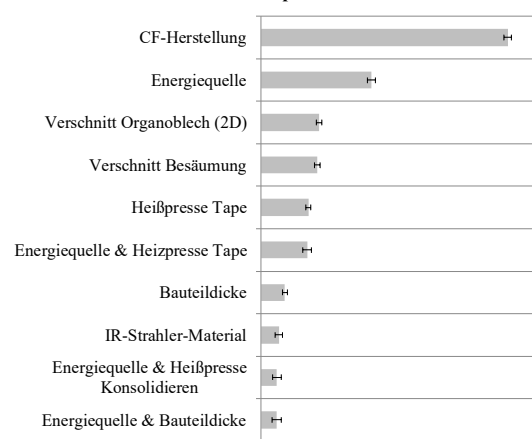
Ozonabbaupotential



Photochemisches Oxidantienbildungspotential



Treibhauspotential



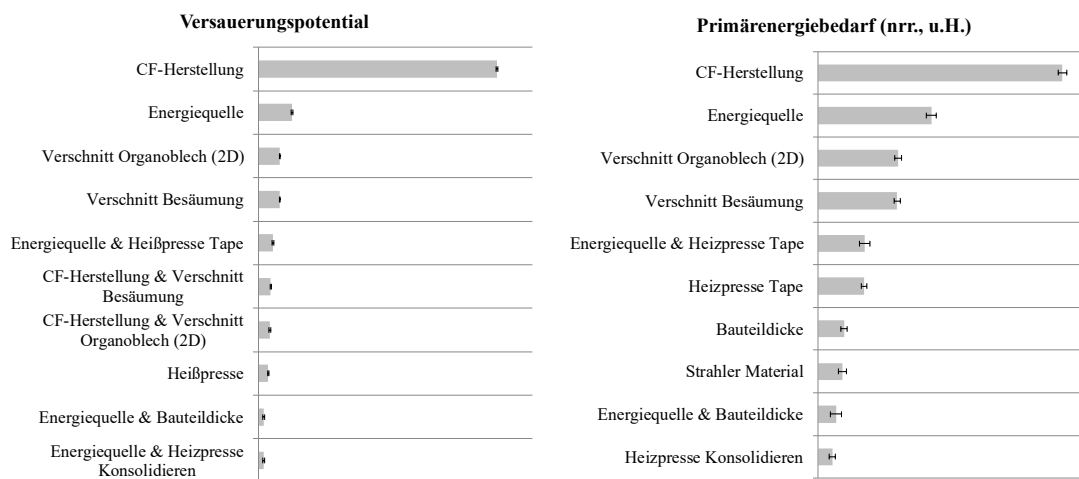


Abb. A-2: Detailanalyse verschnittarmer thermoplastischer CFK-Fertigungsprozesskette – Effekte der Produktionsparameter auf die Umweltwirkung

f Ökologische Priorität

Tab. A-41: Festlegung der ökologischen Priorität nach dem UBA [3]

Ökologische Gefährdung	Distance-to-Target	Spezifischer Beitrag	Ökologische Priorität
A	A	A	sehr groß
A	A	B	sehr groß
A	A	C	groß
A	A	D	groß
A	A	E	groß
A	B	B	groß
A	B	C	groß
A	B	D	groß
A	B	E	mittel
A	C	C	groß
A	C	D	mittel
A	C	E	mittel
A	D	D	mittel
A	D	E	mittel
A	E	E	gering
B	B	B	groß
B	B	C	groß
B	B	D	mittel
B	B	E	mittel
B	C	C	mittel

Ökologische Gefährdung	Distance-to-Target	Spezifischer Beitrag	Ökologische Priorität
B	C	D	mittel
B	C	E	mittel
B	D	D	mittel
B	D	E	gering
B	E	E	gering
C	C	C	mittel
C	C	D	mittel
C	C	E	gering
C	D	D	gering
C	D	E	gering
C	E	E	gering
D	D	D	gering
D	D	E	gering
D	E	E	sehr gering
E	E	E	sehr gering

Tab. A-42: Ökologische Priorität der Wirkungskategorien bei der Carbonfaserherstellung

	Ökologische Gefährdung	Distance-to-Target	Spezifischer Beitrag	Ökologische Priorität
ADPe [kg Sb-Äqv.]	C	B	E	mittel
ADPf [MJ]	C	B	E	mittel
EP [kg Phosphat-Äqv.]	B	B	A	groß
ODP [kg R11-Äqv.]	A	D	E	mittel
POCP [kg Ethen-Äqv.]	D	B	E	gering
GWP 100 Jahre [kg CO ₂ -Äqv.]	A	A	E	groß
AP [kg SO ₂ -Äqv.]	B	B	E	mittel

Tab. A-43: Ökologische Priorität der Wirkungskategorien – SotA duroplastische Fertigungsprozesskette

	Ökologische Gefährdung	Distance-to-Target	Spezifischer Beitrag	Ökologische Priorität
ADPe [kg Sb-Äqv.]	C	B	E	mittel
ADPf [MJ]	C	B	E	mittel
EP [kg Phosphat-Äqv.]	B	B	A	groß
ODP [kg R11-Äqv.]	A	D	E	mittel
POCP [kg Ethen-Äqv.]	D	B	D	mittel
GWP 100 Jahre [kg CO ₂ -Äqv.]	A	A	E	groß
AP [kg SO ₂ -Äqv.]	B	B	E	mittel

Tab. A-44: Ökologische Priorität der Wirkungskategorien – Verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette

	Ökologische Gefährdung	Distance-to-Target	Spezifischer Beitrag	Ökologische Priorität
ADPe [kg Sb-Äqv.]	C	B	E	mittel
ADPf [MJ]	C	B	E	mittel
EP [kg Phosphat-Äqv.]	B	B	A	groß
ODP [kg R11-Äqv.]	A	D	E	mittel
POCP [kg Ethen-Äqv.]	D	B	E	gering
GWP 100 Jahre [kg CO ₂ -Äqv.]	A	A	E	groß
AP [kg SO ₂ -Äqv.]	B	B	E	mittel

Tab. A-45: Ökologische Priorität der Wirkungskategorien – SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette

	Ökologische Gefährdung	Distance-to-Target	Spezifischer Beitrag	Ökologische Priorität
ADPe [kg Sb-Äqv.]	C	B	E	mittel
ADPf [MJ]	C	B	E	mittel
EP [kg Phosphat-Äqv.]	B	B	A	groß
ODP [kg R11-Äqv.]	A	D	E	mittel
POCP [kg Ethen-Äqv.]	D	B	D	mittel
GWP 100 Jahre [kg CO ₂ -Äqv.]	A	A	E	groß
AP [kg SO ₂ -Äqv.]	B	B	E	mittel

Tab. A-46: Ökologische Priorität der Wirkungskategorien – Verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette

	Ökologische Gefährdung	Distance-to-Target	Spezifischer Beitrag	Ökologische Priorität
ADPe [kg Sb-Äqv.]	C	B	E	mittel
ADPf [MJ]	C	B	E	mittel
EP [kg Phosphat-Äqv.]	B	B	A	groß
ODP [kg R11-Äqv.]	A	D	E	mittel
POCP [kg Ethen-Äqv.]	D	B	E	gering
GWP 100 Jahre [kg CO ₂ -Äqv.]	A	A	E	groß
AP [kg SO ₂ -Äqv.]	B	B	E	mittel

g Vergleich Umweltwirkungen Vorhersagemodell und Ökobilanz-Modell

Tab. A- 47: Carbonfaserherstellung – Vergleich Vorhersage- (MODDE®) und Ökobilanz-Modell (GaBi)

	Minimum			Mittel			Maximum		
	MODDE®	GaBi	Delta	MODDE®	GaBi	Delta	MODDE®	GaBi	Delta
PED	326,03	328	-0,60%	485,82	484	0,38%	551,10	551	0,02%
ADPe	8,25E-06	8,30E-06	-0,60%	7,28E-06	7,28E-06	0,01%	5,43E-06	5,43E-06	0,04%
ADPpf	302,66	310	-2,37%	408,47	404	1,11%	530,67	530	0,13%
EP	5,61	5,61	-0,03%	6,03	6,04	-0,07%	6,45	6,45	-0,01%
ODP	1,11E-10	1,13E-10	-1,73%	5,25E-10	5,08E-10	3,39%	2,34E-10	2,35E-10	-0,48%
POCP	0,0028	0,0029	-1,74%	-0,14	-0,135	0,14%	-0,16	-0,17	-0,09%
GWP	17,43	17,4	0,18%	26,53	26,4	0,51%	33,83	33,8	0,09%
AP	0,029	0,030	-3,65%	0,32	0,32	0,24%	0,41	0,41	-0,14%

Tab. A- 48: SotA duroplastische Fertigungsprozesskette – Vergleich Vorhersage- (MODDE®) und Ökobilanz-Modell (GaBi)

	Minimum			Mittel			Maximum		
	MODDE®	GaBi	Delta	MODDE®	GaBi	Delta	MODDE®	GaBi	Delta
PED	250,2	249	0,48%	546,735	515	6,16%	764,89	785	-2,56%
ADPe	1,83E-05	1,80E-05	1,81%	2,30E-05	2,31E-05	-0,53%	2,56E-05	2,75E-05	-6,78%
ADPpf	235,65	234	0,70%	462,131	433	6,73%	713,90	725	-1,53%
EP	3,38	3,38	0,09%	5,08	5,07	0,22%	6,70	6,76	-0,84%
ODP	6,99E-11	6,85E-11	2,03%	4,50E-10	4,42E-10	1,89%	2,79E-10	2,90E-10	-3,84%
POCP	0,00093	0,00262	-64,47%	-0,111229	-0,112	-0,69%	-0,17	-0,17	-1,81%
GWP	14,07	13,9	1,22%	32,22	29,9	7,77%	50,37	50,9	-1,04%
AP	0,028	0,0267	3,44%	0,286	0,286	-0,15%	0,44	0,46	-2,41%

Tab. A- 49: Verschnittarme duroplastische Fertigungsprozesskette – Vergleich Vorhersage- (MODDE®) und Ökobilanz-Modell (GaBi)

	Minimum			Mittel			Maximum		
	MODDE®	GaBi	Delta	MODDE®	GaBi	Delta	MODDE®	GaBi	Delta
PED	256,03	252	1,60%	469,28	452	3,82%	652,05	625	4,33%
ADPe	1,84E-05	1,84E-05	-0,20%	2,21E-05	2,19E-05	0,65%	2,55E-05	2,58E-05	-0,93%
ADPpf	243,08	238	2,14%	390,50	379	3,03%	584,62	571	2,39%
EP	3,44	3,44	-0,04%	4,15	4,15	0,02%	4,88	4,88	0,01%
ODP	6,87E-11	6,90E-11	-0,36%	3,72E-10	3,67E-10	1,39%	2,17E-10	2,21E-10	-1,60%

	Minimum			Mittel			Maximum		
POCP	0,0024	0,0027	-8,20%	-0,091	-0,091	0,09%	-0,12	-0,12	0,15%
GWP	14,50	14,1	2,85%	28,34	26,9	5,36%	43,05	41,2	4,48%
AP	0,029	0,027	5,53%	0,24	0,24	0,76%	0,34	0,34	0,49%

Tab. A-50: SotA thermoplastische Fertigungsprozesskette – Vergleich Vorhersage- (MODDE®) und Ökobilanz-Modell (GaBi)

	Minimum			Mittel			Maximum		
	MODDE®	GaBi	Delta	MODDE®	GaBi	Delta	MODDE®	GaBi	Delta
PED	269,42	268	0,53%	1132,62	1160	-2,36%	2093,59	2200	-4,84%
ADPe	6,88E-06	6,76E-06	1,73%	3,07E-05	3,07E-05	0,01%	6,06E-05	6,68E-05	-9,21%
ADPf	255	256	-0,41%	992,24	996	-0,38%	1657,66	1840	-9,91%
EP	3,42	3,42	0,02%	5,35	5,34	0,14%	7,31	7,31	-0,02%
ODP	7,09E-11	7,05E-11	0,60%	3,54E-10	3,78E-10	-6,30%	5,55E-10	7,01E-10	-20,80%
POCP	0,0011	0,0023	-51,97%	-0,13	-0,13	2,13%	-0,18	-0,173	1,72%
GWP	14,63	14,5	0,90%	82,58	81,2	1,69%	149,69	160	-6,44%

Tab. A-51: Verschnittarme thermoplastische Fertigungsprozesskette – Vergleich Vorhersage- (MODDE®) und Ökobilanz-Modell (GaBi)

	Minimum			Mittel			Maximum		
	MODDE®	GaBi	Delta	MODDE®	GaBi	Delta	MODDE®	GaBi	Delta
PED	264,46	268	-1,32%	511,67	496	3,16%	720,55	733	-1,70%
ADPe	6,17E-06	6,94E-06	-11,04%	1,01E-05	9,35E-06	8,00%	1,39E-05	1,50E-05	-7,26%
ADPf	253,97	256	-0,79%	437,506	424	3,19%	646,58	661	-2,18%
EP	3,42	3,42	0,04%	4,13	4,13	0,03%	4,86	4,86	-0,02%
ODP	7,12E-11	7,05E-11	0,96%	3,75E-10	3,71E-10	1,14%	2,42E-10	2,49E-10	-2,79%
POCP	0,0022	0,0023	-4,20%	-0,091	-0,091	-0,32%	-0,12	-0,121	-0,21%
GWP	14,28	14,5	-1,53%	30,38	29,1	4,39%	47,23	48,6	-2,83%
AP	0,023	0,022	1,86%	0,23	0,23	0,38%	0,34	0,34	-0,89%

B Veröffentlichungen

Zeitschriftenartikel

- [P1] Hohmann A., et al.: *Energie- und Umwelteffizienz von CFK-Fertigungsprozessketten - Quantifizierung unterschiedlicher Optimierungsmaßnahmen*. Jahressmagazin Kunststofftechnik 2017 Seite 36-39, 2017.
- [P2] Hohmann A., et al.: *Resource efficiency and environmental impact of fiber reinforced plastic processing technologies*. Springer Verlag Production Engineering 1-13, 2018.

Konferenzbeiträge

- [K1] Hohmann A.: *Energieeffizienz in der Wärmetechnik*. Mikrowellensymposium, Reiskirchen, 2013.
- [K2] Hohmann A., Albrecht S.: *Projektvorstellung MAI Enviro*. AG Umweltaspekte, Augsburg, 2014.
- [K3] Arikan E., et al.: *Energy efficiency and ecological benefits of a self-heated CFRP tool designed for resin transfer moulding*. ECCM17 Conference Proceedings, München, 2016.
- [K4] Wehner D., et al.: *Effect of different technological and energy supply related measures on the primary energy demand of CFRP production*. ECCM17 Conference Proceedings, München, 2016.
- [K5] Hohmann A.: *Understanding Effect Of Different Technological Aspects And Renewable Energy Resources On The Primary Energy Demand Of CFRP-structures*. Global Automotive Lightweight Materials, Birmingham, 2016.
- [K6] Hohmann A.: *The Energy Efficiency of Different CFRP-Process Chains and the Resulting Environmental Impact*. Advanced lightweight materials and vehicles, Berlin, 2016.
- [K7] Hohmann A.: *Energieeffiziente CFK-Fertigungsprozessketten und deren ökologischer Fußabdruck*. 11. Bayerische Barbara Tagung UTG, München, 2016.
- [K8] Drechsler K., Hohmann A.: *MAI Enviro Energieeffizienz entlang der Werkstoff- und Fertigungsprozesskette von Carbon Composites*. 2. WAK Symposium, Fürth, 2017.
- [K9] Hohmann A., Albrecht S.: *Gestaltung und Optimierung von CFK-Prozessketten mittels LCA*. Fachtagung Composite Recycling & LCA, Stuttgart, 2017
- [K10] Schüppel D., et al.: *MAI Enviro Energieeffizienz entlang der Werkstoff- und Fertigungsprozesskette von Carbon Composites*. Ergebniskonferenz MAI Carbon, Augsburg, 2017.

- [K11] Hohmann A., et al.: *Bewertung unterschiedlicher Faserverbundtechnologien hinsichtlich der Material- und Energieeffizienz*. Green Factory Abschlusskolloquium, Augsburg, 2017
- [K12] Hohmann A., Ilg R., et al.: *Energieeffizienz und Umweltaspekte in der Fertigung von CFK-Bauteilen*. WerkstoffplusAuto, Stuttgart 2018.

Buchbeiträge

- [B1] Hohmann A., Schwab B., Wehner D., Albrecht S., Ilg R., Schüppel D., von Reden T.: *MAI Enviro - Vorstudie zur Lebenszyklusanalyse mit ökobilanzieller Bewertung relevanter Fertigungsprozessketten*. Fraunhofer Verlag, Stuttgart, 2015.
- [B2] Schlimbach J.: *Prozesskette zur ressourceneffizienten Composite-Herstellung für die E-Mobilität – PRESCHE*. VDI Fortschritt-Berichte Reihe 5 Nr. 757, VDI Verlag, Düsseldorf, 2015.
- [B3] Hohmann et al.: *Recommendations for resource efficient and environmentally responsible manufacturing of CFRP products*. Carbon Composites e.V., Juni 2018.

C Betreute studentische Arbeiten

Im Rahmen der Tätigkeit am Fraunhofer IGCV wurde die Betreuung der nachfolgend aufgeführten studentischen Arbeiten unterstützt.

- [S1] Bruchmüller P.: *Untersuchung der kosten- und energieeffizienten Quickstep-Technologie hinsichtlich ihrer Anwendung im Bereich Hot Drape Forming*. Diplomarbeit, Institut für Flugzeugbau, Universität Stuttgart, 2011.
- [S2] Chaloupka A.: *Ressourceneffiziente Ermittlung der Aktivierungstemperatur bei Bindergarnen mittels physikalischer Messmethoden*. Praktikum, Lehrstuhl für Experimentalphysik II, Universität Augsburg, 2012.
- [S3] Herzog T.: *Physikalische Interpretation unterschiedlicher Strömungssimulationen in einem industriellen Kammertrockner*. Masterarbeit, Lehrstuhl für Experimentalphysik II, Universität Augsburg, 2013.
- [S4] Hofbauer F.: *Konstruktion und Inbetriebnahme eines Einbausystems zum Recyceln von CFK-Bauteilen mittels Mikrowellentechnik*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, TU München, 2014.
- [S5] Bissinger P.: *Energetische Charakterisierung der Fiberforge-Technologie*. Bachelorarbeit, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Hochschule Augsburg, 2014.
- [S6] Kroo E.: *Modellierung von unterschiedlichen Anlagen- und Prozessparameter zur Berechnung des Energieverbrauchs eines Kammertrockners*. Bachelorarbeit, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Hochschule Augsburg, 2014.
- [S7] Reiter M.: *Ökobilanzierung von Verbrennungsanlagen*. Praktikum, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Hochschule Augsburg, 2014.
- [S8] Listl M.: *Setting up and balancing of competitive production lines for carbon fiber composites manufacturing*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Carbon Composites, TUM, 2015.
- [S9] Haack L.: *Überprüfung und Optimierung von Wirkprinzipien für ein Fiber Placement Verfahren*. Bachelorarbeit, Fachbereich VIII – Maschinenbau, Veranstaltungstechnik, Verfahrenstechnik, Beuth Hochschule für Technik Berlin, 2015.
- [S10] Dörnen C.: *Charakterisierung eines Infrarot-Heizstrahlersystems*. Praktikum, Institut für Physik, Universität Augsburg, 2015.

- [S11] Truong K.: *Energieeffizienzanalyse unterschiedlicher Hilfsprozesse*. Praktikum, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Hochschule Augsburg, 2016.
- [S12] Laufenböck M.: *Nachhaltigkeitsbewertung des Nassvliesverfahrens zur Herstellung textiler Carbonfaserhalbzeuge*. Bachelorarbeit, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Hochschule Augsburg, 2017.
- [S13] Hübner M.: *Bewertung von Nassvliesen aus rezyklierten Carbonfasern - ökobilanzieller Vergleich thermoplastischer und duroplastischer Fertigungsprozessketten*. Bachelorarbeit, TU München, 2017.
- [S14] Voring B.: *Ausarbeitung eines Automatisierungskonzepts für eine Pilotanlage zur endkonturnahen und kostengünstigen Herstellung von 2D-Faserhalbzeugen*. Masterarbeit, Fakultät für Maschinenbau und Verfahrenstechnik, Hochschule Augsburg, 2017.
- [S15] Kugler M.: *Kostenprognosemodell zur Wirtschaftlichkeitsanalyse von CFK-Fertigungsprozessketten*. Masterarbeit, Institut für Materials Resource Management, Universität Augsburg, 2017.
- [S16] Zeiser R.: *Prozessanalyse Automated Fiber Placement*. Bachelorarbeit, Lehrstuhl für Softwaretechnik, Universität Augsburg, 2018.
- [S17] Krug F.: *Nachhaltigkeitsbewertung von Fertigungsprozessketten zur Herstellung von Luftfahrtstrukturen*. Masterarbeit, Fakultät Ingenieurwissenschaften, Hochschule für angewandte Wissenschaften Hof, 2018.

Teile des Inhalts folgender Arbeiten haben in die vorliegende Dissertationsschrift Eingang gefunden: [S5], [S10], [S11], [S15].