

Michael Vorhof

Systematische Entwicklung, Beschreibung und Anwendung einer
neuen Fachbildung für die Herstellung integraler Mehrlagen- und
Abstandsgewebestrukturen für Faserverbundbauweisen

Michael Vorhof

**Systematische Entwicklung, Beschreibung
und Anwendung einer neuen Fachbildung
für die Herstellung integraler Mehrlagen-
und Abstandsgewebestrukturen für
Faserverbundbauweisen**

TUD*press*
2024

Bibliografische Information der Deutschen Nationalbibliothek
Die Deutsche Nationalbibliothek verzeichnet diese Publikation in der
Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind
im Internet über <http://dnb.d-nb.de> abrufbar.

Bibliographic information published by the Deutsche Nationalbibliothek
The Deutsche Nationalbibliothek lists this publication in the Deutsche
Nationalbibliografie; detailed bibliographic data are available in the
Internet at <http://dnb.d-nb.de>.

ISBN 978-3-95908-729-2

© 2024 Dresden und München
Thelem Universitätsverlag & Buchhandlung GmbH & Co. KG
<http://www.thelem.de>

TUDpress ist ein Imprint von Thelem
Alle Rechte vorbehalten. All rights reserved.
Gesetzt vom Autor.
Printed in Germany.

**Systematische Entwicklung, Beschreibung und Anwendung einer
neuen Fachbildung für die Herstellung integraler Mehrlagen- und
Abstandsgewebestrukturen für Faserverbundbauweisen**

der Fakultät Maschinenwesen
der Technischen Universität Dresden

zur

Erlangung des akademischen Grades

Doktoringenieur (Dr.-Ing.)

angenommene Dissertation

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Michael Vorhof

geboren am 08.05.1990 in Leipzig

Tag der Einreichung: 30.08.2023

Tag der Verteidigung: 25.03.2024

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. Dipl.-Wirt. Ing. Chokri Cherif
Prof. Dr.-Ing. Kai Klopp (RWTH Aachen)

Vorsitzender der Prüfungskommission:

Prof. Dr.-Ing. Jens-Peter Majschat

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis

1. Einleitung.....	8
2. Stand der Technik	11
2.1. Leichtbau mit textilverstärkten Faser-Kunststoff-Verbunden.....	11
2.1.1. Strategien und Designprinzipien im Leichtbau.....	11
2.1.2. Leichtbau mit Faser-Kunststoff-Verbunden.....	13
2.2. Textilverstärkte, integrale Faser-Kunststoff-Verbunde	18
2.2.1. Textile Verstärkungsstrukturen für das direkte Preforming	18
2.2.2. Ausgewählte textile Verstärkungshalbzeuge	19
2.3. Potenziale textiler Halbzeuge in FKV-Anwendungen.....	22
2.3.1. Ausgewählte Anwendungen für textilverstärkte integrale FKV	22
2.3.2. Bewertung der textiler Halbzeugvarianten	26
2.4. Grundlagen der Webtechnologie	28
2.4.1. Grundlagen der Beschreibung von Geweben	28
2.4.2. Fertigungstechnologische Grundlagen der Webtechnik.....	31
2.5. Webtechnologische Ansätze und Forschungsbedarf	33
2.5.1. Webtechnologische Ansätze für die Herstellung integraler FKV	33
2.5.2. Abgeleiteter Forschungsbedarf.....	37
3. Zielsetzung und Forschungsprogramm.....	39
4. Konstruktiv-technologische Erweiterung des Webprozesses	42
4.1. Ausgangssituation und technologischer Ansatz.....	42
4.2. Rahmenbedingungen und Bindungskonvertierung	49
4.2.1. Technologische Rahmenbedingungen	49
4.2.2. Algorithmus zur Bindungskonvertierung	57
4.3. Erweiterung für schussabgebundene Bindungen.....	63
4.4. Prototypische Umsetzung und ausgewählte Funktionsmuster.....	67
4.5. Bewertung der Erweiterung und der Methodik.....	69
5. Fachwerkabstandsgewebe für integrale Leichtbaupaneele	70
5.1. Motivation	70
5.2. Vorbetrachtungen und Strukturbeschreibung	73
5.2.1. Vorbetrachtungen	73
5.2.2. Strukturbeschreibung und Gewebespezifikation.....	74
5.3. Fachwerkabstandsgewebe mit Schuss- und Kettpolfäden.....	75
5.3.1. Schusspolfäden auf Basis von Thermoplast-Tapes	75

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

5.3.2. Maschinenkonzept für Fachwerkgewebe.....	78
5.4. Experimentelle Umsetzung und Charakterisierung	83
5.4.1. Fertigung der Mehrflächengewebe und Leichtbaupaneele	83
5.4.2. Faserverbundspezifische Charakterisierung.....	88
5.5. Bewertung der entwickelten Fachwerkabstandsgewebe	108
6. Zellulare Gewebe für integrale adaptive FKV	110
6.1. Ausgangssituation und technologischer Ansatz.....	110
6.1.1. Integrales Baugruppendesign für flexible Mechanismen	110
6.1.2. Webtechnologischer Ansatz für integrales Baugruppendesign	112
6.2. Integrales Design auf Basis der neuen Fachbildung.....	115
6.2.1. Baugruppenintegration durch integrales Preformdesign.....	115
6.2.2. Strukturbeschreibung der Gewebepreform	117
6.3. Ermittlung von material- und prozessspezifischen Vorgaben	121
6.3.1. Materialien und Probenherstellung	121
6.3.2. Diskussion und Ergebnisbewertung.....	129
6.4. Experimentelle Umsetzung	132
6.4.1. Bauteildesign und Preformgeometrie.....	132
6.4.2. Bindungsentwicklung, Gewebe- und Bauteilfertigung.....	134
6.5. Ergebnisbewertung der Gewebe und Strukturentwicklung	139
7. Zusammenfassung und Ausblick	140
8. Abbildungsverzeichnis	144
9. Tabellenverzeichnis	147
10. Literaturverzeichnis	148

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
2D	zweidimensional
3D	dreidimensional
AG	Aktiengesellschaft
ASTM	American Society for Testing and Materials
bzw.	Beziehungsweise
CC BY-SA 3.0	Creative Commons: Namensnennung, Weitergabe unter gleichen Bedingungen
CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CO ₂	Kohlenstoffdioxid
d. h.	das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
E-Modul	Elastizitätsmodul
EN	Europäische Norm
EP	Epoxyd
et al.	und weitere
Fa.	Firma
FDM	Schmelzschichtung
FE	Finite Elemente
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FVG	Faservolumengehalt
FWG	Fachwerkgewebe
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaserverstärkter Kunststoff
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
i. A.	im Allgemeinen
ISO	Internationale Organisation für Normung
ITM	Institut für Textilmaschinen und Textile Hochleistungswerkstofftechnik
KG	Kommanditgesellschaft
LR	Litzenreihe
LTL	Layer to Layer
PA	Polyamid
PACS	<i>Pressure actuated cellular structure</i> , deutsch: Druckaktuierter zelluläre Struktur
PAN	Polyacrylnitril
PET	Polyethylenterephthalat
PL	Leinwand
PLA	Polymilchsäure

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Abkürzung	Beschreibung
PP	Polypropylen
Ref.	Referenz
SiO ₂	Siliziumdioxid
SLM	Selektives Laserschmelzen
TtT	Through the Thickness
TU	Technische Universität
u. ä.	und ähnliches
UD	unidimensional
UP	ungesättigtes Polyester
v. a.	vor allem
V1	Variante 1
V2	Variante 2
VE	Vinylester
z. B.	zum Beispiel

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
φ	-	Faservolumengehalt
ψ	-	Fasermassegehalt
ρ_M	g/cm ³	Dichte der Matrix
ρ_F	g/cm ³	Dichte der Faser
ρ_{FKV}	g/cm ³	Dichte des Faser-Kunststoff-Verbundes
E_M	kN/mm ²	Elastizitätsmodul der Matrix
E_F	kN/mm ²	Elastizitätsmodul der Faser
E_{II}	kN/mm ²	Elastizitätsmodul des FKV parallel zur Faserverstärkung
R_{II}^+	N/mm ²	Basiszugfestigkeit
$R_{II,F}$	N/mm ²	Längszugfestigkeit der Faserverstärkung
κ	mm ⁻¹	Krümmung
I	mm ⁴	Flächenträgheitsmoment
b	mm	Breite des Biegebalkenquerschnittes
t	mm	Höhe des Biegebalkenquerschnittes
d_K	cm ⁻¹	Kettfadendichte
d_S	cm ⁻¹	Schussfadendichte
t_K	cm	Kettfadenteilung

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
t_S	cm	Schussfadenteilung
d_W	-	Gewebedicthe
p_W	-	Besetzungsfaktor
$b_{FK,\emptyset}$	mm	Fasersubstanzdurchmesser des Kettfadens
$b_{FS,\emptyset}$	mm	Fasersubstanzdurchmesser des Schussfadens
T_t	$g/(10^3 \text{ m}) = \text{tex}$	Feinheit
b_L	mm	Litzenbreite
b_F	mm	Fadenbreite
t_{KL}	mm	Dicke der Kettfaden-Litzen-Ebene
b_M	mm	Maillonbreite
b_D	mm	Drahtstärke
α_L	grad	Verdrillungswinkel der Litze
b_{FK}	mm	Kettfadenbreite bei elliptischem Garnquerschnitt
φ_G	-	Kompaktheit des Garnes
a_F	mm	Nebenachse im elliptischen Fadenquerschnitt
a_{FK}	mm	Nebenachse im elliptischen Kettfadenquerschnitt
ρ_G	g/cm^3	Dichte der Garnsubstanz
$G_{WK,max}$	g/mm^2	Maximale Gewebeflächenmasse der Kettfäden
$d_{W,max}$	-	Maximale Gewebedicthe
n_C	-	Anzahl der Variationen an Litzenhubzuständen
n_L	-	Anzahl der Litzen innerhalb einer Litzenspalte
L_i	-	Eingabevariable
f	-	Binäre Schaltfunktion
n_C^+	-	Anzahl der technologisch relevanten Litzenhubzustände
A	-	Bindungsmatrix A
B	-	Bindungsmatrix B
C	-	Bindungsmatrix C
n_A	-	Spaltenanzahl der Matrix A
n_B	-	Spaltenanzahl der Matrix B

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
n_C	-	Spaltenanzahl der Matrix C
m_A	-	Zeilenanzahl der Matrix A
m_B	-	Zeilenanzahl der Matrix B
m_C	-	Zeilenanzahl der Matrix C
T_{n_A}	-	Tauschmatrix zur Matrix A
$c_{j,k}$	-	Element der Matrix C
$D_{j,k}$	-	Spaltenvektor D
$m_{D_{j,k}}$	-	Zeilenanzahl des Spaltenvektors D
$d_{m_{D_{j,k}}}$	-	Element des Spaltenvektors D
$n_{K,F}$	-	Anzahl der codierten Kettfäden
B_K	-	Bindungsmatrix des Kettfadenverlaufs
B_S	-	Bindungsmatrix des Schussfadenverlaufs
j	-	Zählvariable der Matrixspalten
k	-	Zählvariable der Matrixzeilen
$b_{j,k}^K$	-	Element der Bindungsmatrix B_K
n_{KP}	-	Verhältnis von Kettfaden- zu Kettpoldichte
d_P	cm^{-1}	Poldichte
d_{SP}	cm^{-1}	Schusspoldichte
t_P	mm	Polabstand
t_{SP}	mm	Schusspolabstand
t_C	mm	Wandstärke im Gelenkbereich
G_W	g/mm^2	Flächenmasse des Gewebe
G_C	g/mm^2	Flächenmasse des Gewebe im Gelenkbereich
l_W	-	Anzahl der Gewebelagen
l		Nummer der Gewebelage
$t_{K,L}$	mm	Kettfadenteilung in der jeweiligen Gewebelage l
$t_{S,L}$	mm	Schussfadenteilung in der jeweiligen Gewebelage l
b_{sub}	mm	Breite des Ersatzfadenquerschnittes
h_F	mm	Höhe des Ersatzfadenquerschnittes
$n_{F,sub}$	-	Anzahl der Ersatzquerschnitte

Abkürzungs- und Formelverzeichnis

Formelzeichen	Einheit	Beschreibung
$d_{K,sub}$	mm	Breite des Ersatzkettfadenquerschnittes
$d_{S,sub}$	mm	Breite des Ersatzschussfadenquerschnittes
$n_{K,sub}$	-	Anzahl der Ersatzkettfadenquerschnitte
$n_{S,sub}$	-	Anzahl der Ersatzschussfadenquerschnitte
$T_{t,K,sub}$	$g/(10^3 \text{ m}) = \text{tex}$	Feinheit des Ersatzkettfadens
$T_{t,S,sub}$	$g/(10^3 \text{ m}) = \text{tex}$	Feinheit des Ersatzschussfadens
$T_{t,K}$	$g/(10^3 \text{ m}) = \text{tex}$	Kettfadenfeinheit
$T_{t,S}$	$g/(10^3 \text{ m}) = \text{tex}$	Schussfadenfeinheit
$a_{K,sub}$	mm	Teilung zwischen den Ersatzkettfäden
$a_{S,sub}$	mm	Teilung zwischen den Ersatzschussfäden
$p_{W,sub}$	-	Ersatzbesetzungs faktor

1. Einleitung

Unsere Gesellschaft und die Art und Weise wie wir leben stehen großen Herausforderungen gegenüber. Einerseits wirkt sich der Klimawandel von Jahr zu Jahr stärker aus und gleichzeitig kann die Verfügbarkeit natürlicher Ressourcen – egal ob an Rohstoffen oder Energie – längst nicht mehr dem Verbrauch durch die immer noch wachsende Weltbevölkerung mit halten. Es ist ein Umdenken erforderlich, sowohl im Hinblick auf eine klimaneutrale Entwicklung, als auch hinsichtlich einer nachhaltige Ressourcennutzung und Wertschöpfung in allen Lebensbereichen. Konkret festgemacht werden kann dies anhand der Nachhaltigkeitsziele der UN [1], den *Social Development Goals*, anhand derer die Entwicklung unserer Gesellschaft gemessen werden kann.

Daraus ergeben sich verschiedene Zielstellungen, welche vorteilhafterweise sich positiv verstärkenden Wechselwirkungen unterliegen. Beispielsweise setzen Innovationen in der Materialentwicklung wichtige Impulse in der Bewältigung drängender Herausforderungen wie dem Klimawandel und der Endlichkeit von Ressourcen und sind gleichzeitig die Grundlage für eine nachhaltige und zukunftsfähige Industrie liefern. Das kann exemplarisch anhand materialbasierten Leichtbautechnologien festgemacht werden, die unter der Maxime der Reduzierung der Eigenmasse technischer Systeme und den nachhaltigen Ressourceneinsatz in der Wertschöpfung entwickelt werden, aber auch zum deutlichen reduzierten Energie- und Ressourcenverbrauch in der Produktnutzung, z. B. in der Mobilität oder dem Maschinen- und Anlagenbau [2, 3].

Inspirationsquelle für solche Innovationen sind Vorbilder der Natur, die aufzeigen, wie durch gewachsene, faserbasierte und heterogene Strukturen höchste Effizienz und Funktionserfüllung bei geringstem Materialeinsatz erzielt werden können. Neben stetig verbesserten Metalllegierungen und keramischen Werkstoffen sind es vor allem Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV), die die Übertragung natürlich inspirierter Strukturen in Leichtbauanwendungen ermöglichen [4]. Sie bestehen aus Verstärkungsfasern, die in eine Kunststoff-Matrix eingebettet sind und sie erzielen höhere spezifische Steifigkeiten und Festigkeiten als beispielsweise metallische Konstruktionswerkstoffe. Allerdings bieten metallische Materialien ein Höchstmaß an Flexibilität im Hinblick auf Fügevorgänge mit anderen Halbzeugen, wie z. B. Kleb-, Schraub- und Schweißverbindungen. Diese

sind hingegen bei FKV nur eingeschränkt nutzbar und die auf diesen Fügeprozessen basierende differentielle Bauweise ist für die Herstellung von FKV-Bauteilen ungeeignet. Auch hier können natürlich vorkommende Strukturen zum Vorbild genommen werden. Fügeverbindungen kommen hier in der Regel nicht vor und stattdessen sind Pflanzen wie Tiere zwar heterogen aufgebaut, aber an in einer in sich geschlossenen Struktur gewachsen. Das technische Pendant zu dieser natürlichen Art der Strukturierung ist das integrale Design. FKV-Komponenten werden daher idealerweise in einem Stück und mit einer durchgehenden Faserverstärkung hergestellt, was maximalen Leichtbau und in der Folge ein Höchstmaß an Ressourcen- und Energieeffizienz in der Bauteilfertigung verspricht.

Die strukturelle Komposition von FKV-Strukturen benötigt eine gezielt Einstellbarkeit der Fasern in Position und Verlauf, da diese die Bauteileigenschaften prägen. Analog zu natürlichen, schichtweisen Wachstumsprozessen, werden für den schichtweisen Aufbau der Verstärkungsfaserverstruktur eines FKV überwiegend textile Flächengebilde wie Gewebe, Gestricke und Gewirke aus den erforderlichen Verstärkungsfasern genutzt. Sie werden entsprechend der Bauteilgeometrie und den einzustellenden FKV-Eigenschaften lagenweise zu einer Faserstruktur, der Preform, sequentiell zusammengestellt und mit dem Matrixmaterial versehen [5]. Darüber hinaus gibt es in Anwendung und Forschung zunehmend die Bestrebung, die Bauteilgeometrie und die Anordnung der Faserverstärkung direkt innerhalb in einer in sich geschlossenen textilen Struktur abzubilden. Übergänge zwischen den textilen Halbzeugen und zusätzlichen Materialien wie Schaum- oder Wabenkernen (Sandwichbauweise), die immer eine potenzielle Schwachstelle im Verbund darstellen, werden eliminiert und darüber hinaus der Aufwand in der FKV-Fertigung für die sequentielle Preformfertigung eingespart [6].

Die Webtechnik verfügt im Vergleich mit anderen textilen Flächenbildungsverfahren über ein besonders hohes Potenzial für die effiziente Herstellung komplexer Verstärkungshalbzeuge mit großer struktureller Vielfalt. Konventionelle Webanlagen für die Herstellung gewebter Verstärkungshalbzeug sind allerdings durch die derzeitige Art und Weise der Materialführung und Gewebeausprägung in der Fachbildung im Hinblick auf arbiträr komplexe Strukturen deutlich eingeschränkt. Insbesondere die Steigerung der Fadendichte für mehrlagige Strukturen führt zwangsläufig

zu massiven Schäden der verarbeiteten Verstärkungsfasern und destabilisiert den Webprozess, z. B. durch Fadenbrüche und zunehmende Faserbruchstücke in der Gewebebildungszone.

Das Ziel der Arbeit ist daher die Entwicklung und Beschreibung eines neuen Konzeptes zur Fachbildung in konventionellen Webanlagen, das es ermöglicht, diese Hindernisse zu beseitigen. Hierzu ist die Schädigung der Fasern in der Verarbeitung deutlich zu reduzieren und gleichzeitig die Voraussetzungen für eine skalierbaren Lagenaufbau für mehrlagige Gewebe, Abstandsgewebe und zellulare Gewebe zu schaffen. Weiterhin wird anhand von konkreten Anwendungen für Leichtbaupaneele als weitverbreitete Bauweise sowie anhand neuartiger, adaptiver druckaktuierter zellularer Strukturen das dadurch erschlossene Potenzial dargelegt.

Mit dem Verfahrensnachweis für die Verwendung der neuen Fachbildung wird damit ein wichtiger Beitrag zur technologischen Weiterentwicklung der Webtechnik und die breite Nutzung gewebter Verstärkungshalzeuge in FKV-Anwendungen geleistet. Die Umsetzung integraler, funktionsintegrierender Bauweisen für einen nachhaltigen Leichtbau wird dadurch gestärkt und die Materialeffizienz in der integralen FKV-Fertigung durch faserschonende Verarbeitungsbedingungen signifikant verbessert.

2. Stand der Technik

2.1. Leichtbau mit textilverstärkten Faser-Kunststoff-Verbunden

2.1.1. Strategien und Designprinzipien im Leichtbau

Der Leichtbau ist eine Entwicklungsstrategie für mechanische Systeme und hat zum Ziel, deren Eigenmasse unter gegebenen mechanischen Randbedingungen und bei einer geforderten Lebensdauer und Zuverlässigkeit zu minimieren. Vorrangig ermöglicht der Leichtbau dadurch die Steigerung der Effizienz im Betrieb solcher Systeme infolge eines reduzierten Energie- und Ressourcenaufwands in der Nutzung, aber auch in deren Fertigung und der Verwertung nach Nutzungsende. Definitionsgemäß sind damit vielfältig und miteinander wechselwirkende Aufgaben in Bezug auf Bauweise, Werkstoffauswahl, Herstellungstechnologie und Fügetechnik verbunden [4]. Die Lösung dieser Aufgaben unterliegt einem ausgewogenen Verhältnis aus der möglichen realisierbaren technologischen Ausgestaltung und dem dafür notwendigen Aufwand. Jede spezifische Leichtbauentwicklung ist somit in Bezug auf den erzielbaren Leichtbaugrad im Verhältnis mit dem dafür erforderlichen Ressourcen- und Kostenaufwand zu bewerten. Diese Bewertung fällt je nach Anwendungsszenario bzw. Branche wie z. B. Anlagenbau, Automobilität, Luftfahrt oder Raumfahrt unterschiedlich aus. Dennoch können für den Leichtbau im Allgemeinen folgende Entwurfsstrategien festgelegt werden, nach denen die Lösungsfindung in allen Anwendungen vorgenommen wird [4, 7].

Leichtbaustrategien

Der *Stoffleichtbau* umfasst Maßnahmen, in denen der verwendete Konstruktionswerkstoff (der *Bestandteil*) im Hinblick auf spezifisch massebezogene schwere Werkstoffe durch leichtere mit äquivalenten oder besseren mechanischen Eigenschaften ersetzt werden. Der *Form- und Funktionsleichtbau* beschreibt konstruktive Entwicklungsstrategien unter dem Einsatz von integrativen Konstruktionen auf *Bauteilebene* mit möglichst dünnwandigen Querschnitten, Hohlstrukturen sowie der Erzeugung eindeutiger Kraftleitungspfade. Der *Fertigungsleichtbau* zielt auf die Funktionsintegration innerhalb einer *Baugruppe* mit dem Ideal der Einstückigkeit [4] bei geringstem Material- und Fügeaufwand ab. Der *Konstruktions- und Sparleichtbau* beinhaltet die materialsparende Konstruktion unter Nutzung

von Werkstoffen mit hinreichenden Eigenschaften und generell vereinfachter Herstellung. Darüber hinaus wird als Rahmenstrategie der Begriff des Neutralleichtbaus verwendet [8], der im Grunde systematisch auf den oben genannten Strategien aufbaut und dabei den Fokus auf nachhaltigkeitsgetriebene (d. h. ressourcen-, CO₂-neutrale) sowie maximal automatisierte und prognostizierbare Entwicklungsansätze lenkt.

Die Priorisierung dieser Strategien ist von der jeweiligen Anwendung abhängig, allerdings können Gemeinsamkeiten in deren Ausrichtung in *Designprinzipien* zusammengefasst, die deren Umsetzung mehr oder weniger unterstützen. Konkret unterschieden wird dabei zwischen der *Differential-* und der *Integralbauweise* [9]. Sie zielen auf die Strukturierung eines mechanischen Systems in Baugruppen und Bauteile [10], wobei der Differentialbauweise der Zielstellung zugrunde liegt, eine komplexe Großstruktur in einzelne, möglichst einfach zu fertigende Teile zu zerlegen, die durch weitere Fügevorgänge zu einer Gesamtstruktur zusammengesetzt werden. Dem entgegen ist es das Ziel der Integralbauweise, die Anzahl von Bauteilen und Unterbaugruppen sowie die der erforderlichen Fertigungsschritte und Fügeoperationen auf ein Minimum zu senken.

Differential- und Integralbauweise

Differential hergestellte Strukturen können demnach unter Berücksichtigung chemischer und thermischer Kompatibilität mit hoher Flexibilität der eingesetzten Materialien und Halbzeuge hergestellt werden. Sie sind gut reparier- und recycelbar, da einzelne Teile von einander separiert werden können [7]. Allerdings stellt die dafür notwendige Fügeverbindung auch einen möglichen Schwachpunkt dar und erfordert eine zusätzliche Verstärkung, was die Masse der Struktur erhöht [4]. *Integrales Design* hat das Ideal der Einstückigkeit einer Struktur zum Ziel, wodurch eben jene Fügeverbindungen entfallen und somit erst höchste Masseeinsparungen am Bauteil erzielt sowie Lastpfade nicht unterbrochen werden [5]. Es gilt jedoch auch zu berücksichtigen, dass Teile der Struktur nicht mehr ausgetauscht oder entfernt werden können, ohne deren integralen Charakter zu beeinträchtigen, was die Reparatur beschädigter Bereiche und auch das Recycling deutlich erschwert. Diese Aspekte müssen in der Auswahl der Werkstoffgrundlage für integral designete Strukturen berücksichtigt werden, in denen Materialien verwendet werden, die eine hinreichend hohe

Belastbarkeit während der gesamten Lebensdauer ermöglichen sowie zu mindest das Recycling auf Grundlage der eingesetzten Materialien bestmöglich unterstützen [4, 5].

Erzielt werden kann dies mit dem Einsatz von Faser-Kunststoff-Verbunden (FKV). Je nach Zusammensetzung (siehe Kapitel 2.1.2) erzielen sie im Vergleich zu konventionellen Konstruktionswerkstoffen wie Metallen deutlich gesteigerte mechanische Eigenschaften (Stoffleichtbau) und werden Prinzip-bedingt durch ihren additiven Fertigungsprozess klassischerweise als hochgradig integrierte Strukturen hergestellt (Form-/Fertigungsleichtbau) [4]. Ähnliches gilt für Baugruppen, die bewegliche mechanische Systeme darstellen. Entwicklung auf der Grundlage der Adaptronik/Struktronik [11, 12] greifen diesen Aspekt auf, wobei die Elemente, die für die notwendigen Bewegungsfreiheitsgrade erforderlich sind, wie z. B. Gelenke und Lager, innerhalb der Struktur selbst durch sogenannte Festkörpergelenke [11] ausgebildet sind, die wiederum ein integraler Bestandteil der Baugruppe bzw. des zusammenhängenden Teils als nachgiebiger Mechanismus sind (aus dem englischen *compliant mechanism* [13]). Auch hierbei sind FKV von herausragender Bedeutung, da sie gezielt auf die mechanischen Anforderungen Belastbarkeit, Verformungsvermögen angepasst werden können [12].

In dem Zusammenhang erfolgt in den folgenden Kapiteln eine Beschreibung und Bewertung zum Stand der Technik und Forschung für Faserverbundwerkstoffen mit dem Fokus auf ihre Herstellung und Verarbeitung zu integralen Leichtbaustrukturen.

2.1.2. Leichtbau mit Faser-Kunststoff-Verbunden

Faser-Kunststoff-Verbunde (FKV) gehören zu den Verbundwerkstoffen und bestehen aus einer Faserkomponente sowie einer die Fasern umschließende polymeren Matrixkomponente [14]. Die Fasern dienen dabei der Verstärkung des Verbundwerkstoffes und dem daraus hergestellten Bauteil, während die Matrix die Fasern in ihrer Lage im Bauteil fixieren, die Einleitung und Verteilung von Lasten in das Bauteil gewährleistet sowie die Fasern vor schädlichen Einflüssen schützt. In Ergänzung zu diesen beiden Komponenten wird als dritte Phase die Grenzschicht zwischen Fasern und Matrix definiert, da deren Wirkung in Form der Faser-Matrix-Haf tung von entscheidender Bedeutung für die Ausprägung der mechanischen Eigenschaften des FKV-Bauteiles ist [15]. Für den Leichtbau sind

FKV von hoher Bedeutung, da sie auf Grund ihres vielseitigen Eigenschaftsprofiles und ihren hohen spezifisch massebezogenen mechanischen Eigenschaften über ein hohes Leichtbaupotenzial verfügen [5].

Verstärkungsfasern und Matrixwerkstoffe

Prinzipiell eignen sich alle faserförmig vorliegenden Materialien bzw. Faserstoffe für die Verarbeitung in FKV. Dies umschließt natürlich vorkommende mineralische Faserstoffe wie z. B. Basalt, aber auch Fasern pflanzlichen Ursprungs aus Flachs oder Hanf. Das derzeit höchste Leichtbaupotenzial wird mit industriell hergestellten Hochleistungsfaserstoffen wie Glas-, Kohlenstoff- oder Aramidfasern erzielt. Bei den Matrixwerkstoffen ist das entscheidende Merkmal hingegen ihre niedrige Dichte, wodurch die Masse der FKV-Komponente niedrig gehalten werden kann sowie der den FKV zugrundliegende Effekt, dass erst die Kombination mit dem Matrixwerkstoff die Ausnutzung der mechanischen Leistungsfähigkeit der Fasern ermöglicht wird [15].

Die mechanischen Eigenschaften der zwei am häufigsten genutzten Verstärkungsfaserstoffe Glas- und Kohlenstofffasern kann anhand ihrer Zugfestigkeit und Steifigkeit (E-Modul) sowie Bruchdehnung (unter Zugbeanspruchung) in Faserrichtung festgemacht werden. *Glasfasern* bestehen zum Großteil aus amorph angeordneten SiO₂ und sind daher in sich isotrop. Ihre Dichte beträgt 2,1 bis 2,6 g/cm³ [16]. Über die Zugabe von weiteren Netzwerkbildnern können die mechanischen und chemischen Eigenschaften der Glasfasern eingestellt werden. In Bezug auf die mechanischen Eigenschaften erzielen Glasfasern je nach Zusammensetzung einen E-Modul von 70 bis 86 N/mm², Zugfestigkeiten von 2400 bis 4400 N/mm² bei einer Bruchdehnung von bis zu 4 % [14, 16].

Kohlenstofffasern (oder auch *Carbonfasern*) bestehen zum Großteil (>90 %) aus Kohlenstoffatomen innerhalb eines regelmäßig angeordnete Graphitgitters [17]. Sie sind das Ergebnis von dem thermischen Abbau eines polymeren, faserförmigen Ausgangsstoffes mit einem möglichst hohen Kohlenstoffanteil und hochgradig vorgeformte, hochmolekularen Struktur. Als Ausgangsstoff wird üblicherweise Polyacrylnitril (PAN) genutzt wird, aber auch Cellulose oder Pech. Innerhalb der Prozessstufen Stabilisierung und Karbonisierung erfolgt die Umordnung der Kohlenstoff-Molekülgruppen in die erforderliche Graphitstruktur sowie die Herauslö-

sung anderen Bestandteile. Analog zu Glasfasern kann durch die Anpassung der Zusammensetzung der Ausgangsmaterialien und der Herstellungsbedingungen ein Spektrum an Kohlenstofffasern mit unterschiedlichen Eigenschaften erzielt werden. So sind Kohlenstofffasern mit einer Dichte von 1,74 bis 1,85 g/cm³ leichter als Glasfasern und erzielen einen deutlich höheren E-Modul von 240 bis 550 kN/mm² [16] bei einer Festigkeit von 2300 bis 5600 N/mm² und Bruchdehnung von 0,57 bis 1,93 %.

Als Zwischenergebnis ihres Herstellungsprozesses liegen Glas- und Kohlenstofffasern in quasi endloser Länge vor und werden daher als Filamente bezeichnet. Sie erhalten eine jeweils materialspezifische Beschichtung, die *Schlichte*, die den Zusammenhalt der Filamente in gebündelter Fadenform gewährleistet sowie Reibungseffekte zwischen den Filamenten und Umlenkstellen und Ähnliches reduzieren und die stoffschlüssige Kopplung an das Matrixmaterial gewährleisten. Diese Fäden können in Bezug auf ihre *lineare Dichte* durch die Anzahl und den Durchmesser der einzelnen Filamente beschrieben werden oder durch die *Feinheit* (Einheit: tex), welche aus dem Quotienten der Fadenmasse (in g) pro Bezugslänge (10³ m) definiert ist. Der Schutz der Filamente durch die Schlichte vor äußeren Einflüssen ist wichtig, da jeder mechanische Kontakt in der weiteren Verarbeitung zu Schäden am Fasermaterial führt und die mechanischen Eigenschaften des späteren FKV negativ beeinflusst. Gründe dafür sind die Zunahme von Defekten auf der Filamentoberfläche (Glasfasern) und die extreme Empfindlichkeit quer zur Faserrichtung (Kohlenstofffasern). Diese Charakteristik wird als Querkraftempfindlichkeit von Hochleistungsfaserstoffen bezeichnet und ist innerhalb der gesamten Prozesskette der Herstellung, Verarbeitung und Nutzung zu beachten.

Die Kombination von Verstärkungsfaser und Matrix zu einem FKV erfolgt durch die Imprägnierung der Fasern mit dem flüssigen Matrixmaterial sowie die darauf anschließende Konsolidierung [5]. *Duroplastische Matrixmaterialien* dürfen dazu noch nicht vernetzt sein, sondern müssen innerhalb ihrer reaktiven Ausgangsstoffe (z. B. *Harz und Härter*) verarbeitet werden. Als duroplastische Materialien werden u. A. Epoxyharze (EP), ungesättigte Polyesterharze (UP) und Vinyllesterharze (VE) verwendet. *Thermoplastische Matrixmaterialien* liegen hingegen meist als gebrauchsfertiges Polymer vor und sind für die Imprägnierung der Fasern auf Schmelztemperatur zu erhitzen. Typischerweise werden Polypropylen (PP), Poly-

amid (PA) und Polyethylenterephthalat (PET) als thermoplastische Matrixmaterialien eingesetzt. Die konkrete Auswahl der Matrix erfolgt anhand der chemischen, thermischen und mechanischen Anforderungen an das FKV-Bauteil sowie der einzusetzenden Verarbeitungsprozesse, aber auch an den zugrundeliegenden Herstellungsprozess. Beispielsweise werden in mechanisch anspruchsvollen Anwendungen der Luft- und Raumfahrt häufig duroplastische Matrixwerkstoffe wie Epoxidharze verwendet, während in Großserienanwendungen eher auf thermoplastische Materialien mit niedrigeren Taktzeiten zurückgegriffen wird, die aus der eingesparten Prozesszeit für die chemische Vernetzungsreaktion resultieren.

Wichtige Aspekt in der Zusammenstellung und Fertigung einer FKV-Struktur ist, dass durch die Kombination von Verstärkungsfasern und Matrixwerkstoff eine Struktur entsteht, die sowohl inhomogen als auch anisotrop ist. So liegen Fasern und Matrix bestenfalls in einer gleichmäßigen Verteilung im Bauteil vor, wobei der Anteil an Verstärkungsfasern an der Gesamtstruktur die letztlich erzielbaren mechanischen Eigenschaften vorgibt. Bei gegebenen Dichten ρ_F und ρ_M kann anhand des Fasermassenanteils ψ der FKV-Bestandteile der Faservolumengehalt (FVG) φ gemäß dem folgenden Zusammenhang bestimmt werden [18]:

$$\varphi = \frac{\psi \rho_M}{\psi \rho_M + (1 - \psi) \rho_F} \quad (4.1)$$

Aus dem Faservolumenanteil (wie auch dem Masseanteil) kann weiterhin auf die Dichte des Faserverbundes ρ_{FKV} geschlossen werden.

$$\rho_{FKV} = \varphi \rho_F + (1 - \varphi) \rho_M \quad (4.2)$$

Weiterhin ist es möglich, anhand des FVG die Steifigkeit des Verbundes in Form des E-Moduls zu bestimmen und die zumindest rein rechnerische Zugfestigkeit anhand bekannter Materialkennwerte der Matrix E_M und Verstärkungsfasern E_F zu bestimmen. Der E-Modul des FKV E_{\parallel} ergibt sich somit wie folgt [19]:

$$E_{\parallel} = E_F \varphi + (1 - \varphi) E_M \quad (4.3)$$

Die Basis-Zugfestigkeit R_{\parallel}^+ des FKV kann anhand des folgenden Zusammenhangs abgeschätzt werden [18].

$$R_{\parallel}^+ \sim R_{\parallel,F} \varphi \quad (4.4)$$

Die Indizierung von E-Modul und Festigkeit des FKV ist eine Folge der zweiten Charakteristik von Faserverbundmaterialien, der Anisotropie. Ihre mechanischen Eigenschaften sind demzufolge richtungsabhängig ausgeprägt. Logischerweise sind dabei Steifigkeiten und Festigkeit parallel zur Faserausrichtung am höchsten bzw. senkrecht dazu am niedrigsten. Neben dem FVG, der durch die Materialzusammenstellung und Prozessbedingungen in der Konsolidierung weitreichend eingestellt werden, ist die Orientierung der Verstärkungsfasern von hoher Bedeutung, um die potentielle mechanische Leistungsfähigkeit der FKV-Struktur zu erschließen und ist vor allem auf die Vorbereitung und Verarbeitung der Fasern in der FKV-Prozesskette geprägt.

Verarbeitungsaspekte

Die Inhomogenität und die Anisotropie sind demnach wichtige Aspekte, die in der Entwicklung und Herstellung von FKV-Leichtbaustrukturen zu berücksichtigen sind. Im besonderen Maße gilt das für den Herstellungsprozess, in dem die Verstärkungsfasern in eine bestimmte, erforderliche Anordnung (Position, Verlauf) und Verteilung gebracht werden müssen. Beides wird in Kombination mit der Fixierungswirkung der Matrix in dem späteren Bauteil eingestellt. Der Vielfalt an Faser-Matrix-Kombinationen steht dabei in der Verarbeitung eine Vielzahl an Verfahrensstrategien gegenüber. Sie basieren auf der Verarbeitung der Verstärkungsfasern (Monofilament, Schnittfasern, ungedrehter Roving/Tow, gedrehtes Garn) in direkter Form oder deren Verarbeitung zu einem textilen Halbzeug als zwischengelagerter Verfahrensschritt. Die Imprägnierung der Fasern mit der Matrix kann bei beiden Varianten vor- oder nach der Positionierung der Fasern erfolgen, wobei je nach Halbzeugvariante und Bauteilgeometrie bestimmte technologische Rahmenbedingungen zu beachten sind.

In Bezug auf die Herstellung von integralen FKV-Leichtbaustrukturen sind textile Halbzeuge (siehe folgendes Kapitel 2.2) von herausragender Bedeutung [5, 9, 17], da sie durch eine *Endlosfaserverstärkung* für höchstmögliche mechanische Bauteileigenschaften erzielbar ist. Je nach Ausprägung eignen sich textile Halbzeuge für Kleinserien (z. B. Handlaminierren bei duroplastischen FKV) und Großserien (Wickel- Pultrusionsverfahren, Thermopressen oder diverse Infusions- und Infiltrationsverfahren). Dabei ist zu beachten, dass jedes dieser Verfahren andere Anforderungen an das textile Halbzeug als Vorprodukt stellt. [9].

Darüber hinaus bedingt die Zielstellung einer integralen Leichtbaustruktur zwangsläufig einen ebenso integralen Designansatz in der Gestaltung und Herstellung des textilen Verstärkungshalbzeuges. Im folgenden Kapitel werden daher die grundlegenden Arten und Charakteristika textiler Verstärkungshalbzeuge näher betrachtet und für die Umsetzung konkreter Designansätze für integrale Leichtbaustrukturen bewertet.

2.2. Textilverstärkte, integrale Faser-Kunststoff-Verbunde

2.2.1. Textile Verstärkungsstrukturen für das direkte Preforming

Für die Herstellung integraler Leichtbaustrukturen können verschiedene textile Verarbeitungsverfahren genutzt werden. Diese basieren auf Technologien zur Verarbeitung faser- bzw. fadenförmiger Ausgangsmaterialen wie für die Herstellung von Bekleidung, Gebrauchstextilien und Ähnlichem und erbringen dadurch die wesentlichen Voraussetzungen für die Verarbeitung von Hochleistungsfasern in industriellem Maßstab. Wie bereits erwähnt, ermöglicht die Komposition eines FKV aus Verstärkungshalbzeug und Matrix verschiedene Möglichkeiten zu deren Kombination, wobei Matrixwerkstoff und das spätere Konsolidierungsverfahren aufeinander abzustimmen sind. Speziell duroplastische Matrices können dabei im Vorfeld der Formgebung (entsprechend der Bauteilgeometrie) zum textilen Halbzeug hinzugefügt werden. Entsprechend dieser Vorimprägnierung, werden solche Halbzeuge als *Prepreg* bezeichnet [9]. Die Applikation der Matrix in das jeweilige Halbzeug weist verschiedene Vorteile auf, wie z. B. entfallen von Fließwegen während der Konsolidierung oder die Einsparung von Prozesstechnik und –Mitteln der Zuführung des benötigten Matrixmaterials. Dem gegenüber leidet auf Grund der Viskosität und klebstoffähnlichen Konsistenz der duroplastischen Matrix die *Drapierbarkeit* (material- und strukturabhängige Verzerrung durch Gleiten, Längenänderung oder Scherung) der Halbzeuge, insbesondere im Hinblick auf die Formgebung zu komplexeren doppelt gekrümmten Bauteilgeometrien. Die Vorimprägnierung eignet sich auf Grund der Kontamination der Anlagentechnik mit Matrix-Ausgangsstoffen ebenso wenig für komplexe dreidimensional aufgebaute Preformen, wie sie die Textiltechnik für die Fertigung integraler FKV ermöglicht [6]. Alternativ und von deutlich höherer Relevanz für die Herstellung komplexer, integraler Halbzeuge sind daher vorgeformte Halbzeuge, welche die komplexe Faserverstärkungstruktur eines Bauteils