
Zur Gestaltung von Maschinenkomponenten aus Faser-Kunststoff-Verbund-Halbzeugen

Andreas Landmann

Schriftenreihe: Konstruktiver Leichtbau mit Faser-Kunststoff-Verbunden

Herausgeber: Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann



TECHNISCHE
UNIVERSITÄT
DARMSTADT

Zur Gestaltung von Maschinenkomponenten aus Faser-Kunststoff-Verbund-Halbzeugen

Vom Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Andreas Landmann

aus Miltenberg

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Eberhard Abele
Tag der Einreichung:	24.10.2017
Tag der mündlichen Prüfung:	19.12.2017



Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit
Faser-Kunststoff-Verbunden

Andreas Landmann

**Zur Gestaltung von Maschinenkomponenten
aus Faser-Kunststoff-Verbund-Halbzeugen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2018

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.

Zugl.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2017

Copyright Shaker Verlag 2018

Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-6338-7

ISSN 1439-7390

Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen

Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Gegenstand dieser Dissertationsschrift ist der Einsatz von Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbunden (CFK) in Maschinenkomponenten. Gegenüber klassischen Werkstoffen wie Stahl oder Aluminium bietet CFK eine höhere spezifische Steifigkeit, eine höhere Werkstoffdämpfung und zudem den Vorteil einer einstellbaren thermischen Dehnung. Im Gegensatz zu bisherigen Arbeiten mit integraler Herstellung der Komponenten wird dazu eine Konstruktionsweise verfolgt, die sich einfacher, bereits ausgehärteter CFK-Halbzeuge wie Stäbe, Platten und Rohre bedient. Diese sind vergleichsweise kostengünstig am Markt verfügbar und lassen sich in einer modularen Differenzialbauweise ohne Investitionsaufwand für zusätzliche Formwerkzeuge zu komplexen Strukturen fügen.

Zunächst erfolgt die Bewertung maschinentypischer Umgebungseinflüsse wie Spänebeschuss und Kühlschmierstoffe auf den Werkstoff CFK und darauf die Eingrenzung der Einsatzmöglichkeiten. Anschließend werden grundsätzliche Vorteile des CFK-Leichtbaus anhand konkreter Anwendungsbeispiele diskutiert.

Für die zugrunde gelegte modulare Bauweise werden Vorgehensweisen zur Bauteilgestaltung erarbeitet. Dazu werden entsprechende Krafteinleitungen und Verbindungstechniken entwickelt und im Versuch geprüft. Eine Anwendung dieser Bauweise erfolgt schließlich an drei für Bearbeitungsmaschinen typischen Komponenten: einer Hubtür, einem Schwenkarm und einem Fräsmaschinenportal. Dabei werden verschiedene Konstruktionsansätze verfolgt und deren Potenzial zur Ausschöpfung der CFK-spezifischen Vorteile bewertet. Im Anschluss erfolgen die prototypische Herstellung und eine umfangreiche, messtechnische Untersuchung. Zuletzt wird anhand der ermittelten Bauteilkosten die Wirtschaftlichkeit dieser neuartigen Komponenten abgeschätzt.



Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	xi
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Stand der Technik	2
1.3 Zielsetzung	7
2 Werkzeugmaschinenpezifische Umgebungseinflüsse	9
2.1 Kühlschmierstoff-Exposition	9
2.1.1 Definition der Versuchsbedingungen.....	9
2.1.2 Feuchteaufnahme.....	12
2.1.3 Ergebnisse der Festigkeitsuntersuchung.....	13
2.1.4 Exposition im Feldversuch	15
2.1.5 Offene Schnittkanten	16
2.1.6 Sandwich-Kernwerkstoffe	17
2.2 Spänebeschuss.....	17
3 Analyse des technischen Nutzens von CFK-Leichtbau an ausgewählten Bauteilen	21
3.1 Werkstoffspezifische Gestaltungsmöglichkeiten	21
3.1.1 Richtungsabhängige Steifigkeit	21
3.1.2 Werkstoffdämpfung	23
3.1.3 Thermische Dehnung	28
3.2 Systematik zur Bauteilauswahl	31
3.3 Hubtür eines Werkzeugmagazins	32
3.3.1 Randbedingungen und Anforderungen	32
3.3.2 Erzielbare Vorteile.....	33
3.4 Schwenkarm eines Werkstückwechselsystems	36
3.4.1 Randbedingungen und Anforderungen	37
3.4.2 Erzielbare Vorteile.....	39
3.5 Portal einer Fräsmaschine	42
3.5.1 Randbedingungen und Anforderungen	42
3.5.2 Erzielbare Vorteile.....	48
4 Halbzeugbauweise: Gestaltung von Krafteinleitungen	59
4.1 Quermutter-Verschraubung von Platten-T-Stößen	59
4.1.1 Finite-Elemente-Analyse und Parameterdiskussion.....	61
4.1.2 Lokale Verstärkung des Lochausschnitts	64
4.1.3 Experimentelle Untersuchung.....	65
4.1.4 Konstruktionshinweise und Fazit.....	68
4.2 Verbindung von Platten-Eckstößen.....	68

4.2.1	Torsionsbelastung	69
4.2.2	Querschnittsverformung eines Rechteckprofils unter Querkräften	75
4.2.3	Lastfallkombination am Beispiel des Portals einer Fräsmaschine	76
4.2.4	Dämpfungseinfluss	80
4.2.5	Konstruktionshinweise und Fazit	82
4.3	Flanschverbindung von Rohr und Platte	84
4.3.1	Definition des Versuchskörpers	85
4.3.2	Ergebnisse zu statischen Versuchen	86
4.3.3	Bewertung von Retardation und Relaxation	87
4.3.4	Ergebnisse zu Ermüdungsversuchen	88
4.3.5	Konstruktive Möglichkeiten zur Traglaststeigerung	89
4.3.6	Alternative Konzepte	90
4.3.7	Konstruktionshinweise und Fazit	91
5	Strukturkonzepte für ausgewählte Bauteile	93
5.1	Hubtür eines Werkzeugmagazins	93
5.1.1	Grundstruktur	93
5.1.2	Krafteinleitungselemente	95
5.1.3	Fazit	97
5.2	Schwenkarm eines Werkstückwechselsystems	98
5.2.1	Diskussion möglicher Bauweisen für die Grundstruktur	98
5.2.2	Krafteinleitungselemente	102
5.2.3	Fazit	104
5.3	Portal einer Fräsmaschine	105
5.3.1	Topologieoptimierung der Portalstruktur	105
5.3.2	Ableitung einer halbzeuggerechten Struktur	107
5.3.3	Segmentierung und Schichtdickenoptimierung	107
5.3.4	Optimierung der x-Krafteinleitung	110
5.3.5	Optimierung der Portalfuß-Schnittstelle	112
5.3.6	Reduktion des thermischen Verzugs bei lokalem Wärmeeintrag	113
5.3.7	Fazit	115
6	Umsetzung von Demonstratoren und deren Erprobung	117
6.1	Hubtür eines Werkzeugmagazins	117
6.2	Schwenkarm eines Werkstückwechselsystems	119
6.2.1	Herstellung der Einzelkomponenten	119
6.2.2	Zusammenbau	121
6.2.3	Messtechnische Untersuchung	121
6.3	Portal einer Fräsmaschine	124
6.3.1	Herstellung der Einzelkomponenten	124
6.3.2	Zusammenbau	125
6.3.3	Messtechnische Untersuchung	127
7	Betrachtung von Bauteilkosten und wirtschaftlichen Vorteilen	131

7.1	Hubtür eines Werkzeugmagazins	132
7.2	Schwenkarm eines Werkstückwechselsystems	132
7.3	Portal einer Fräsmaschine	134
7.4	Fazit	135
8	Zusammenfassung und Ausblick	137
	Literaturverzeichnis	143
A	Leichtbauvorteil durch FKV bei Biegung	151
B	Materialkennwerte	152
C	Begriffsdefinitionen zur Dämpfung	153
D	Kennzahlen zum Schwenkarm	154
E	Laminataufbau des CFK-Portals	155



Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AWV	ausgeglichener Winkelverbund
C	Kohlenstoff
CF	Kohlenstofffaser
CFK	Kohlenstofffaser-Kunststoff-Verbund
CLT	klassische Laminattheorie
EP	Epoxidharz
EPDM	Ethylen-Propylen-Dien-Kautschuk
Fb	Faserbruch
FEA	Finite-Elemente-Analyse
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
GF	Glasfaser
GFK	Glasfaser-Kunststoff-Verbund
GJL	Gusseisen mit Lamellengraphit
HM	<i>High Modulus</i>
HT	<i>High Tensile Strength</i>
KGT	Kugelgewindetrieb
KLuB	<i>Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen</i>
KSS	Kühlschmierstoffe
KV	Kreuzverbund
LG	Leichtbaugüte
LPV	Längspressverband
MKS	Mehrkörpersimulation
MSV	Mehrschichtenverbund
PA	Polyamid
PTW	<i>Institut für Produktionsmanagement, Technologie und Werkzeugmaschinen</i>
PUR	Polyurethan
PVC	Polyvinylchlorid
QI	quasiisotrop
SMC	<i>Sheet Moulding Compound</i>
TCP	<i>Tool Center Point</i>
UD	Unidirektional
UHM	<i>Ultra High Modulus</i>
UHPC	<i>Ultra High Performance Concrete</i>
Zfb	Zwischenfaserbruch

Griechische Formelzeichen		Einheit
α_T	thermischer Längenausdehnungskoeffizient	—
α	Winkelbeschleunigung	rad/s ²
α	Faserwinkel	°
γ	Schiebung	—
δ	Nachgiebigkeit	—
ε	Dehnung	—
η	Anregungsverhältnis	—
κ	Krümmung	—
ν	Querkontraktionszahl	—
μ	Erwartungswert	—
μ	Reibwert	—
ρ	Dichte	kg/m ³
σ	Normalspannungen	N/mm ²
τ	Schubspannung	N/mm ²
φ	relativer Faservolumenanteil	—
φ	Schwenkwinkel, Verdrehwinkel	°
ψ	Relative Dämpfung	—
ω	Winkelgeschwindigkeit	rad/s
ω	AWV-Winkel	°
ω_0	Eigenkreisfrequenz	1/s
Ω	Anregungskreisfrequenz	1/s

Lateinische Formelzeichen		Einheit
a	Abstand	mm
a	Beschleunigung	m/s ²
b	Breite	mm
d	viskose Dämpfungskonstante	kg/s
D	Dämpfungsgrad	—
D_{ij}	Plattensteifigkeit	Nmm
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
f	Frequenz	Hz
F	Kraft	N
f_E	Anstrengung	—
G	Schubmodul	N/mm ²
h	Höhe	mm ²
j	Ruck	m/s ³
J	Trägheitsmoment	kg/m ²
k	Steifigkeit, i. d. R. normiert auf Stahl-Referenz	N/mm
k	Anzahl der Schichten eines MSV	—

l	Länge	mm
LG	Leichtbaugüte, normiert auf Stahl-Referenz	–
M	Moment	Nm
m	Masse	kg
n	Drehzahl	1/min
n	Anzahl	–
N	Schwingspielzahl	–
p	Druck	N/mm ²
R	Festigkeit	N/mm ²
R	Radius	mm
R_z	gemittelte Rautiefe	μm
SF	Sicherheitsfaktor	–
S_{ij}	Nachgiebigkeit	mm ² /N
t	Dicke	mm
t	Zeit	s
T	Temperatur	°C
U	Formänderungsenergie	Nm
u	Verschiebung, Auslenkung	mm
v	Geschwindigkeit	m/s
w	Wichtung	–
w_t	Wellentiefe	μm
W_D	Dämpfungsenergie	Nm

Indizes

–	Druck
+	Zug
⊥	senkrecht zur Faser
	Parallel zu Faser
a	Beschleunigung
a	außen
A	Anbau
Al	Aluminium
D	Deckhaut
dyn	dynamisch
eff	effektiv
f	<i>feed</i> , Vorschub
F	Führung
F	Fuge
Fb	Faserbruch
fit	<i>fitting</i> , Anpassungsfunktion
G	Gewichtskraft
ges	gesamt

Gr	Greifer
Gr	Granit
i	innen
J	Trägheitsmoment
K	Kern
L	Lochleibung
max	maximal
min	minimal
Mot	Motor
N	Nutzlast
N	normal
P	Portal
R	Reibung
St	Stahl
stat	Statisch
SW	Schwenkarm
TCP	Tool Center Point
xz	xz-Aufbau
Zfb	Zwischenfaserbruch

Koordinaten

x, y, z	kartesisches Koordinatensystem, Laminatkoordinatensystem
r, φ, z	zylindrisches Koordinatensystem
1, 2, 3	Koordinatensystem der UD-Schicht