
Beitrag zur konstruktiven Gestaltung offener, verrippter Profile aus Faser-Thermoplast-Verbunden mit lastpfadgerechten Verstärkungen

Am 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. Jakob Faber

aus Hamburg

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Wilfried Becker
Tag der Einreichung:	01.12.2015
Tag der mündlichen Prüfung:	17.02.2016



Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit
Faser-Kunststoff-Verbunden

Jakob Faber

**Beitrag zur konstruktiven Gestaltung offener,
verrippter Profile aus Faser-Thermoplast-Verbunden
mit lastpfadgerechten Verstärkungen**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2016

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., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4330-3

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

Diese Arbeit gibt Gestaltungsempfehlungen für offene, verrippte Faser-Thermoplast-Profile. Hierfür wird bereits bei einer Analyse der Profilbeanspruchungen in Rahmenwerken angesetzt. Es zeigt sich, dass Biegeanforderungen an Profile deutlich über Torsionsanforderungen priorisiert sind. Dieses Eigenschaftsspektrum lässt sich besonders wirtschaftlich abdecken durch offene Fließpressprofile aus kostengünstigen Wirrfaserformmassen, kombiniert mit unidirektionalen Haupt-Lastpfad-Verstärkungen (HLV) in den zug-/druckbeanspruchten Gurten.

Die Mechanik der offenen, verrippten Profile wird kurz beleuchtet und eine einfache analytische Lösung der dominanten Querkraftbiegung vorgestellt. Ausführliche FE-Parameterstudien und Optimierungsergebnisse sind zu kompakten, anwendbaren Gestaltungshinweisen zusammengefasst. Im experimentellen Teil ist sowohl die fertigungstechnische Umsetzbarkeit als auch die hohe erreichbare Leichtbaugüte bei gelungener Konstruktion dargestellt: Offene HLV-Profile erreichen in Biege- und Torsionsversuchen etwa das Niveau geschlossener Referenzquerschnitte.

Abschließend vorgestellt sind hierbei erarbeitete, neue Maßnahmen gegen die erhöhte Kerbwirkung von Rippen an FKV sowie gegen das Verschwimmen der UD-Schichten im Pressprozess.

Abstract

This work focuses on design guidelines for open, ribbed beams made from fibre reinforced thermoplastics. An initial analysis of beam members in frameworks yields dominant bending requirements over torsional ones. These characteristics are most economically met using open section, compression moulded beams from affordable random fibre thermoplastics; unidirectionally reinforced main load paths (flanges) ensure maximized bending properties.

A mechanical analysis of the dominant bending load case along with elaborate FEA parameter studies and optimization results are then compacted into applicable design guidelines. The following experimental section shows the manufacturability and lightweight performance of prototypes: Open, main load path reinforced profiles match closed section reference beams.

Finally, new measures against the increased notch effect of ribbed FRP parts and against undesired deformation of UD laminae during compression moulding are presented.



Erklärung zur Dissertation

Hiermit versichere ich, die vorliegende Dissertation ohne Hilfe Dritter nur mit den angegebenen Quellen und Hilfsmitteln angefertigt zu haben. Alle Stellen, die aus Quellen entnommen wurden, sind als solche kenntlich gemacht. Diese Arbeit hat in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen.

Darmstadt, den 26. November 2015

(Jakob Faber)



Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Motivation: Thermoplastische FKV ideal gestalten	1
1.2	Untersuchtes Strukturkonzept: HLV-Bauweise im Pressverfahren	2
1.3	Stand der Technik	5
1.4	Fazit: Handlungsbedarf und Ziele der Arbeit	9
2	Analyse, Gestaltung und Optimierung lastpfadgerecht verstärkter offener Profile	11
2.1	Zum Entwurf faserverbundgerechter Rahmenwerke	11
2.1.1	Herleitung der Rahmenwerkstopologie	11
2.1.2	Herleitung mechanischer Anforderungen an Profile in Rahmenwerken	16
2.1.3	Rahmenwerke aus FTV: geeignete Technologien und Bauweisen	23
2.2	Analyse offener, verrippter HLV-Profile	25
2.2.1	Abgrenzungen, Annahmen, Lastfälle	25
2.2.2	Betrachtung der Biegung	27
2.2.3	Analytische Näherungsformel für den Querkraftbiegefall	29
2.2.4	Betrachtung der Torsion	32
2.2.5	Finite-Elemente-Modelle für Parameterstudien	33
2.2.6	FE-Validierung der analytischen Näherungsformel für Querkraftbiegung	37
2.2.7	Einfluss der Träger-Länge	38
2.2.8	Einfluss der Querschnittsabmessungen	39
2.2.9	Einfluss der Verrippungsdichte	41
2.2.10	Einfluss der Haupt-Lastpfad-Verstärkungen	42
2.2.11	Einfluss des Rippenwinkels	43
2.2.12	Einfluss der Wanddicken-Verhältnisse und des Rippen-E-Moduls	44
2.3	Evolutionäre Optimierung von HLV-Profilen	48
2.3.1	Konzept und Implementierung einer Optimierungsstrategie für HLV-Träger	49
2.3.2	Ergebnisse bei Ein- und Mehrzieloptimierung	52
2.4	In Kurzform: Tabelle der wichtigsten Gestaltungshinweise	56
3	Fertigung von HLV-Profilen im Pressverfahren	59
3.1	Voruntersuchungen an Rippeneinheitszellen	59
3.1.1	Fertigungsversuche im HLV-Pressverfahren	61
3.1.2	Qualitätsuntersuchungen von Pressbauteilen mit UD-Einlegern	63
3.1.3	Belastungsversuche der Rippeneinheitszelle unter Schub	65
3.2	Fertigung hochbelastbarer HLV-Profile im Pressverfahren	67
3.2.1	Zielsetzung, Geometrie und Dimensionierung	67
3.2.2	Konzepte und Konstruktion der Presswerkzeuge für HLV-Träger	70
3.2.3	Fertigungsversuche und erreichbare Qualität von HLV-Trägern	76

4	Biege- und Torsionsversuche an FKV-Profilen	83
4.1	Dreipunktbiegung: Vorversuche an geschlossenen und HLV-Profilen	83
4.2	Kragbalkenbiegung an HLV-Profilen	85
4.2.1	Konzept, Konstruktion und FE-Berechnung eines neuartigen Biegeprüfstands	85
4.2.2	Versuchsergebnisse	89
4.2.3	Einfluss von Halbzeugen und Konstruktion	93
4.2.4	Zusammenfassung der Kragbiegeversuche und Gestaltungshinweise .	95
4.3	Torsionsversuche an HLV-Profilen	96
4.3.1	Bruchbild und Einfluss der Endlosfaser-Verstärkungen	97
4.3.2	Betrachtung möglicher Festigkeitsverluste durch unterbrochene Faserverstärkung im Radiusbereich	98
4.3.3	Zusammenfassung der Torsionsversuche und Vergleich mit FE-Analyse	98
5	Konstruktive und fertigungstechnische Maßnahmen für allgemeine HLV-Strukturen	101
5.1	Flächenstrukturen in HLV-Bauweise: Einflüsse auf Steifigkeit und Stabilität .	101
5.1.1	FE-Steifigkeitsbetrachtung generischer HLV-Flächenstrukturen	101
5.1.2	Experimentelle Untersuchung generischer HLV-Flächenstrukturen . .	103
5.1.3	Anwendungsbeispiel flächiger HLV-Strukturen: Fahrzeug-Bodengruppe	105
5.2	Zur Gestaltung und Kerbwirkung isotroper Rippen an orthotropen Laminaten	107
5.2.1	Vergleich der Kerbformen im Rippenanschluss	109
5.2.2	Spannungsumlagerungen durch orthotrope Lamine	111
5.3	Zur Verbesserung der Formtreue von FKV-Einlegern im Pressprozess	113
5.3.1	Untersuchung der Haftungskette Kern - Randschicht - Formmasse . .	114
5.3.2	Fließstudien zu Formtreue und Ondulationen der UD-Einleger	116
6	Zusammenfassung und Ausblick	119
6.1	Fazit zum HLV-Profil und Vergleich mit geschlossenen Querschnitten	119
6.2	Zusammenfassung der Arbeit	120
6.3	Ausblick für weiterführende Arbeiten	121
A	Charakterisierung der CF-PA6-UD-Schicht unter Klimaeinfluss	125
B	Tabellen geprüfter Profile	133
	Literaturverzeichnis	135

Symbolverzeichnis

Abkürzungen

AWV	ausgeglichener Winkelverbund
CF	Kohlenstofffaser
CLT	klassische Laminattheorie
CMT	kohlenstofffaser-mattenverstärkter Thermoplast
DMS	Dehnmessstreifen
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FTV	Faser-Thermoplast-Verbund
GEH	Gestaltänderungsenergiehypothese
GF	Glasfaser
GMT	glasmattenverstärkter Thermoplast
HLV	Haupt-Lastpfad-Verstärkung
KIF	Konus-Innendruck-Formen
KRE	Kern-Randschicht-Einleger
LFT	langfaserverstärkter Thermoplast
NH	Normalspannungshypothese
PA	Polyamid
PAZ	Profil-Armierungs-Ziehen
PK	Parabolkriterium
Pkw	Personenkraftwagen
PP	Polypropylen
QI	quasiisotrop
RB	Randbedingung
REZ	Rippeneinheit
RTM	<i>Resin Transfer Moulding</i>
SH	Schubspannungshypothese
SIMP	<i>Solid Isotropic Material with Penalization</i>
SKO	<i>Soft Kill Option</i>

SMP	Schubmittelpunkt
UD	unidirektional
ZDT	Zug-Druck-Torsion

Griechische Formelzeichen		Einheit
α	Winkel	°
γ	Schiebung	—
κ	Einflusszahl im Rahmenwerk	—
μ_0	Haftbeiwert	—
ν	Querkontraktionszahl	—
σ	Normalspannung	N/mm ²
σ_∞	Spannung im ungestörten Bereich	N/mm ²
σ_v	Vergleichsspannung	N/mm ²
τ	Schubspannung	N/mm ²
θ_R	Rippenwinkel	°
ε	Dehnung	—
ϑ, φ	Verdrehung	°

Indizes

B	Biegung
F	Formmasse
Fb	Faserbruch
G	Gurt
krit	kritisch (Stabilität)
pl	plastisch
Q	Querkraft
R	Rippe
r	Radius
ref	Referenz
S	Schub
St	Steg
T	Träger, Torsion
Zfb	Zwischenfaserbruch

Koordinatensysteme

$1,2,3$	Schichtkoordinatensystem
$\parallel, \perp$	Faserkoordinatensystem
$n,1,2$	Profilkoordinatensystem im Rahmenwerk
x,y,z	karthesisches Koordinatensystem, Laminatkoordinatensystem
x_F, y_F, z_F	Fahrzeugkoordinatensystem

Lateinische Formelzeichen

Einheit

A	Querschnittsfläche	mm^2
b	Breite	mm
c	Rahmenwerkssteifigkeit	$\text{Nm}/^\circ$
d	einbeschriebener Durchmesser	mm
E	E-Modul	N/mm^2
F	Kraft	N
f	Zielfunktion, Anstrengung	—
G	Schubmodul	N/mm^2
h	Höhe	mm
I	Flächenträgheitsmoment	mm^4
k_i	Optimierungsrestriktionen	—
l	Länge	mm
m	Masse	kg
n	Verrippungsdichte	—
n_{xy}	Schubfluss	N/mm
p_i, q_i	Faktoren und Exponenten der Straffunktion	—
R	Festigkeit	N/mm^2
s	Weg	mm
T	Temperatur	$^\circ\text{C}$
t	Wanddicke	mm
u	Gestaltabweichung in Breitenrichtung	mm
w	Absenkung	mm
w_R	Rippen-Schlüsselweite	mm



Vorwort

Die Anfertigung dieser Dissertation wurde mir als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet *Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen* der *TU Darmstadt* ermöglicht. Ich bedanke mich besonders bei Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann für die exzellente Betreuung. Ihre stets offene Tür, Ihre Ideenfreudigkeit und Ihre Rückendeckung haben unzählige Umwege und Sackgassen vermieden. Ein großer Dank geht auch an Prof. Dr.-Ing Wilfried Becker für das ausgezeichnete Korreferat. Ich bedanke mich darüber hinaus bei Dr. Wolfgang Hahn, der mich von Seite des Industriepartners *BMW* betreut hat und das Zustandekommen dieses Forschungsprojekts maßgeblich initiiert hat.

Ohne die tatkräftige Mitarbeit des Werkstatt- und Technikumpersonals wäre die zweite Hälfte dieser Arbeit de facto nicht existent; daher gilt auch Ihnen allen - insbesondere Thomas Kötting, Hasan Dadak, Martin Schwarz, Dr.-Ing Erich Blohberger, Volker Rosmann und Kevin Göttmann - meine besondere Anerkennung. Von Ihnen konnte ich darüber hinaus viel Praktisches dazulernen, was mir immer Freude bereitet hat.

Meinen Kollegen danke ich für den regen und unterhaltsamen Wissensaustausch auf kurzem Dienstweg und für die bemerkenswert schöne Zeit am Institut, die ich immer in positiver Erinnerung halten werde. Allen beteiligten Korrekturlesern sei außerdem für die zahlreichen hilfreichen Verbesserungen gedankt. Die von mir betreuten Studierenden haben in ebenfalls einen Beitrag zum Gelingen dieser Arbeit gehabt, vielen Dank auch an Euch.

Zuletzt gilt meinen Eltern die ganz besondere Anerkennung, nur Ihr habt mir alles ermöglicht.

Darmstadt, 2016,

Jakob Faber