
Zum Innendruckumformen von Faser-Thermoplast-Kreisrohren

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. Christoph Schmidt

aus Schlüchtern

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche
Tag der Einreichung:	26.05.2015
Tag der mündlichen Prüfung:	15.07.2015



Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit
Faser-Kunststoff-Verbunden

Christoph Schmidt

**Zum Innendruckumformen
von Faser-Thermoplast-Kreisrohren**

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2015

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., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3867-5

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

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet *Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen* des Fachbereichs Maschinenbau an der *Technischen Universität Darmstadt*.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann, dem Leiter des Fachgebiets, für die hervorragende Betreuung und die vertrauensvolle Zusammenarbeit. Seine vielen Denkanstöße und Anregungen waren mir stets eine große Hilfe und trugen maßgeblich zum Gelingen dieser Arbeit bei.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Dipl.-Wirtsch.-Ing. Peter Groche, Leiter des Fachgebiets *Produktionstechnik und Umformmaschinen* an der *Technischen Universität Darmstadt*, danke ich für die freundliche Bereitschaft zur Übernahme des Koreferats.

Herrn Dr.-Ing. Erich Blohberger, akademischer Direktor des Fachgebiets, danke ich für die Unterstützung bei der Versuchsplanung. Seine fachlichen Kenntnisse auf dem Gebiet der Messtechnik und Prüfung von FKV-Bauteilen waren mir eine große Hilfe.

Ich bedanke mich bei Herrn Thomas Kötting, Leiter der Metallwerkstatt des Fachgebiets, und seinen Mitarbeitern Herrn Martin Schwarz, Herrn Sebastian Locker, Herrn Kevin Göttman und dem gesamten Team für die Herstellung der Werkzeuge und Prüfvorrichtungen. Ihre kompetente und gewissenhafte Arbeit sowie ihre Hilfestellungen und Beratungen in stets freundlicher Atmosphäre hatten einen wichtigen Einfluss auf das Gelingen meiner Arbeit. Von sehr großer Bedeutung war auch die Unterstützung durch Herrn Hasan Dadak, Leiter der Kunststoffwerkstatt des Fachgebiets, und seinem Mitarbeiter Herrn Volker Rosmann. Ich danke ihnen für die fachlich kompetente Beratung bei der Versuchsplanung und die Unterstützung bei der Durchführung von Versuchen und Prüfungen.

Ich danke allen Kollegen und Mitarbeitern des Fachgebiets herzlichst für das kooperative und freundschaftliche Arbeitsumfeld. Die fachlichen Diskussionen beim gemeinsamen Mittagessen, im Büro, auf dem Flur oder im Besprechungsraum, brachten gewinnbringende Anregungen für meine Arbeit – die privaten sorgten meist für Heiterkeit. Für das Korrekturlesen danke ich herzlich den Kollegen Dr. Wolfgang Bleser, Dr. Tobias Dickhut, Dr. Alexander Elter, Jakob Faber, Alexander Höhme, Dr. Martin Klimach, Andreas Landmann, Nils Meyer, Matthias Schulitz und meinen Freundinnen und Freunden Ulrike Albrecht, Frank Born, Dr. Olaf Butenschön, Sabine Minor und Alexandra Weide.

Ich danke meinen zahlreichen Studenten und Hilfswissenschaftlern, die durch ihre studentischen Arbeiten einen wichtigen Beitrag geleistet haben, für die gute Zusammenarbeit. Eine namentliche Übersicht findet sich im Anschluss an das Literaturverzeichnis dieser Arbeit.

Herzlichst bedanke ich mich bei meinen Eltern, die mich auf meinem Lebensweg immer unterstützt haben. Ein ganz besonderer Dank gilt meiner Frau Ariela und meinen Töchtern Shamaja und Joelina, die mir insbesondere in der Endphase dieser Arbeit den Rücken frei gehalten haben und mich durch alle Höhen und Tiefen begleitet haben.

Darmstadt, im August 2015

Christoph Schmidt



Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	vii
1 Einleitung	1
1.1 Einführung	1
1.2 Zielsetzung und Gliederung der Arbeit	3
2 Stand der Technik	5
2.1 Umformverfahren zur Herstellung von Faser-Thermoplast-Hohlkörpern	5
2.1.1 Wickeltechnik	5
2.1.2 Flechttechnik	6
2.1.3 Thermoplast-Pultrusion	7
2.1.4 Pullwinding- und Pullbraidingverfahren	8
2.2 Umformverfahren zur Herstellung von Faser-Thermoplast-Hohlkörpern . . .	9
2.2.1 FIT-Hybrid	9
2.2.2 Twin-O-Sheet	9
2.2.3 Doppel-Diaphragma-Umformtechnik für Hohlkörper	10
2.2.4 Bladder Inflation Moulding	11
2.2.5 Intervall-Heißpressen	11
2.2.6 Rollformen	12
2.2.7 Profil-Armierungs-Ziehen	13
2.3 Abgrenzung und Bewertung der Verfahren	13
3 Das Faser-Thermoplast-Kreisrohr als Basis für Umformprozesse	17
3.1 Grundlagen der Kreisrohrumformung	18
3.1.1 Spannungszustand bei der Kreisrohrumformung	18
3.1.2 Einfluss des Laminataufbaus auf die Umformmechanismen	20
3.2 Mögliche Zielgeometrien bei der Kreisrohrumformung	22
3.2.1 Aufweitung des Querschnitts	23
3.2.2 Krümmung um die Rohrlängsachse	24
3.2.3 Krümmung in der Querschnittsebene	24
3.2.4 Krümmung in der Querschnittsebene und in Axialrichtung	25
3.3 Experimentelle Untersuchung der Kreisrohrumformung	26
3.3.1 Fertigungskonzept zur Herstellung eines offenen T-Profiles	26
3.3.2 Auslegung der Kontur des Umformdorns	28
3.3.3 Konstruktion der Umformwerkzeuge	32
3.3.4 Optische Überprüfung der Laminatqualität der hergestellten Prototypen	34
3.3.5 Zusammenfassung der Ergebnisse zur kontinuierlichen Kreisrohr- umformung	36
3.4 Umformgrenzen bei der Umformung endlosfaserverstärkter Kreisrohre . . .	36

4	Halbzeugentwicklung zur Umformung in nichtprismatische Profile	39
4.1	Auswirkungen der Einschnitte auf die mechanischen Eigenschaften	40
4.2	Experimentelle Untersuchungen der mechanischen Eigenschaften	43
4.2.1	Untersuchung der Bruchlasten in Abhängigkeit von der Überlappungslänge	45
4.2.2	Untersuchung der Bruchlasten in Abhängigkeit von der Schichtanzahl	46
4.2.3	Untersuchung der Bruchlasten in Abhängigkeit von der Schnittanordnung	48
4.3	Experimentelle Untersuchung der erforderlichen Umformkräfte	50
4.3.1	Untersuchung der Umformkräfte in Abhängigkeit von der Temperatur	51
4.3.2	Untersuchung der Umformkräfte in Abhängigkeit von der Überlappungslänge	52
4.4	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	53
5	Untersuchung des Umformverhaltens mit segmentierter Faserverstärkung	55
5.1	Beschreibung des hydraulischen Tiefungsversuchs	56
5.2	Experimentelle Untersuchung der Umformmechanismen	57
5.2.1	Beschreibung des Versuchsaufbaus	57
5.2.2	Herstellung und Eigenschaften der Probekörperplatten	60
5.2.3	Beschreibung der Versuchsdurchführung	61
5.2.4	Untersuchung der Probekörper	62
5.3	Zusammenfassung der Versuchsergebnisse	68
6	Auslegung und Herstellung von segmentierten Basisrohren	69
6.1	Das Schleuderverfahren zur Herstellung von endlosfaserverstärkten Thermoplastrohren	69
6.1.1	Herstellung segmentierter Basisrohre	71
6.2	Auslegung des Einschnittmusters	71
6.2.1	Das Einschnittmuster der Axiallagen	72
6.2.2	Das Einschnittmuster der Umfangslagen	72
6.2.3	Anpassung des Einschnittmusters an lokal unterschiedliche Umformgrade	76
6.3	Herstellung der segmentierten Halbzeugzuschnitte	77
6.3.1	Konzeptfindung für eine Schneidvorrichtung im Labormaßstab	78
6.3.2	Experimentelle Untersuchungen des Schneidvorgangs	79
6.3.3	Schneidvorrichtung zur semi-kontinuierlichen Einschnittfertigung	82
6.4	Herstellung der Basisrohre im Schleuderverfahren	83
6.4.1	Untersuchung der Möglichkeiten zur Beeinflussung der matrixreichen Zwischenschichten	84
6.4.2	Auswirkungen des Schleudervorgangs auf die Segmentierung	87
7	Entwicklung der Innendruckumformung für Faser-Thermoplast-Kreisrohre – Das IDU-Verfahren	89
7.1	Konzeption und Umsetzung der Versuchsanlage	89
7.1.1	Auswahl der Prototypgeometrie	91
7.1.2	Untersuchung möglicher Lösungsansätze	93

7.1.3	Versuchsaufbau zum Innendruck-Umformen	95
7.2	Ermittlung geeigneter Fertigungsparameter	97
7.2.1	Durchführung der Versuche	97
7.2.2	Einfluss der Fertigungsparameter	99
7.2.3	Bestimmung geeigneter Prozessparameter	101
7.3	Umformgrenzen in Abhängigkeit vom Laminataufbau	102
7.3.1	Einfluss der Schnittabstände	102
7.3.2	Einfluss der Anzahl aufeinanderfolgender Schichten gleicher Orientierung	104
7.3.3	Einfluss der Faserorientierung	104
7.3.4	Einfluss der Schnittbreiten	104
7.3.5	Zusammenfassung der Untersuchungsergebnisse und Hinweise zum Laminataufbau	105
7.4	Untersuchung der Prototypen	106
7.4.1	Untersuchung der Wanddicken	106
7.4.2	Untersuchung der Laminatqualität	108
7.4.3	Untersuchung der Überlappungslängen	111
7.4.4	Diskussion der Untersuchungsergebnisse	112
7.4.5	Ergänzende Hinweise zum Laminataufbau	113
7.5	Potenzial und Entwicklungsbedarf	113
7.5.1	Serienkonzept	114
8	Prozessmodellierung zum IDU-Verfahren	119
8.1	Berechnung der Aufheizzeiten im IDU-Verfahren	119
8.2	Modellierung des Umformverhaltens	121
8.2.1	Modellierung der Abgleitmechanismen mit kohäsivem Verhalten der Zwischenschicht	122
8.2.2	Zusammenfassung der Ergebnisse und Vergleich zu den Versuchsdaten	126
8.3	Modellierung der Rohraufweitung	127
8.3.1	Berechnung des Werkstoffmodells zur Abbildung der Abgleitmechanismen	128
8.3.2	Simulation des Umformvorgangs	130
8.4	Fazit zur Modellierung und Ausblick	133
9	Zusammenfassung und Ausblick	135
9.1	Zusammenfassung der Gestaltungsempfehlungen für das segmentierte UD-Band-Halbzeug	136
9.2	Ausblick	137
	Literaturverzeichnis	138
A	Anhang	149
A.1	Versuchsergebnisse	149
A.1.1	Experimentelle Untersuchung der mechanischen Eigenschaften . . .	149
A.1.2	Experimentelle Untersuchung der erforderlichen Umformkräfte . . .	151



Symbolverzeichnis

Abkürzungen

ABS	Acrylnitril-Butadien-Styrol
CAD	computergestütztes Konstruieren (engl.: <i>computer aided design</i>)
CF	Kohlenstofffaser (engl.: <i>carbon fibre</i>)
DSC	dynamische Differenzkalorimetrie (engl. <i>differential scanning calorimetry</i>)
FE	Finite Elemente
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FTV	Faser-Thermoplast-Verbund
GF	Glasfaser
HZ	Halbzeug
IDU	Innendruck-Umformung
IHU	Innenhochdruck-Umformung
IR	Infrarot
KV	Kreuzverbund
MSV	Mehrschicht-Verbund
PA	Polyamid
PK	Probekörper
PP	Polypropylen
RTM	Resin Transfer Moulding
S	Schnittebene
SBCF	stretch-broken-carbon-fibres
UD	unidirektional

Griechische Formelzeichen

		Einheit
α	Faserwinkel	°
β	Klingenwinkel	°
γ	Heizrate	K/min
ϕ	Schnittwinkel zur Faserrichtung	°
ρ	Dichte	g/cm ³
σ	Spannung	N/mm ²

τ	Schubspannungen	N/mm ²
ε	Dehnung	—
φ	Faservolumenanteil	—
φ	Umformgrad	—

Indizes

Ü	Überlappung
ü	Übergang
a	außen
a	axial
ab	abgeführt
B	Biegung
B	Bruch
E	Einschnitt
F	Fügeteil
f	Fließen
ges	gesamt
HK	Halbkugel
i	innen
k	Klebung
krit	kritisch
M	Mitte
max	maximal
min	minimal
N	normal
n	Schicht
Q	quer
r	radial
S	Schmelztemperatur
seg	Segment
stabil	Stabilisierung
T	Torsion
t	tangential
U	Umfang
U	Umformkraft
V	Vergleich



WZ	Werkzeug
Z	Zug
zu	zugeführt

Koordinatensysteme

r, φ, z	Zylinderkoordinatensystem
x, y, z	kartesisches Koordinatensystem

Lateinische Formelzeichen		Einheit
A	Fläche	mm ²
a	Profilabschnittslänge	mm
a	Schnittabstand	mm
b	Breite	mm
D	Durchmesser	mm
E	Elastizitätsmodul	N/mm ²
e	Eindringtiefe	mm
F	Kraft	N
H	Enthalpie	J
h	Höhe	mm
l	Länge	mm
M	Moment	Nm
m	Masse	kg
n	Anzahl	—
n	Drehzahl	U/min
p	Druck	bar
Q	Wärme	J
R	Festigkeit	N/mm ²
r	Radius	mm
s	Bogenlänge	mm
T	Temperatur	C
t	Wanddicke	mm
t	Zeit	Sekunde
U	Umfang	mm
v	Geschwindigkeit	mm/s
w	Maschinenweg	mm
$\bar{s}$	Standardabweichung	—