
**Beitrag zur konstruktiven Gestaltung hochbelastbarer
Strukturknoten aus Faser-Thermoplast-Verbunden**

Dem Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt

zur

Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

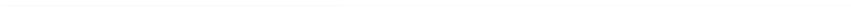
D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Dipl.-Ing. Matthias Schulitz

aus Hamburg

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner
Tag der Einreichung:	01.12.2015
Tag der mündlichen Prüfung:	10.02.2016



Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit
Faser-Kunststoff-Verbunden

Matthias Schulitz

**Beitrag zur konstruktiven Gestaltung hochbelastbarer
Strukturknoten aus Faser-Thermoplast-Verbunden**

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 978-3-8440-4375-4

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 *TU Darmstadt* von 2011 bis 2016.

Angeregt und betreut wurde die Arbeit vom Fachgebietsleiter Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann, dem ich für seine Unterstützung sowie für die zahlreichen Anregungen und konstruktiven Diskussionen besonders danken möchte.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Matthias Oechsner danke ich für die Begutachtung dieser Arbeit und die freundliche Bereitschaft zur Übernahme des Korreferats.

Der experimentelle Inhalt dieser Arbeit wäre ohne die große Unterstützung und Hilfsbereitschaft durch das Werkstattpersonal nicht möglich gewesen. Für die kompetente und gewissenhafte Anfertigung von Versuchsgerüsten und Probekörpern danke ich Herrn Thomas Kötting und Herrn Hasan Dadak sowie deren Mitarbeitern Martin Schwarz, Sebastian Locker und Volker Rosmann. Bei Herrn Dr.-Ing. Erich Blohberger möchte ich mich für die Unterstützung bei der Planung und Durchführung der zahlreichen Versuche bedanken.

Für die konstruktive und angenehme Zusammenarbeit möchte ich mich bei den an dieser Arbeit beteiligten Projektpartnern herzlich bedanken. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dr. Wolfgang Hahn von der *BMW Group* sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Reinhard Jakobi, Herrn Andreas Nixdorf und Herrn Dr. Tobias Pfefferkorn von der Firma *BASF*.

Bei meinen Kollegen möchte ich mich für die freundschaftliche und hilfsbereite Arbeitsatmosphäre bedanken. Die fachliche und moralische Unterstützung haben mir sehr geholfen. Ich werde die schöne gemeinsame Zeit in guter Erinnerung behalten.

Darmstadt, im März 2016

Matthias Schulitz



Inhaltsverzeichnis

Vorwort	I
Inhaltsverzeichnis	III
Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes	V
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	2
1.2 Eingrenzung der Problemstellung und Zielsetzung	4
2 Stand der Technik – Recherche zu Knotenverbindungen	7
2.1 Literaturrecherche zu Knotenverbindungen	7
2.2 Patentrecherche zu Knotenverbindungen.....	15
2.3 Fazit zum Stand der Technik – Entwicklungsbedarf.....	20
3 Anforderungen an Faser-Thermoplast-Verbund-Knotenstrukturen	21
3.1 Analyse der Beanspruchung von T-Knotenstrukturen.....	21
3.2 Zur steifigkeitsoptimalen Knoten-Gestaltung.....	26
3.3 Zur Konzeption des Krafterleitungsbereichs	27
3.3.1 Zur Herstellung thermoplastischer FKV-Profile	27
3.3.2 Zur Fügung von Knoten und angeschlossenem Profil	28
3.4 Zur Halbzeug- und Werkstoffauswahl	30
4 Konzeption und Herstellung eines HLV-Spritzgussknotens	33
4.1 Zielsetzung und Knoten-Konzept.....	34
4.2 Fertigungskonzept – Vorüberlegungen	39
4.2.1 Fertigungsprozess – Übersicht	39
4.2.2 Kraftübertragung zwischen Einleger und Umspritzung	40
4.2.3 Positionierung und Fixierung der Einleger	41
4.2.4 Herstellung des Kraftfluss-Kreuzungspunkts	43
4.2.5 Umgesetzte Knoten-Geometrie.....	44
4.2.6 Prozessfenster – Aufheiztemperatur und Transferzeit	45
4.3 Prototypische Herstellung	47
4.3.1 Herstellung der Einleger	47
4.3.2 Anspritzkonzept	49
4.3.3 Aufheizen und Handhabung der Einleger.....	50
4.3.4 Ergebnisse der Spritzgießversuche	52
4.4 Fazit und Gestaltungshinweise zur fertigungsgerechten Konstruktion.....	57

5 FE-Analyse und experimentelle Validierung eines HLV-Spritzgussknotens	61
5.1 Numerische Analyse der Knotenstruktur.....	61
5.1.1 Auslegung, Randbedingungen und Annahmen	61
5.1.2 Allgemeine Spannungsanalyse.....	63
5.1.3 Analyse der Aufziehspannungen.....	65
5.1.4 Untersuchung der Knoten-Steifigkeit	67
5.2 Experimentelle Untersuchungen.....	68
5.2.1 Versuchsaufbau, Randbedingungen.....	68
5.2.2 Ergebnisse	70
5.3 Vergleich von Berechnung und Versuch.....	78
5.4 Fazit und Gestaltungshinweise für HLV-Spritzgussknoten	80
6 Konstruktive Vermeidung der Aufziehspannungen – der Wurzelknoten	81
6.1 Konzeption und Voruntersuchungen	81
6.1.1 Konstruktionsprinzip	81
6.1.2 Varianten und Fertigungskonzepte	82
6.1.3 Vergleich des <i>Wurzelknotens</i> mit anderen Bauweisen	84
6.2 Numerische Optimierung des <i>Wurzelknotens</i>	87
6.2.1 Randbedingungen und Parameter	87
6.2.2 Herleitung der Gurt-Übergangsfläche	89
6.2.3 Analyse der Aufziehspannungen.....	92
6.2.4 Untersuchung der Knotensteifigkeit.....	93
6.2.5 Allgemeine Spannungsanalyse – optimierte Struktur.....	95
6.3 Experimentelle Untersuchung des <i>Wurzelknotens</i>	97
6.3.1 Probekörperherstellung, Versuchsplan.....	97
6.3.2 Versuchsergebnisse – Versagensablauf.....	99
6.3.3 Zusammenfassung der Ergebnisse – Vergleich mit FE-Analyse.....	102
6.4 Fazit und Gestaltungshinweise zum <i>Wurzelknoten</i>	104
7 Zusammenfassung und Ausblick	107
7.1 Fazit und Einordnung der entwickelten Bauweisen	108
7.2 Ausblick.....	109
Literaturverzeichnis	113
Betreute studentische Arbeiten	120
Anhang	121
A Werkstoffkennwerte	121
B Technische Zeichnungen	122