

---

# 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

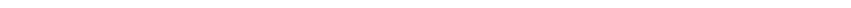
D i s s e r t a t i o n

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto: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

---

<b>Vorwort</b>	<b>I</b>
<b>Inhaltsverzeichnis</b>	<b>III</b>
<b>Abkürzungen, Formelzeichen und Indizes</b>	<b>V</b>
<b>1 Einleitung</b>	<b>1</b>
1.1 Motivation .....	2
1.2 Eingrenzung der Problemstellung und Zielsetzung .....	4
<b>2 Stand der Technik – Recherche zu Knotenverbindungen</b>	<b>7</b>
2.1 Literaturrecherche zu Knotenverbindungen .....	7
2.2 Patentrecherche zu Knotenverbindungen.....	15
2.3 Fazit zum Stand der Technik – Entwicklungsbedarf.....	20
<b>3 Anforderungen an Faser-Thermoplast-Verbund-Knotenstrukturen</b>	<b>21</b>
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
<b>4 Konzeption und Herstellung eines HLV-Spritzgussknotens</b>	<b>33</b>
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

<b>5 FE-Analyse und experimentelle Validierung eines HLV-Spritzgussknotens</b>	<b>61</b>
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
<b>6 Konstruktive Vermeidung der Aufziehspannungen – der Wurzelknoten</b>	<b>81</b>
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
<b>7 Zusammenfassung und Ausblick</b>	<b>107</b>
7.1 Fazit und Einordnung der entwickelten Bauweisen .....	108
7.2 Ausblick.....	109
<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>113</b>
<b>Betreute studentische Arbeiten</b>	<b>120</b>
<b>Anhang</b>	<b>121</b>
A Werkstoffkennwerte	121
B Technische Zeichnungen	122