

Jürgen Denonville, Walter Haase,
Werner Sobek, Kim Riedmüller, Mathias Liewald

Materialgerechtes Fügen von Faserverbundprofilen

F 2925

Bei dieser Veröffentlichung handelt es sich um die Kopie des Abschlussberichtes einer vom Bundesministerium für Verkehr, Bau und Stadtentwicklung -BMVBS- im Rahmen der Forschungsinitiative »Zukunft Bau« geförderten Forschungsarbeit. Die in dieser Forschungsarbeit enthaltenen Darstellungen und Empfehlungen geben die fachlichen Auffassungen der Verfasser wieder. Diese werden hier unverändert wiedergegeben, sie geben nicht unbedingt die Meinung des Zuwendungsgebers oder des Herausgebers wieder.

Dieser Forschungsbericht wurde mit modernsten Hochleistungskopierern auf Einzelanfrage hergestellt.

Die Originalmanuskripte wurden reprototechnisch, jedoch nicht inhaltlich überarbeitet. Die Druckqualität hängt von der reprototechnischen Eignung des Originalmanuskriptes ab, das uns vom Autor bzw. von der Forschungsstelle zur Verfügung gestellt wurde.

© by Fraunhofer IRB Verlag

2014

ISBN 978-3-8167-9391-5

Vervielfältigung, auch auszugsweise,
nur mit ausdrücklicher Zustimmung des Verlages.

Fraunhofer IRB Verlag

Fraunhofer-Informationszentrum Raum und Bau

Postfach 80 04 69

70504 Stuttgart

Nobelstraße 12

70569 Stuttgart

Telefon 07 11 9 70 - 25 00

Telefax 07 11 9 70 - 25 08

E-Mail irb@irb.fraunhofer.de

www.baufachinformation.de

www.irb.fraunhofer.de/tauforschung

Forschungsprojekt

Materialgerechtes Fügen von Faserverbundprofilen

Abschlussbericht

August 2014



Universität Stuttgart

*Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren
(ILEK)*

M. Eng. Jürgen Denonville

Dr.-Ing. Walter Haase

Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr. h.c. Werner Sobek

Institut für Umformtechnik (IFU)

Dipl.-Ing. Kim Riedmüller

Prof. Dr.-Ing. Dr. h.c. Mathias Liewald MBA

Forschungsprojekt	Entwicklung von materialgerechten Füge- verbundwerkstoffprofilen durch Realisierung eines Übergangs des Matrixwerkstoffs von Polymerharzen zu Metallen im Knotenpunkt der Lasteinleitung
Kurztitel	Materialgerechtes Fügen von Faserverbundprofilen (MaFüFa)
Förderstelle	Forschungsinitiative Zukunft Bau Bundesinstitut für Bau-, Stadt- und Raumforschung (BBSR) im Bundesamt für Bauwesen und Raumordnung (BBR) Deichmanns Aue 31-37 53179 Bonn (Germany)
Förderkennzeichen	SF-10.08.18.7-10.22 / II 3-F20-10-1-054
Bearbeitungszeitraum	01.01.2011 bis 31.08.2014
Bearbeitungsstellen	<i>Universität Stuttgart</i> <i>Institut für Leichtbau Entwerfen und Konstruieren (ILEK)</i> Direktor: Prof. Dr.-Ing. Dr.-Ing. E.h. Dr.h.c. Werner Sobek Forschungsleiter: Dr.-Ing. Walter Haase Pfaffenwaldring 7 + 14 70569 Stuttgart Telefon 0711 / 685 63599 Telefax 0711 / 685 66968 <i>Universität Stuttgart</i> <i>Institut für Umformtechnik (IFU)</i> Direktor: Prof. Dr.-Ing. Dr.h.c. Mathias Liewald MBA Holzgartenstraße 17 70174 Stuttgart Telefon 0711 / 685 83840 Telefax 0711 / 685 83839
Bearbeiter	M. Eng. Jürgen Denonville (ILEK) Dipl.-Ing. Kim Riedmüller (IFU)

Der Forschungsbericht wurde mit Mitteln der Forschungsinitiative Zukunft Bau des Bundesamtes für Bauwesen und Raumordnung gefördert (AktENZEICHEN SF-10.08.18.7-10.22 / II 3-F20-10-1-054). Die Verantwortung für den Inhalt des Berichts liegt bei den Autoren.

Abschnitte dieses Forschungsberichts sind eine genehmigte Vorveröffentlichung der Dissertation von Herrn Jürgen Denonville [1] und stimmen mit dieser zum Teil inhaltlich und wörtlich überein.

Dieser Bericht umfasst 165 Seiten im Hauptteil und 2 Seiten im Anhang.

Stuttgart, 31.08.2014

Inhalt

1	Einleitung.....	1
1.1	Faser-Kunststoff-Verbundwerkstoffe im Bauwesen	1
1.2	Problemstellung	2
1.3	Lösungsansatz	3
1.4	Realisierung	4
1.5	Ziele	4
2	Durchführung der Forschungsaufgabe	5
2.1	Beantragter Arbeitsplan	5
2.2	Durchgeführte Tätigkeiten	6
2.3	Gliederung	8
3	Grundlagen (AP2)	9
3.1	Faserverbundwerkstoffe	9
3.1.1	Begriffsdefinitionen	9
3.1.2	Wirkungsprinzip.....	10
3.2	Fasern.....	11
3.2.1	Allgemeines	11
3.2.2	Glasfaser	11
3.2.3	Kennwerte der verwendeten Glasfaser	14
3.2.4	Carbonfaser	14
3.2.5	Kennwerte der verwendeten Carbonfaser	15
3.3	Matrixwerkstoffe	16
3.3.1	Polymere	16
3.3.2	Metalle.....	17
3.4	Herstellung von Faser-Kunststoff-Verbunden.....	18
3.4.1	Allgemeines	18
3.4.2	Angewandtes Verfahren für die Probekörperherstellung.....	19
3.5	Herstellung von Faser-Metall-Verbunde.....	20
3.5.1	Allgemeines	20
3.5.2	Permeabilität (Durchlässigkeit).....	21
3.5.3	Umformen im teilerstarten Zustand	22
3.5.4	Grenzflächenreaktionen bei FMV	24
3.6	Mechanische Eigenschaften	27
3.6.1	Allgemeines	27
3.6.2	Spannungsverteilung in Faserrichtung	27
3.6.3	Materialeigenschaften einer UD-Schicht.....	28

3.6.4	Bruchgeschehen.....	28
3.7	Korrosionsverhalten.....	29
4	Verbindungen.....	30
4.1	Allgemeines.....	30
4.2	Lochleibungsverbindungen.....	33
4.3	Bemessungsregeln für Lochleibungsverbindungen.....	35
4.3.1	FKV-Bemessungsregeln.....	35
4.3.2	GfK-Pultrusionsprofile der Firma Fiberline	37
4.3.3	GfK mit S-Glasfasern	39
4.3.4	CfK	40
4.3.5	Aluminium.....	41
4.3.6	Metallische Verbundwerkstoffe.....	43
4.4	Referenzwerte	44
4.4.1	Bauteilgeometrie	44
4.4.2	Traglasten der Vergleichsbauteile	45
5	Das neu entwickelte Herstellungsverfahren (AP3 und AP4).....	47
5.1	Randbedingungen.....	47
5.2	Wesentliche Änderung gegenüber dem Thixoschmiedeverfahren	48
5.3	Festlegung der Bauteilgeometrie.....	48
5.4	Bewertung unterschiedlicher Werkzeugkonzepte	50
5.5	Konstruktion des Formgebungswerkzeugs	52
5.6	Simulative Auslegung des Formgebungswerkzeugs.....	54
5.6.1	Thermodynamische Auslegung des Formgebungswerkzeugs.....	54
5.6.2	Simulation des Materialflusses in der Werkzeugkavität.....	56
5.7	Fertigung des entwickelten Formgebungswerkzeugs.....	59
5.8	Verfahrensablauf.....	60
5.9	Parameterstudie zur Maximierung des Faservolumengehalts	61
5.9.1	Parameter	61
5.9.2	Einschränkungen	61
5.9.3	Bewertungskriterium.....	61
5.9.4	Ergebnisse der Parameterstudie.....	63
5.10	Beschreibung der erreichten Bauteilqualität.....	68
5.10.1	Äußeres Erscheinungsbild der hergestellten Bauteile	68
5.10.2	Infiltrationsgüte der Fasern und Materialqualität der Aluminiummatrix.....	70
5.11	Zusammenfassung	71
6	Experimentelle Untersuchungen (AP5).....	72
6.1	Zugversuche.....	73
6.1.1	Untersuchte Parameter	73
6.1.2	Systematik der Probekörperbezeichnung	73
6.1.3	Probekörpergeometrie und Herstellung	73
6.1.4	Versuchsdurchführung.....	75

6.1.5	Messtechnik zur Dehnungsmessung.....	75
6.1.6	Vorversuche	75
6.1.7	Bezeichnungssystematik für die Ergebnisdarstellung.....	77
6.1.8	Versuchsergebnisse des Aluminiumgrundwerkstoffs	78
6.1.9	Versuchsergebnisse der Aluminium-Carbonfaser-Proben (Al_C2).....	79
6.1.10	Versuchsergebnisse der Aluminium-Carbonfaser-Proben (Al_C4).....	81
6.1.11	Versuchsergebnisse der Aluminium-Carbonfaser-Proben (Al_C8).....	83
6.1.12	Versuchsergebnisse der Aluminium-Glasfaser-Proben (Al_G2).....	85
6.1.13	Versuchsergebnisse der Aluminium-Glasfaser-Proben (Al_G4).....	87
6.1.14	Versuchsergebnisse der Aluminium-Glasfaser-Proben (Al_G8).....	89
6.1.15	Diskussion der Ergebnisse der Aluminiumproben.....	91
6.1.16	Diskussion der Ergebnisse der Aluminium-Carbonfaser-Proben.....	94
6.1.17	Diskussion der Ergebnisse der Aluminium-Glasfaser-Proben.....	100
6.1.18	Zusammenfassung aller Zugversuche.....	103
6.2	Auszugsversuche	104
6.2.1	Randbedingungen und Annahmen	104
6.2.2	Probekörpergeometrie	105
6.2.3	Probekörperherstellung	106
6.2.4	Systematik der Probekörperbezeichnung.....	107
6.2.5	Messtechnik zur Dehnungsmessung.....	107
6.2.6	Versuchsdurchführung	107
6.2.7	Ergebnisse der Auszugsversuche an Carbonfaserproben	108
6.2.8	Ergebnisse der Auszugsversuche an Glasfaserproben	113
6.2.9	Diskussion und Bewertung der Auszugsversuche.....	118
6.3	Bauteilversuche an Lochleibungsverbindungen.....	119
6.3.1	Probekörper	119
6.3.2	Probekörperherstellung	120
6.3.3	Messtechnik zur Dehnungsmessung.....	121
6.3.4	Versuchsanordnung	122
6.3.5	Versuchsdurchführung	122
6.3.6	Ergebnisse der Bauteile mit Carbonfasern	123
6.3.7	Ergebnisse der Bauteile mit Glasfasern	126
6.3.8	Diskussion und Bewertung der Ergebnisse der Bauteilversuche.....	129
7	Numerische Untersuchungen	131
7.1	Allgemeines	131
7.2	Annahmen	133
7.2.1	Verbundverhalten von Faser und Matrix	133
7.2.2	Annahmen zu den Fasereigenschaften.....	133
7.2.3	Annahmen zum Matrixwerkstoff.....	134
7.2.4	Materialkennwerte der Verbundpartner.....	135
7.2.5	Versagenskriterien	135
7.3	Bauteilversuche	138
7.3.1	Modellierung	138
7.3.2	Validierung des numerischen Modells	139
7.3.3	Prognose der Bauteilbruchkräfte	144
7.3.4	Bewertung der Ergebnisse	146
7.4	Optimierung des Übergangs von der polymeren zur metallischen Matrix	149

7.4.1	Modellierung des Übergangs	150
7.4.2	Ergebnisse der numerischen Berechnungen des optimierten Übergangs.....	151
8	Zusammenfassung und Ausblick	152
8.1	Zusammenfassung	152
8.2	Ausblick.....	153
8.2.1	Verwendung im Bauwesen	153
8.2.2	Verwendung in anderen Bereichen.....	153
8.2.3	Weiterentwicklungsansätze	154
	Literatur	155
	Abbildungsverzeichnis	159
	Tabellenverzeichnis	164
	Anhang	A
	Anhang 1 Ergebnisse der Zugversuche aus [71].....	A