

„Hybride Fügeverfahren für die Reparatur  
faserverstärkter Kunststoffe“

„Hybrid Joining Technologies for the Repair of Composites“

Von der Fakultät für Maschinenwesen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften genehmigte Dissertation

vorgelegt von

Philipp Abel

Berichter: Univ.-Prof. Professor h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing.  
Thomas Gries  
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Kai-Uwe Schröder

Tag der mündlichen Prüfung: 14.04.2016



Textiltechnik/Textile Technology

herausgegeben von

Univ. Prof. Professor h. c. (MGU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries

**Philipp Abel**

**Hybride Fügeverfahren für die Reparatur  
faserverstärkter Kunststoffe**

Shaker Verlag  
Aachen 2017

**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.: D 82 (Diss. RWTH Aachen University, 2016)

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5084-4

ISSN 1618-8152

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)

Teile dieser Arbeit basieren auf den Ergebnissen der von mir betreuten studentischen Arbeiten. Eine bibliographische Auflistung befindet sich am Ende des Literaturverzeichnisses.



## Vorwort

Die Vorliegende Dissertation entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University in den Jahren 2011 bis 2016. Wesentliche Teile des Inhalts wurden im Rahmen des Forschungsprojekts „Reparatur struktureller Bauteile aus faserverstärktem Kunststoff mit zusätzlicher Vernähung der Fügestelle - StructRepair+“ erarbeitet, welches in Kooperation zwischen dem ITA und dem Department Fahrzeugtechnik und Flugzeugbau der HAW Hamburg von 2013 bis 2016 durchgeführt wurde (IGF-Vorhaben Nr.: 17972 N).

Während der Promotionszeit haben mich viele Menschen in unterschiedlichster Weise unterstützt. Professor Thomas Gries danke ich für die Betreuung der Promotion. Die Verbindlichkeit unserer Absprachen zum Inhalt dieser Arbeit haben mir in der schwierigen Phase der Fertigstellung stets klare Leitlinien gegeben. Professor Kai-Uwe Schröder danke ich für die fachlichen Anmerkungen und für die Erinnerung an die einen oder anderen Grundlagen der Mechanik. Ein besonderer Dank gilt Markus Linke, der meine Promotion von den ersten Schritten am Institut bis zur Doktorprüfung begleitet und in vielfältiger Weise unterstützt hat. Danken möchte ich auch den vielen Kollegen am Institut, die durch fachliche Diskussion zum Inhalt dieser Dissertation beigetragen haben. In den Monaten des Schreibens war es besonders Christian, der mir wie kein anderer Kollege geholfen hat, am Ball zu bleiben.

Ohne meine Studenten, die in ihren Arbeiten Teilaspekte dieses umfangreichen Projekts untersucht haben und als Hiwis oder Praktikanten unermüdlich Proben gefertigt haben, wäre diese Arbeit nicht denkbar. Auch ihnen gilt mein besonderer Dank.

Meinen Eltern danke ich besonders dafür, dass sie während der langen Durststrecken auf dem Weg durch Studium und Promotion stets hinter mir standen.

Und schließlich: Ohne Simones Motivation, Geduld und tatkräftige Hilfe wäre diese Arbeit wohl heute noch nicht fertig. Sie hat während der Fertigstellung viel ertragen müssen und ich wünsche mir, ihr bei ihrer Arbeit eine ebensolche Stütze sein zu dürfen, wie sie es für mich gewesen ist.



# Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	5
2	Fügeverfahren für Faserverbundwerkstoffe	9
2.1	Mechanische, kraft- und formschlüssige Fügeverfahren	9
2.2	Klebeverbindungen faserverstärkter Kunststoffe	11
2.3	Hybride Fügeverfahren im Leichtbau	13
3	Reparatur faserverstärkter Kunststoffe	17
3.1	Schäden an FVK-Bauteilen	19
3.2	Reparaturprozess für monolithische Bauteile	25
3.2.1	Schadenserkennung	25
3.2.2	Materialabtragende Vorbehandlung der Reparaturstelle	26
3.2.3	Fügeverfahren für die Reparatur	28
3.3	Reparaturverfahren für Kernverbundbauteile	31
3.4	Anwendungsspezifische Anforderungen an die Reparatur	33
3.4.1	Lufffahrt	34
3.4.2	Windkraft	35
3.4.1	Bootsbau und Marineanwendungen	36
3.5	Bewertung zum Stand der Technik der FVK-Reparatur	36
4	Zielsetzung und Lösungsweg	38
4.1	Technische Entwicklungsziele	38
4.2	Methodisches Vorgehen und Struktur der Arbeit	39
4.3	Einordnung der Arbeitsinhalte in Technologiereifegrade	41
5	Potenzialbewertung	43
5.1	Ansätze zur Weiterentwicklung der geklebten Reparatur	43
5.1.1	Oberflächenvorbehandlung	43
5.1.2	Geometrie	44
5.1.3	Automatisierung und integrierte Qualitätssicherung	45

5.1.4	Hybridisierung	45
5.2	Bewertung der technologischen Ansätze	49
5.3	Ex-ante-Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	52
5.3.1	Beschreibung der betrachteten Szenarien	53
5.3.2	Kostenmodell zur Abschätzung der Wirtschaftlichkeit eines neuen Reparaturverfahrens	55
5.3.3	Kostenstruktur der hybriden Reparatur	57
5.3.4	Weitere Faktoren für den wirtschaftlichen Erfolg eines Reparaturverfahrens	60
6	Entwicklung der Fertigungstechnik	61
6.1	Beschreibung des Fertigungsverfahrens und Festlegung der zu untersuchenden Parameter	61
6.2	Fertigung textiler Reparaturpflaster	64
6.3	Einbringen der Nahtlöcher	68
6.3.1	Bohren für Probenfertigung	69
6.3.2	Bohren in der mobilen Anwendung	71
6.4	Einbringen des Verstärkungsroving	72
6.4.1	Schädigung der Verstärkungsfasern	72
6.4.2	Verschiebung von Nähfäden und Reparaturpflaster im Nähprozess	74
6.4.3	Nahteinbringung mit einseitigem Zugang	75
6.5	Imprägnierung von Reparaturpflaster und Verstärkung	83
6.5.1	Vakuuminfusionsverfahren für Couponproben	84
6.5.2	Vakuuminfusionsverfahren für Probenplatten	87
6.5.3	Übertragbarkeit auf die mobile Reparatur	88
6.6	Zusammenfassung der Untersuchungen zur Fertigungstechnik	89
7	Untersuchungen zur Strukturmechanik	91
7.1	Untersuchungsraum und Prüfplan	91
7.1.1	Vorgehen zur strukturmechanischen Untersuchung	92
7.1.2	Festlegung der festen und variablen Parameter der Fügung	93

7.2	Anpassung und Entwicklung von Prüfungen zur Charakterisierung der Reparatur	97
7.2.1	Biegeprüfung für Coupons	97
7.2.2	Druckprüfung für Probenplatten	101
7.3	Auslegung genieteter Vergleichsfügungen	106
7.4	Numerische Berechnung textilverstärkter Hybridfügungen	108
7.4.1	Aufbau des Finite Elemente-Modells	108
7.4.2	Durchgeführte Rechnungen und Parameterstudien	110
7.5	Ergebnisse der strukturmechanischen Untersuchungen	111
7.5.1	Einflüsse von Material und geometrischen Parametern	111
7.5.2	Einfluss der zur Verstärkung eingebrachten Fasermenge	114
7.5.3	Untersuchung der Verformung in der Fügestelle	116
7.5.4	Einfluss der Oberflächenbehandlung mit Atmosphärendruckplasma	120
7.5.5	Vergleich mit der hybriden Fügung aus Klebung und Niet auf Couponebene	121
7.5.6	Ergebnisse der Versuche auf Elementebene	122
7.6	Gewicht der Reparatur	124
7.7	Zusammenfassung der Untersuchungen zur Strukturmechanik	128
8	Technische Bewertung der hybriden Reparatur	129
8.1	Beschreibung der zu bewertenden Reparaturverfahren für die betrachteten Szenarien	129
8.1.1	Die hybride Reparatur	129
8.1.2	Vergleichsreparaturen nach Stand der Technik	131
8.2	Abschließende technische Bewertung	133
8.2.1	Bewertungskriterien und Gewichtung	133
8.2.2	Ergebnis der technischen Bewertung	134
9	Wirtschaftliche Bewertung der hybriden Reparatur	137
9.1	Prozesszeiten für die untersuchten Reparaturverfahren	137
9.2	Berechnung der direkten Prozesskosten für die betrachteten Reparaturverfahren	138

---

9.3	Berechnung der Ausfallkosten für die betrachteten Szenarien	139
9.4	Gesamtkosten der betrachteten Reparaturverfahren	140
9.5	Kosten der hybriden Reparatur bei Ausschöpfung des aufgezeigten Entwicklungspotenzials	142
10	Zusammenfassung	145
11	Ausblick	149
11.1	Erforderliche strukturelle Untersuchungen	149
11.2	Notwendige Weiterentwicklung der Fertigungstechnik	150
11.3	Übertragbarkeit auf weitere Anwendungen und langfristige Effekte	150
12	English Summary	151
13	Literaturverzeichnis	154
14	Anhang	171
14.1	Definition der Technologiereifegrade	171
14.2	Prüfvorschriften zu den entwickelten Prüfungen	172
14.2.1	4-Punkt-Biegeprüfung	172
14.2.2	Plattendruckprüfung	173
14.3	Kostenstruktur der FVK-Reparatur	175
14.4	Prozesszeiten für Grundmaterial CFK	178