

**„Produktorientierte Auswahl von Verfahren zur Vorfixierung
textiler Preforms“**

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

vorgelegt von

Josef Bernhard Klingele

Berichter: Univ.-Prof. Prof. h.c. (RU) Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries
Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm

Tag der mündlichen Prüfung: 23.04.2014

Textiltechnik/Textile Technology

herausgegeben von

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

Josef Klingele

**Produktorientierte Auswahl von Verfahren
zur Vorfixierung textiler Preforms**

Shaker Verlag
Aachen 2014

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, 2014)

Copyright Shaker Verlag 2014

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-2918-5

ISSN 1618-8152

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

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

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Zeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University (2009 – 2014).

Mein besonderer Dank gilt Univ.-Prof. Prof. h.c. Dr.-Ing. Dipl.-Wirt. Ing. Thomas Gries für die inhaltliche Betreuung und die konstruktiven Diskussionen während der Promotion. Für die Übernahme des Koreferats und die gute Zusammenarbeit im Bereich des Binderpreforming danke ich Prof. Dr.-Ing. Prof. h.c. Stefan Böhm. Weiterhin möchte ich mich bei Prof. Dr. rer. nat. Werner Karl Schomburg für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes bedanken.

Teile dieser Arbeit stellen Ergebnisse des Projektes *Binderpreforming für Schalenstrukturen (AiF 16428 N)* im DFG-AiF-Cluster *Leichtbau und Textilien* dar. Ich danke den Koordinatoren des ITM Dresden und allen Projektpartnern für die gute Zusammenarbeit. Weitere Teile der Arbeit entstammen dem Projekt *Preformnähen (ZIM KF 2497125PK1)*. Ich danke den Projektpartnern der Emil Stutznacker GmbH, Köln für die gute Kooperation.

Mein großer Dank gilt darüber hinaus allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des ITA für die zahlreichen Diskussionen und die stets kollegiale Atmosphäre. Besonders möchte ich mich in dieser Hinsicht bei meinen Kollegen Mesut Cetin, Christoph Greb, Markus Linke und Philipp Schuster bedanken. Zum Gelingen der Arbeit hat eine Vielzahl von Studenten durch die im Anhang genannten wissenschaftlichen Arbeiten wesentlich beigetragen. Für das große Engagement bei der Bedienung der Maschinen und Anlagen danke ich meinen studentischen Hilfskräften Andreas Nonn, Benno Richardt, Sebastian Oppitz, Johannes Schumacher, Jennifer Puschke und Johannes Rothe. Den Kolleginnen aus dem Sekretariat danke ich für die Unterstützung bei der Organisation der Promotionsprüfung. Für die Übernahme des Lektorats und die kritischen Anmerkungen danke ich herzlich Christiane Cremer und Dieter Veit.

Darüber hinaus gilt mein tiefster Dank meinen Freunden, meinen Geschwistern, meinen Eltern Ludwig und Johanna sowie meiner Freundin Raphaela für die ständige Unterstützung - besonders in der Endphase der Promotion.

Aachen, im Juli 2014

Josef Klingele

Inhaltsverzeichnis

1	Einleitung	1
1.1	Ausgangssituation und Anlass für die Arbeit	1
1.2	Zentrale Defizite und daraus abgeleitete Ziele der Arbeit	3
1.3	Ansatz zur Erreichung der Ziele	4
1.4	Aufbau der Arbeit	5
2	Faserverbundkunststoffe: Materialien und Verfahren	8
2.1	Verbundwerkstoffe für technische Anwendungen	8
2.2	Anwendungsgebiete und Motivation für den industriellen Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen	9
2.3	Materialien für Faserverbundkunststoffe	12
2.3.1	Matrixmaterialien	12
2.3.2	Faserwerkstoffe	15
2.3.3	Textile Strukturen	17
2.4	Herstellverfahren für Faserverbundkunststoffe	20
2.5	Textiles Preforming für Faserverbundkunststoffe	21
2.5.1	Handhabung	22
2.5.2	Trennen und Zuschnitt	28
2.5.3	Fügeverfahren	32
2.5.4	Fügen mit Bindermaterialien	35
2.5.4.1	Binder für verbesserte Composite-Eigenschaften	42
2.5.4.2	Binder als Prozesshilfsmittel	43
2.5.5	Fügen mit Nähverfahren	46
2.5.5.1	Nähen für verbesserte Composite-Eigenschaften	51
2.5.5.2	Nähen als Prozesshilfsmittel	55
2.5.6	Qualitätssicherung	56
2.5.7	Prozesskettenentwicklung	58
3	Methodisches Vorgehen	61
3.1	Identifikation der Anforderungen	63
3.1.1	Technische Anforderungen	63

3.1.2	Wirtschaftliche Anforderungen	66
3.1.3	Ableitung und Gewichtung der Prozessanforderungen	72
3.2	Technologievorauswahl	74
3.3	Technologieentwicklung	77
3.4	Technologiebewertung	80
3.5	Prozesskettenentwicklung	87
3.6	Technisch-wirtschaftliche Bewertung	88
3.7	Zusammenfassung und Eingrenzung des Betrachtungsrahmens	89
4	Identifikation der Anforderungen	91
4.1	Definition des charakteristischen Referenzbauteils	91
4.2	Technische Anforderungen	93
4.3	Wirtschaftliche Anforderungen	95
4.3.1	Umfeldanalyse zu Leichtbaustrategien im Mobilitätssektor	95
4.3.2	Analogieverfahren – Aluminium und CFK	98
4.3.3	Aluminium und CFK im S-Kurvenmodell	101
4.4	Ableiten von Zielgrößen der Verfahren zur Vorfixierung der Referenzstrukturen	105
4.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen	108
5	Technologievorauswahl	110
5.1	Prozessfähigkeiten von Nähverfahren	111
5.2	Prozessfähigkeiten von Verfahren zum Binderauftrag	113
5.3	Prozessfähigkeiten von Verfahren zur Binderaktivierung	116
5.4	Technologie-Ranking und Vorauswahl von Verfahren zur Vorfixierung textiler Preforms	118
5.5	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen aus der Technologievorauswahl	120
6	Technologieentwicklung Binderpreforming	122
6.1	Technologieentwicklung „Binder auftragen“	123
6.2	Technologieentwicklung „Preform aktivieren“	128

6.3	Zusammenfassung und Darstellung der Prozesskette zur Herstellung von Binderpreform-Prüfkörpern	133
7	Technologiebewertung Binderpreforming	135
7.1	Mechanische Eigenschaften von Binderpreforms	135
7.2	Verteilung des Bindermaterials im Preform	139
7.3	Infusionsverhalten und mechanische Eigenschaften konsolidierter Binderpreforms	142
7.4	Handhabungseigenschaften beiderter Preforms	146
7.5	Energetische Betrachtung des Aktivierungsprozesses	149
7.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die Prozesskettenentwicklung	150
8	Technologieentwicklung Preformnähen	151
8.1	Technologieentwicklung „Handhaben“	152
8.2	Technologieentwicklung „Vernähen“	156
8.3	Zusammenfassung und Darstellung der Prozesskette zur Herstellung von Prüfkörpern	161
9	Technologiebewertung Preformnähen	163
9.1	Greifertypen für die Handhabung von Textilien, Schaummaterial und metallischen Inserts	163
9.2	Mechanische Kennwerte vernähter Preforms	166
9.3	Mechanische Kennwerte von Laminaten aus vernähten Preforms	172
9.4	Bewertung der Schnittkante vernähter Preforms	176
9.5	Handhabungseigenschaften vernähter Preforms	180
9.6	Zusammenfassung und Schlussfolgerungen für die Prozesskettenentwicklung	182
10	Prozesskettenentwicklung	184
10.1	Entwicklung einer Prozesskette zur Fertigung textiler Preforms in einer industrienahen Umgebung (Fertigungsfolge 1)	184

10.2	Entwicklung einer Prozesskette zur industriellen Serienfertigung (Fertigungsfolge 2)	191
10.3	Fehlermöglichkeits- und Einfluss-Analyse (FMEA) der Herstellungsprozesse	197
10.4	Zusammenfassung der Ergebnisse zur Prozesskettenentwicklung	201
11	Technisch-wirtschaftliche Bewertung	203
11.1	Herstellung des Referenzbauteils und technische Bewertung	203
11.2	Wirtschaftliche Bewertung und Vergleich der Prozessketten	207
11.3	Vergleich der Prozessketten mit alternativen Ansätzen zur Fertigung des Demonstratorbauteils	212
11.4	Anwendbarkeit der Ergebnisse auf andere Zielanwendungen und Materialkombinationen	215
11.5	Technologietransfer und wirtschaftliche Nutzung der Ergebnisse	219
12	Zusammenfassung und Ausblick	228
13	Summary and Outlook	234
14	Literaturverzeichnis	239
15	Betreute studentische Arbeiten	262
16	Abkürzungsverzeichnis	266
17	Anhang	270
17.1	Anhang A: Stand der Technik	270
17.2	Anhang B: Technologievorauswahl	276
17.3	Anhang C: Technisch-wirtschaftliche Bewertung	278
18	Persönlicher Werdegang	281