Eine Instandsetzungssystematik für Bauteile aus Kohlenstofffaserverbundwerkstoff

Von der Fakultät für Ingenieurwissenschaften

der Universität Bayreuth

zur Erlangung der Würde eines

Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

genehmigte Dissertation

von
Dipl.-Ing. Florian Ellert
aus
Weiden i.d.OPf.

Erstgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper
Zweitgutachter:	Prof. Dr.-Ing. Michael Zäh
Tag der mündlichen Prüfung:	16.01.2015

Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik
Universität Bayreuth
2015

Fortschritte in Konstruktion und Produktion

herausgegeben von
Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg und
Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

Band 29

Florian Ellert

Eine Instandsetzungssystematik für Bauteile aus Kohlenstofffaserverbundwerkstoff

Shaker Verlag
Aachen 2015

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.: Bayreuth, Univ., Diss., 2015

Copyright Shaker Verlag 2015
Alle Rechte, auch das des auszugsweisen Nachdruckes, der auszugsweisen oder vollständigen Wiedergabe, der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen und der Übersetzung, vorbehalten.

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-3441-7
ISSN 1612-2364

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

Geleitwort der Herausgeber

Das erfolgreiche Industrieunternehmen von heute ist ein aktives Element der global zunehmend vernetzten Welt.

Mit hohem Innovationstempo steigern neue Märkte und Technologien die Arbeitsanforderungen, vergrößern neue Werkstoffe und Verfahren, die Informationstechnik und ein Wertewandel der Kundenwünsche aber auch die Gestaltung- und Entfaltungsmöglichkeiten des Ingenieurs.

Die Konstruktion ist die Königsdisziplin des Ingenieurs. Die Produktion ist die technische Dienstleistung am König Kunde. Beide Aufgabenfelder zusammengenommen bilden den Kern des industriellen Wertschöpfungsprozesses.

Mit der hier vorgelegten Reihe "Fortschritte in Konstruktion und Produktion" ist es den Herausgebern ein Anliegen, Beiträge von wissenschaftlicher Seite zu fördern, die durch Entwicklung neuer Denkansätze, methodischer Vorgehensweisen und zugehöriger Instrumente die Leistungsfähigkeit der industriellen Wertschöpfung verbessern und erweitern. Nicht nur technische Lösungen, sondern auch ökonomische, ökologische und soziale Fortschritte stehen hierbei im Blickpunkt oder zumindest am Horizont.

Hierfür bietet die Fakultät für Angewandte Naturwissenschaften mit ihrer interdisziplinären Ausrichtung und Einbindung in die Universität Bayreuth ein glückliches Umfeld.

Das Engagement der beiden Herausgeber ist dort vertreten als

- Lehrstuhl für Konstruktionslehre und CAD
- Lehrstuhl für Umweltgerechte Produktionstechnik.

Mögen also die von uns betreuten Dissertationen, die in dieser Buchreihe erscheinen, zu den wünschenswerten Fortschritten in Konstruktion und Produktion beitragen.

Den Autoren der einzelnen Bände dieser Reihe sei für Ihre wissenschaftliche und redaktionelle Arbeit gedankt, den Lesern wünschen wir eine interessante Lektüre und hoffentlich manch wertvolle Anregung für eine erfolgreiche Anwendung der Forschungsergebnisse in ihrer beruflichen Praxis.

Prof. Dr.-Ing. Frank Rieg Prof. Dr.-Ing. Rolf Steinhilper

Vorwort

Diese Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Lehrstuhl Umweltgerechte Produktionstechnik der Universität Bayreuth sowie der Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation. Die Funktion des Team- und Fachgebietsleiters im Arbeitsgebiet „Ressourceneffiziente Produktion“ und die Leitung von Forschungs- und Industrieprojekten ermöglichte mir eine intensive Zusammenarbeit mit führenden Herstellern von Faserverbundbauteilen. In zahlreichen Gesprächen mit Führungskräften über die Herausforderungen ihrer Branche erwuchs die Grundidee für diese Arbeit, eine Instandsetzungssystematik für CFK-Bauteile zu entwickeln und diese am Beispiel eines Fahrradrahmens zu validieren.

Mein Dank gilt Herrn Professor Dr.-Ing. Rolf Steinhilper, Doktorvater dieser Arbeit und Ordinarius des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik sowie Leiter der Fraunhofer-Projektgruppe Prozessinnovation, für die Gewährung einer umfassenden wissenschaftlichen Freiheit und die konstruktive Wegweisung bei meiner wissenschaftlichen Ausbildung. Herrn Professor Dr.-Ing. Michael Zäh, Ordinarius des Lehrstuhls für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik der TU München, danke ich ganz herzlich für die Übernahme des Koreferats.

Weiterhin danke ich den beteiligten Industriepartnern, die mir die Möglichkeit eröffneten, Schäden an CFK-Bauteilen aufzunehmen und neu entwickelte Lösungskonzepte zur Instandsetzung anhand von Bauteilen zu testen. Auf dieser Basis konnten individuell zugeschnittene und funktionsfähige Lösungen auch direkt in den Unternehmen umgesetzt werden.

Meinen Teamkollegen und Mitarbeitern des Lehrstuhls Umweltgerechte Produktionstechnik und der Fraunhofer-Projektgruppe danke ich für die anregenden Diskussionen, die erfolgreiche und kollegiale Zusammenarbeit in zahlreichen Industrie- und Forschungsprojekten und die vielen Erfahrungen, die wir miteinander sammeln durften.

Abschließend gilt mein herzlichster Dank meiner Familie, die mir bei allen Hochs und Tiefs motivierend zur Seite stand und mir bei der Erstellung dieser Arbeit stets den Rücken freihielt.

Bayreuth, im Januar 2015 Florian Ellert

Inhalt

1. Einleitung ... 1

1.1 Ausgangssituation ... 1

1.2 Hintergrund und Problemstellung ... 3

1.3 Zielsetzung und Anforderungen ... 6

1.4 Vorgehensweise ... 7

2. Stand der Technik ... 9

2.1 CFK – Wissenschaftliche Grundlagen ... 9

2.1.1 Ausgangsmaterialien und Laminataufbau ... 9

2.1.2 Mechanische Eigenschaften ... 11

2.1.3 Verfahren zur Bauteilfertigung ... 13

2.1.4 Bauweisen von Rohrtragwerken ... 16

2.1.5 Schadens- und Versagensarten ... 17

2.2 CFK – Schadensanalyse ... 19

2.2.1 Radiographische Verfahren ... 20

2.2.2 Akustische Verfahren ... 22

2.2.3 Thermographische Verfahren ... 24

2.2.4 Mechanische Verfahren ... 26

2.3 CFK – Bauteilpräparation zur Instandsetzung ... 29

2.3.1 Optische Messtechnik ... 29

2.3.2 Materialabtrag ... 31

2.3.3 Oberflächenvorbehandlung ... 33

2.4 CFK – Bauteilinstandsetzung ... 36

2.4.1 Auffüllen mit Reinharz ... 36

2.4.2 Strukturelle Instandsetzung ... 37

2.5 Defizite bestehender Instandsetzungsansätze ... 41

3. Analyse und Bewertung von Schäden an CFK-Bauteilen ... 45

3.1 Analyse von Schäden anhand von Fallbeispielen ... 45

3.1.1 Analyse von Fehlern in der Fertigungsphase ... 45

3.1.2 Analyse von Beschädigungen in der Nutzungsphase ... 48

3.2 Restfestigkeitsanalyse von beschädigten CFK-Prüfkörpern 53
3.2.1 Auswahl eines Referenzbauteils 54
3.2.2 Auswahl eines Prüfverfahrens 57
3.2.3 Präparation von Prüfkörpern mit Beschädigungen 58
3.2.4 Simulative Restfestigkeitsanalyse von beschädigten Prüfkörpern 60
3.2.5 Experimentelle Restfestigkeitsanalyse von beschädigten Prüfkörpern 63
3.2.6 Ergebnisbewertung 64

4. Entwicklung einer Instandsetzungssystematik 71

4.1 Anforderungen an die Instandsetzungssystematik 72
4.2 Auswahl und Anpassung eines zerstörungsfreien Prüfverfahrens 73
4.2.1 Präparation von Prüfkörpern 73
4.2.2 Versuchsdurchführung zur Bewertung und Auswahl von zerstörungsfreien Prüfverfahren 75
4.2.3 Gegenüberstellung der Verfahren und Prüfergebnisse 78
4.2.4 Ergebnisbewertung der zerstörungsfreien Prüfverfahren 84
4.2.5 Parameterdefinition zur Verwendung von aktiver Thermographie 87
4.3 Digitalisierung und Fräsfolgenerstellung zur teilautomatisierten Bauteilpräparation 92
4.3.1 Technische Betrachtung der Prozesskette 92
4.3.2 Betriebswirtschaftliche Betrachtung der Prozesskette 95
4.4 Charakterisierung und Einflüsse der wesentlichen Instandsetzungsvariablen 97
4.4.1 Geometrische Einflussvarianten des Materialabtrags 98
4.4.2 Verfahrensbasierte Einflussvarianten des Materialabtrags 100
4.4.3 Einflussvarianten der Oberflächenvorbehandlung 104
4.4.4 Verfahrensbasierte Einflussvarianten des Materialaufbaus 109
4.4.5 Einflussvarianten des Instandsetzungsmaterialsystems 111
4.4.6 Einflussvarianten von Variationen des Materialaufbaus 113
4.4.7 Zusammenfassung der Ergebnisse 116
4.4.8 Bewertung der Instandsetzungsverfahren 117
4.5 Entwicklung eines Klassifikationsmodells 119
4.5.1 Einflussparameter des Klassifikationsmodells 119
4.5.2 Zusammenstellung ausgewählter Instandsetzungsverfahren 120
4.5.3 Simulative und experimentelle Datengrundlage 121
4.5.4 Erstellung eines Klassifikationsmodells 123
4.6 Zusammenfassende Darstellung der Instandsetzungssystematik 127

5. Validierung der entwickelten Systematik – Anwendungsfall 129

5.1 Lastdatenaufnahme und Belastungszonierung 129

5.1.1 Lastdatenaufnahme am Fahrradrahmen 129

5.1.2 Belastungszonierung mittels einer Finite-Elemente-Analyse 134

5.2 Auswahl und Einbringung von Beschädigungen 137

5.3 Definition des Schadensausmaßes mittels aktiver Thermographie 139

5.4 Einordnung des Schadens in das Klassifikationsmodel 140

5.5 Bauteilinstandsetzung 141

5.6 Steifigkeits- und Festigkeitsanalysen der instandgesetzten Bauteile 142

6. Zusammenfassung und Ausblick 147

7. Summary and Outlook 151

8. Abkürzungsverzeichnis 155

9. Formelzeichenverzeichnis 157

10. Abbildungsverzeichnis 161

11. Tabellenverzeichnis 165

12. Literaturverzeichnis 167

13. Anhang 181

Lebenslauf 189