

Kleb- und prozesstechnische Bewertung des Falzklebens

Von der Fakultät für Maschinenbau
der Technischen Universität Carolo-Wilhelmina zu Braunschweig

zur Erlangung der Würde

eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)

bei der Fakultät eingereichte Dissertation

von Erk Wiese
aus Minden, Deutschland

Eingereicht am: 17.10.2014

Mündliche Prüfung am: 17.12.2014

Gutachter: Univ.-Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Klaus Dilger
Univ.-Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder

2015

Veröffentlichungen über den Inhalt der Arbeit sind nur mit schriftlicher Genehmigung der Volkswagen AG zugelassen.

Die Ergebnisse, Meinungen und Schlüsse dieser Dissertation sind nicht notwendigerweise die der Volkswagen AG.

Forschungsberichte des Instituts für Füge- und Schweißtechnik

Band 37

Erk Wiese

**Kleb- und prozesstechnische Bewertung
des Falzklebens**

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.: Braunschweig, Techn. 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 978-3-8440-3740-1

ISSN 1614-4783

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

Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand in der Abteilung Werkstoffe- und Fertigungsverfahren der Konzernforschung der Volkswagen AG in Wolfsburg in Zusammenarbeit mit dem Institut für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig.

Für die herausragende Betreuung, die wertvollen Anregungen und die uneingeschränkte Unterstützung möchte ich mich an erster Stelle ganz besonders bei dem Leiter des Instituts für Füge- und Schweißtechnik, Herrn Prof. Dr.-Ing. Prof. h. c. Klaus Dilger, bedanken.

Bei Herrn Prof. Dr.-Ing. Klaus Dröder, dem Leiter des Instituts für Werkzeugmaschinen und Fertigungstechnik an der TU Braunschweig, möchte ich mich für die Übernahme des Koreferates, die sorgfältige Durchsicht der Arbeit sowie die hervorragende Zusammenarbeit herzlich bedanken. Herrn Prof. Dr.-Ing. Thomas Vietor danke ich für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Seitens der Volkswagen AG danke ich Herrn Dr. Plath für das in mich gesetzte Vertrauen und die angenehme Zusammenarbeit. Herrn Prof. Dr.-Ing. Günter Klawitter danke ich für die Betreuung der Arbeit sowie die intensiven Diskussionen sowohl während seiner Zeit als Unterabteilungsleiter bei der Volkswagen AG als auch im Anschluss als Professor an der Hochschule Hannover.

Mein ganz besonderer Dank gilt Herrn Dr.-Ing. Felix Eichleiter, der mit zahlreichen fachlichen Diskussionen, seinem kreativen Input sowie großem Engagement bei der Betreuung entscheidend zu dieser Arbeit beigetragen hat.

Herrn Andreas Fricke danke ich für den mir gewährten Freiraum und die Schaffung der sehr guten Rahmenbedingungen.

Des Weiteren gilt mein besonderer Dank Herrn Dominic Schlingmann, Herrn Stefan Holling und Frau Julia Mollenhauer. Sie haben mich während der Erstellung der Arbeit intensiv unterstützt und durch fachliche Diskussionen, zahlreiche Überstunden und sehr großem Einsatz zu der Erstellung dieser Arbeit beigetragen.

Darüber hinaus danke ich Herrn Kristian Lippky, Herrn Christoph Mette, Herrn Julian Brodhun, Herrn Felix Hilfinger, Herrn Simon Plugge, Frau Verena Schmidt und Herrn Stephan Wäsche, die im Rahmen eines Praktikums oder einer Abschlussarbeit in den Themengebieten Kleb- und Falztechnik gearbeitet und mich somit intensiv unterstützt haben.

Für die sehr gute Zusammenarbeit und die besonders hilfsbereite Unterstützung danke ich Herrn Dr.-Ing. Michael Frauenhofer, Herrn Dr. Henning Löser, Herrn Dr. Fabian Fischer, Herrn Eckard Mann, Herrn Hellmuth Specht und Herrn Gerald Müsig sowie allen Mitarbeitern der Unterabteilung Füge- und Fertigungsverfahren sowie des Instituts für Füge- und Schweißtechnik.

Aus tiefstem Herzen möchte ich mich bei meinen Eltern Ute und Klaus für Ihre bedingungslose und unermüdliche Unterstützung sowohl während des Studiums als auch der Promotionszeit bedanken. Gemeinsam mit meiner Schwester Ingke gaben sie mir den nötigen Rückhalt, um diese Dissertation anfertigen zu können. Meiner Freundin Diane danke ich für Ihre unerschöpfliche Geduld, die Rücksichtnahme sowie Ihre liebevolle Unterstützung von ganzem Herzen.

Inhaltsverzeichnis

Abbildungsverzeichnis	VII
Tabellenverzeichnis	XIII
Formelzeichen und Abkürzungen	XV
Kurzfassung.....	XIX
Abstract.....	XXI
1 Einleitung.....	1
1.1 Motivation	1
1.2 Zielsetzung und Vorgehensweise.....	2
2 Stand der Forschung und Technik.....	5
2.1 Grundlagen des Falzklebens	5
2.2 Rückfederung im Falzprozess	9
2.2.1 Grundlagen	10
2.2.2 Einflussfaktoren auf die Rückfederung.....	18
2.3 Falzspezifische Grundlagen der Klebtechnik.....	30
2.3.1 Falzklebstoffe auf Epoxidharzbasis.....	30
2.3.2 Prozessbedingte Fehlstellen in Klebschichten	32
2.3.3 Rheologische Charakterisierung von Klebstoffen	36
3 Verwendete Materialien und Versuchswerkstoffe.....	46
3.1 Fügeitewerkstoffe	46
3.2 Schmierstoffe.....	47
3.3 Klebstoffe.....	47
4 Verwendete Versuchseinrichtungen und Prüfmethode n	49
4.1 Klebstoffcharakterisierung	49
4.1.1 Rheologische Untersuchungen	49
4.1.2 Quasistatische Zugscherversuche	51
4.1.3 Untersuchungen zum Alterungsverhalten der Klebverbindungen (Alterung nach VW-Prüfvorschrift PV 1210)	54
4.1.4 Untersuchungen zur Feuchtigkeitsaufnahme von Klebverbindungen.....	54
4.2 Prüfung von Falzklebungen	55
4.2.1 Falz-Zugprüfung.....	55
4.2.2 Farbeindringprüfung.....	56
4.2.3 Metallurgische Untersuchungen, Schliffbildanalyse	58

4.2.4	Mikrohärteprüfung nach Vickers.....	58
4.3	Optische Verformungsmessung.....	60
4.3.1	Optische Verformungsmessung im Falzprozess	60
5	Abbildung der Falzprozesskette im Labormaßstab.....	62
5.1	Probengeometrie.....	62
5.2	Klebstoffapplikation.....	63
5.3	Handling: Abbildung von prozessbedingten Fliehkräften im Labormaßstab	64
5.4	Herstellen der Falzverbindungen	66
5.4.1	Falzversuchswerkzeug	66
5.4.2	Messung der Rückfederung	68
6	Untersuchung und Bewertung von vorgelagerten Prozessen auf das Falzergebnis.....	71
6.1	Klebstoffapplikation.....	71
6.1.1	Einfluss der Applikationsparameter auf den Füllgrad	71
6.1.2	Einfluss des Füllgrades auf die Auszugfestigkeiten.....	75
6.2	Bauteilhandling	76
6.2.1	Messung der Fliehkräfte während des Bauteilhandlings	76
6.2.2	Ermittlung des Kontaminationsgrades in Abhängigkeit der Bauteillagerung	77
6.2.3	Einfluss der Fliehkraft auf die Veränderung der Klebstoffraupenposition in Abhängigkeit des Beölungsgrads.....	79
7	Untersuchung und Bewertung von Falzprozessparametern auf das Falzergebnis.....	81
7.1	Grundlage des Falzprozesses	81
7.2	Minimierung der Rückfederung durch optimierte Falzstempelgeometrien.....	87
7.2.1	Bewertung des Einflusses modifizierter Vorfalzstempelgeometrien während des Prozessschrittes Vorfalzen.....	91
7.2.2	Bewertung des Einflusses modifizierter Fertigfalzstempelgeometrien während des Prozessschrittes Fertigfalzen	98
7.3	Fazit der Untersuchungen des Prozessschrittes Falzen	109
8	Untersuchung und Bewertung des rückfederungsbedingten Klebstoffverhaltens	110

8.1	Rheologische Untersuchungen zum rückfederungsbedingten Verstreckungsverhalten der Klebstoffe	110
8.1.1	Frequenzabhängiges Klebstoffverhalten	111
8.1.2	Klebstoffverstreckungsverhalten	113
8.2	Einfluss einer rückfederungsbedingten Klebstoffverstreckung auf die Zugscherfestigkeit	117
8.3	Einfluss rückfederungsbedingter Klebstoffverstreckung auf die Alterungsbeständigkeit	120
8.3.1	Feuchtigkeitsaufnahmeverhalten	120
8.3.2	Zugscherfestigkeit nach PV1210	122
8.4	Fazit	124
9	Bewertung von Maßnahmen zur Minimierung, Tolerierung und Vermeidung der Rückfederung	125
9.1	Bewertung modifizierter Klebstoffsysteme und Falzstempelgeometrien...	125
9.2	Ansatz zur Vermeidung der Rückfederung	127
10	Zusammenfassung und Ausblick	132
11	Literaturverzeichnis	135
	Verzeichnis der verwendeten Normen und Richtlinien	140
	Eigene Veröffentlichungen	XXIII
	Lebenslauf	XXV