

*Der Einfluss stoffschlüssiger Fügeverfahren auf die Verbundfestigkeit  
flammgeschützter Kunststoffe*

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
DOKTORS DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (Dr.-Ing.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Fabian Evers, M.Sc.  
aus Paderborn

Tag des Kolloquiums: 31.05.2016  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Rainer Koch



Schriftenreihe Institut für Leichtbau mit Hybridsystemen

Band 19/2016

**Fabian Evers**

**Der Einfluss stoffschlüssiger Fügeverfahren auf die  
Verbundfestigkeit flammgeschützter Kunststoffe**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag  
Aachen 2016

**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.: Paderborn, Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2016

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-4626-7

ISSN 2196-2200

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)

## **Kurzfassung**

Synthetische Kunststoffe besitzen i.d.R. keine große thermische Stabilität. Oftmals können bzw. dürfen sie nur mit entsprechenden Flammenschutzmittelsystemen ausgerüstet eingesetzt werden, was aber gleichzeitig zu Beeinträchtigungen bestimmter Eigenschaften des Materials führt. In der vorliegenden Arbeit wurde der Einfluss stoffschlüssiger Fügeverfahren auf die Verbundfestigkeit flammgeschützter Kunststoffe untersucht. Auf Basis thermischer Analysen konnten den Kunststoffen flammenschutzmittelspezifische Aktivierungstemperaturen und Beladungsmengen zugewiesen und eine Methode zur Quantifizierung des Flammenschutzmittelabbaus durch thermische Verarbeitungsprozesse entwickelt werden. Festigkeits- und Aktivierungsuntersuchungen der verwendeten Kunststoffe in Abhängigkeit der unterschiedlichen Fügeverfahren wurden durchgeführt. Prozesse innerer Wärmeenergieerzeugung, wie das Vibrations- und Ultraschallschweißen, zeigen keine bzw. sehr geringe Einflüsse auf die Schweißnahtfestigkeit und Aktivierung des Flammenschutzmittels. Verfahren äußerer Energieeinträge, wie das Heizelement-, Laser- und Infrarotschweißen, resultieren in zum Teil deutlichen Aktivierungen und demnach Festigkeitsverlusten. Diese Einflüsse lassen sich zwar prozesstechnisch optimieren, aber nicht gänzlich eliminieren. Die Betrachtung der energetischen Aktivierung führt zu dem Ergebnis, dass die Temperatur oberhalb der Flammenschutzmittelaktivierung gegenüber der eingebrachten Energie einen deutlich größeren Einfluss hat.



## **Abstract**

Most synthetic plastics have not a high thermal stability. Often the plastics can only use or are only allowed in the presence of flame retardants, but that can lead to deterioration of the certain material properties at the same time. In this thesis the influence of material bonded joining methods on the strength of the joints were investigated. Based on thermal analysis, it was possible to allocate flame retardant specific activation temperatures and plastic specific flame retardant percentage. On this knowledge a method to quantize the degradation of the flame retardants by a thermal process was developed. The experimental investigations show the strength and activation of the analyzed polymers. Processes with inner heat production, like vibration- and ultrasonic welding, result in no or low activation of the flame retardants. Processes with outer heat production, e.g. hot plate, laser and IR welding, cause in high flame retardant activation and loss of strength. The influences can be optimized by process parameters, but not compensated completely. The temperature above the flame retardant activation has a higher influence on the activation of the flame retardants compared to the heat energy.



## Liste der Vorveröffentlichungen

### 2013

- SCHÖPPNER V.  
EVERS, F.  
LEXOW, M. „DAS VERHALTEN FLAMMGESCHÜTZTER MATERIALIEN IM KUNSTSTOFFSCHWEIßPROZESS“, JOINING PLASTICS, 7. JG. HEFT 3-4, DVS-MEDIA GMBH, DÜSSELDORF, 2013, S. 182 - 189, ISSN: 1864-3450
- SCHÖPPNER, V.  
EVERS, F. „THE BEHAVIOUR OF FLAME RETARDANT MATERIAL IN THE PLASTIC WELDING PROCESS“, 27TH ANNUAL ASSEMBLY OF THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING (IIW), ESSEN (DEUTSCHLAND), 2013
- SCHÖPPNER, V.  
EVERS, F. „SCHWEIßEN FLAMMGESCHÜTZTER KUNSTSTOFFE“, 23. FACHTAGUNG ÜBER VERARBEITUNG UND ANWENDUNG VON POLYMEREN (TECHNOMER), CHEMNITZ (DEUTSCHLAND), 2013

### 2014

- SCHÖPPNER V.  
EVERS, F. „INFLUENCE OF FLAME RETARDANT MATERIAL ON THE WELD STRENGTH OF PLASTIC PARTS“, 72ND ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE OF THE SOCIETY OF PLASTICS ENGINEERS (ANTEC), LAS VEGAS (USA), 2014
- SCHÖPPNER, V.  
BONEFELD, D.  
LAKEMEYER, P.  
EVERS, F. „EXPERIMENTAL EXAMINATION OF GAP BRIDGING IN LASER CONTOUR WELDING“, 72ND ANNUAL TECHNICAL CONFERENCE OF THE SOCIETY OF PLASTICS ENGINEERS (ANTEC), LAS VEGAS (USA), 2014
- SCHÖPPNER, V.  
EVERS, F.  
LAKEMEYER, P. „THE INFLUENCE OF WELDING PROCESSES ON THE WELD STRENGTH OF FLAME-RETARDANT MATERIALS“, 67TH ANNUAL ASSEMBLY OF THE INTERNATIONAL INSTITUTE OF WELDING (IIW), SEOUL (SÜDKOREA), 2014



## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in der Kunststofftechnik Paderborn (KTP) der Universität Paderborn in den Jahren 2010 bis 2014.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner für die Ermöglichung der Promotion und die kontinuierliche Unterstützung sowie die zahlreichen Diskussionen und Anregungen.

Für die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Rainer Koch herzlich.

Ebenso möchte ich mich bei allen Mitarbeiterinnen und Mitarbeitern des Lehrstuhls für das sehr gute Arbeitsklima, besonders bei den Ein- und Ausständen und anderen außerberuflichen Aktivitäten, die kooperative Zusammenarbeit und das offene Ohr bei Fragestellungen aller Art bedanken. Hier habe ich einige Freunde dazugewonnen. Weiteren Dank möchte ich den studentischen Hilfskräften sowie den Studien- und Diplom-, Bachelor- und Masterarbeitern, die mich während dieser Zeit tatkräftig unterstützt haben, aussprechen. Stellvertretend seien hier Matthias Lexow und Maximilian Scholle genannt.

Bedanken möchte ich mich ebenfalls bei meiner Familie, die mir die notwendige Zeit der Ablenkung gegeben hat.

Besonders danken möchte ich Sarah Schmidt, die mich neben der Korrekturarbeit jederzeit unterstützt und ermuntert hat. Ohne sie wäre die Arbeit wohl nie entstanden.

Die Ergebnisse dieser Arbeit sind während eines gemeinschaftlichen Projektes mit den Firmen Kunststoff-Institut für die mittelständische Wirtschaft NRW GmbH und der Weidmüller Interface GmbH & Co. KG entstanden. Den beteiligten Mitarbeitern danke ich herzlich für die Zusammenarbeit. Das Projekt wurde mit Materialbereitstellungen und Erfahrung durch die LANXESS Deutschland GmbH unterstützt, ohne die die experimentellen Untersuchungen nicht möglich gewesen wären. Dazu sei an dieser Stelle herzlich gedankt.



**Inhaltsverzeichnis****ABKÜRZUNGS- UND SYMBOLVERZEICHNIS .....IV****1 EINLEITUNG ..... 1**

1.1 MOTIVATION ..... 1

1.2 PROBLEMSTELLUNG ..... 4

1.3 ZIELSETZUNG ..... 6

1.4 VORGEHENSWEISE ..... 6

**2 STAND DER TECHNIK ..... 9**

2.1 EINGESETZTE WERKSTOFFE ..... 9

2.1.1 Kunststoffe ..... 9

2.1.2 Zersetzungsprozesse der untersuchten Polymere ..... 15

2.1.3 Flammschutzmittel ..... 19

2.2 FÜGEVERFAHREN ..... 30

2.2.1 Heizelementschweißen ..... 32

2.2.2 Ultraschallschweißen ..... 38

2.2.3 Laserschweißen ..... 42

2.2.4 Vibrationsschweißen ..... 48

2.2.5 Infrarotschweißen ..... 53

2.2.6 Kleben ..... 58

2.3 FÜGEN VON FLAMMSCHUTZADDITIVIERTEN KUNSTSTOFFEN ..... 63

**3 MATERIALANALYSEN ..... 69**

|                                                                 |           |
|-----------------------------------------------------------------|-----------|
| 3.1 MECHANISCHE MATERIALANALYSEN .....                          | 70        |
| 3.2 THERMISCHE MATERIALANALYSEN.....                            | 71        |
| 3.2.1 Differential Scanning Calorimetry (DSC) .....             | 71        |
| 3.2.2 Thermogravimetrische Analyse (TGA).....                   | 74        |
| 3.3 BRANDPRÜFUNG.....                                           | 83        |
| <b>4 BESTIMMUNG DES FLAMMSCHUTZMITTELABBAUS .....</b>           | <b>87</b> |
| <b>5 EXPERIMENTELLE UNTERSUCHUNGEN.....</b>                     | <b>91</b> |
| 5.1 HEIZELEMENTSCHWEIßEN .....                                  | 93        |
| 5.1.1 Parameterstudie beim Heizelementschweißen .....           | 94        |
| 5.1.2 Aktivierungsuntersuchung beim Heizelementschweißen .....  | 105       |
| 5.2 ULTRASCHALLSCHWEIßEN .....                                  | 110       |
| 5.2.1 Parameterstudie beim Ultraschallschweißen.....            | 110       |
| 5.2.2 Aktivierungsuntersuchung beim Ultraschallschweißen.....   | 114       |
| 5.3 LASERSCHWEIßEN .....                                        | 116       |
| 5.3.1 Parameterstudie beim Laserschweißen.....                  | 118       |
| 5.3.2 Aktivierungsuntersuchung beim Laserschweißen .....        | 125       |
| 5.4 VIBRATIONSSCHWEIßEN .....                                   | 131       |
| 5.4.1 Parameterstudie beim Vibrationsschweißen .....            | 132       |
| 5.4.2 Aktivierungsuntersuchungen beim Vibrationsschweißen ..... | 136       |
| 5.5 INFRAROTSCHWEIßEN .....                                     | 139       |
| 5.6 KLEBEN.....                                                 | 148       |
| 5.6.1 Parameterstudie beim Kleben.....                          | 149       |

|                                                       |            |
|-------------------------------------------------------|------------|
| 5.6.2 Aktivierungsuntersuchung beim Kleben.....       | 151        |
| 5.7 OPTIMALE ERGEBNISSE FÜR JEDES VERFAHREN .....     | 152        |
| <b>6 ENERGETISCHE BETRACHTUNG .....</b>               | <b>157</b> |
| <b>7 VERGLEICH / BETRACHTUNG DER ERGEBNISSE .....</b> | <b>165</b> |
| 7.1 AKTIVIERUNGSEFFEKTE.....                          | 165        |
| 7.2 VERFAHRENEFFEKTE .....                            | 167        |
| 7.3 MATERIALEFFEKTE.....                              | 175        |
| 7.4 PROZESSEFFIZIENZ.....                             | 183        |
| 7.5 EFFEKTE DER DIFFERENZTEMPERATUR.....              | 188        |
| <b>8 ZUSAMMENFASSUNG.....</b>                         | <b>193</b> |
| <b>9 AUSBLICK.....</b>                                | <b>199</b> |
| <b>10 LITERATURVERZEICHNIS .....</b>                  | <b>VII</b> |
| <b>11 LEBENSLAUF .....</b>                            |            |