

Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut
Dr.-Ing. Serkan Çavdar

**Spannungsbasierte
Lebensdauerberechnung
von zyklisch beanspruchten
Klebverbindungen
mit hyperelastischem
Deformationsverhalten**

Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik

Band 152

**Gerson Meschut
Serkan Çavdar**

**Spannungsbasierte Lebensdauerberechnung von
zyklisch beanspruchten Klebverbindungen mit
hyperelastischem Deformationsverhalten**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag
Düren 2021

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., 2021

Copyright Shaker Verlag 2021

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-8084-1

ISSN 1434-6915

Shaker Verlag GmbH • Am Langen Graben 15a • 52353 Düren

Telefon: 02421 / 99 0 11 - 0 • Telefax: 02421 / 99 0 11 - 9

Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Im Rahmen der Mischbau-Modulbauweise gewinnt das Fügen von artverschiedenen Werkstoffen mit hyperelastischen Klebstoffsystemen zunehmend an Bedeutung. Um diese auch unter zyklischer Beanspruchung sicher und effizient auszulegen, wird in der vorliegenden Arbeit eine Methode für die spannungsbasierte Lebensdauerberechnung von 2K-PU-Klebverbindungen unter Berücksichtigung von iso- sowie anisotropen Fügepartikeln aufgezeigt. Ausgehend von den theoretischen Grundlagen wird das Deformations- und Versagensverhalten einer repräsentativen 2K-PU-Klebverbindung in Grundversuchen mit steifen Fügepartikeln unter quasistatischer und zyklischer Belastung experimentell untersucht. Dies bildet die Basis für die Modellierung des Klebschichtversagens in Abhängigkeit der Beanspruchungsmehrachsigkeit. Anhand von im Detail aufgebauten FE-Modellen der untersuchten Verbindungen werden die notwendigen Ansatzparameter identifiziert, verifiziert und in einer Sensitivitätsanalyse hinsichtlich der Klebschichtdiskretisierung in Bezug auf ihre Robustheit und einfache Anwendbarkeit bewertet. Eine abschließende Validierung der entwickelten Methode erfolgt mit zunehmender Komplexität an technologischen und bauteilähnlichen Verbindungsproben. Die Gegenüberstellung der numerisch berechneten mit der experimentellen Anriss- und Versagenslebensdauer belegt ein hohes Maß an Sicherheit und trägt somit zum Vertrauen in die Füge-technologie Kleben bei.

Abstract

The joining of dissimilar materials with hyperelastic adhesives is becoming increasingly important in the context of multi-material construction concepts. To design these kinds of joints reliably and efficiently even under cyclic fatigue loading, this thesis presents a method for the stress-based fatigue life prediction of hyperelastic bonded joints, considering both isotropic and anisotropic adherend materials. Based on the theoretical fundamentals, the deformation and failure behavior of a representative adhesively bonded joint is investigated experimentally in basic tests with stiff adherends under quasi-static and cyclic loading. This provides the basis for modeling the adhesive layer failure as a function of the stress multi-axiality. Based on detailed FE models of the investigated joints, the necessary parameters are identified, verified and evaluated in a sensitivity analysis with respect to the adhesive layer discretization in terms of their robustness and ease of application. A final validation of the developed method is carried out with increasing complexity on technological and component-like bonded specimens. The comparison of the numerically predicted and the experimental identified crack and failure lifetimes shows a high degree of reliability and contributes to the confidence in adhesive bonding technology.

Vorveröffentlichungen

Teilergebnisse dieser Arbeit sind in folgenden Veröffentlichungen erschienen:

S. Çavdar, G. Meschut, A. Wulf, O. Hesebeck, M. Brede und B. Mayer, „Fatigue life prediction of adhesively bonded FRP-aluminium-joints with hyperelastic behavior under cyclic multiaxial stress state“, in *Fügen im Karosseriebau 2020* (Vortrag). Online, 29. Sep. 2020.

S. Çavdar, G. Meschut, A. Wulf, O. Hesebeck, M. Brede, B. Mayer, K. Tittmann, I. Koch, H. Jäger, J.-D. Wacker, G. Rybar und T. Melz, „Berechnen der Lebensdauer hybrider Verbindungen“ in *DVS-Berichte*, Bd. 365, *DVS Congress 2020 - Große Schweißtechnische Tagung - DVS Campus: Vorträge der Online-Veranstaltungen vom 14. bis 18. September 2020*, Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V., Hg., Düsseldorf: DVS Media GmbH, 2020, ISBN: 978-3-96144-098-6.

S. Çavdar, D. Teutenberg, G. Meschut, A. Wulf, O. Hesebeck, M. Brede, B. Mayer, K. Tittmann, I. Koch, H. Jäger, J.-D. Wacker, G. Rybar und T. Melz, „Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen“ in *20. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik*, Würzburg, 03.-04. Mrz. 2020, S. 104–106.

S. Çavdar, D. Teutenberg, G. Meschut, A. Wulf, O. Hesebeck, M. Brede und B. Mayer, „Stress-based fatigue life prediction of adhesively bonded hybrid hyperelastic joints under multiaxial stress conditions“, *International Journal of Adhesion and Adhesives*, Jg. 97, S. 102483, 2020, doi: 10.1016/j.ijadhadh.2019.102483.

S. Çavdar, G. Meschut, A. Wulf, O. Hesebeck, M. Brede, B. Mayer, K. Tittmann, I. Koch, H. Jäger, J. D. Wacker, G. Rybar, J. Baumgartner und T. Melz, „Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen“. Projektabschlussbericht IGF-Nr. 19187BG, in *FAT-Schriftenreihe 326*, Forschungsvereinigung Automobiltechnik e. V., Berlin, 2020.

K. Tittmann, I. Koch, M. Gude, S. Çavdar, D. Teutenberg, G. Meschut, J.-D. Wacker, G. Rybar, T. Melz, A. Wulf, M. Brede, O. Hesebeck und B. Mayer, „Lebensdauerberechnung hybrider Klebverbindungen: Prüf- und Modellierungsstrategie zur Betriebsfestigkeitsanalyse von semistrukturellen Klebverbindungen mit FKV-Fügepartner“, in *WerkstoffWoche 2019* (Vortrag). Dresden, 20. Sep. 2019.

S. Çavdar, D. Teutenberg, G. Meschut, A. Wulf, O. Hesebeck, M. Brede und B. Mayer, „Stress-based lifetime prediction of adhesively bonded hybrid hyperelastic joints under multiaxial fatigue loading“ in *AB 2019: Book of abstracts of the 5th International Conference on Structural Adhesive Bonding, Porto, 11.-12. Jul. 2019*, L. F. M. da Silva und R. D. Adams, Hg., Porto: Quântica Editora, Lda, 2019, S. 213–214, ISBN: 978-989-8927-74-3.

S. Çavdar, D. Teutenberg, G. Meschut, A. Wulf, O. Hesebeck, M. Brede, B. Mayer, K. Tittmann, I. Koch, H. Jäger, J.-D. Wacker, G. Rybar und T. Melz, „Lebensdauerberechnung hybrider Verbindungen“ in *19. Kolloquium Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik*, Köln, 12.-13. Feb. 2019, S. 40–42.

Inhaltsverzeichnis

Abkürzungen und Formelzeichen	II
1 Einleitung	1
2 Stand der Wissenschaft und Technik	3
2.1 Relevanz des elastischen Strukturlebens.....	3
2.2 Mechanische Eigenschaften und mathematische Modellierung von Klebverbindungen mit elastischen Klebschichten	5
2.3 Auslegung und Berechnung von zyklisch beanspruchten Klebverbindungen	15
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	23
4 Experimentelle Methoden	27
4.1 Experimentelle Randbedingungen	27
4.2 Charakterisierung der metallischen Fügeilewerkstoffe.....	36
4.3 Charakterisierung des mechanischen Klebstoffverhaltens.....	39
4.4 Grundversuche zur Identifikation des mechanischen Klebverbindungsverhaltens	42
4.5 Versuche an technologischen und bauteilähnlichen Proben.....	57
5 Homogenisierung der Klebschichtbeanspruchung	65
5.1 Nennspannungsbezogene Klebschichtbeanspruchung	65
5.2 Nennspannungsbasiertes Festigkeitskriterium.....	67
5.3 Nennspannungsbasiertes Schwingfestigkeitskriterium	69
6 Numerische Diskretisierung der Klebschichtbeanspruchung	73
6.1 Modellierung des Klebstoffverformungsverhaltens.....	73
6.2 Modellierung der Grundproben	76
6.3 Lokalspannungsbasiertes Schwingfestigkeitskriterium	78
6.4 Verifizierung und Sensitivitätsanalyse zur Klebschichtdickendiskretisierung	81
7 Validierung des örtlichen Maximalspannungskonzepts	85
7.1 Lebensdauerberechnung technologischer Verbindungsproben	85
7.2 Lebensdauerberechnung bauteilähnlicher Verbindungsproben	91
8 Linearisierung des Klebstoffdeformationsverhaltens	95
8.1 Vorgehensweise.....	96
8.2 Linear-elastische Lebensdauerberechnung der LWF-KS2-Probe	97
8.3 Linear-elastische Lebensdauerberechnung der LWF-PB-Probe	98
9 Zusammenfassung	101
Literaturverzeichnis	105