

Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut
Dr.-Ing. Miriam Laubrock

Auslegung lastübertragender Klebverbindungen für den Landmaschinenbau

Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik

Band 151

**Gerson Meschut
Miriam Laubrock**

**Auslegung lastübertragender Klebverbindungen
für den Landmaschinenbau**

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., 2020

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 978-3-8440-7823-7

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

Teilergebnisse dieser Arbeit sind in folgenden Forschungsberichten und Veröffentlichungen erschienen:

Abschlussberichte und Vorträge zu den Forschungsprojekten:

Kötting, G.; Holstegge, M.: Kleben von dickwandigen Baustählen in Konstruktionen des Landmaschinen- und Schwingmaschinenbaus. Forschung für die Praxis, Projekt der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., P1084, Verlags und Vertriebsgesellschaft, Düsseldorf, 2016 (im Druck)

Laubrock, M.; Kötting, G.; Göddecke, J.; Teutenberg, D.; Meschut, G.: Entwicklung einer Methode zur Auslegung von Klebverbindungen in schwingbeanspruchten Konstruktionen des Landmaschinen- und Anlagenbaus. Forschung für die Praxis, Projekt der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., P1121, Verlags und Vertriebsgesellschaft, Düsseldorf, 2019 (im Druck)

Kötting, G.; Holstegge, M.: Bonding oft thick-walled structural steel in constructions of agricultural and vibrating machines, METEC & 2nd European Steel Technology and Application Days, 15.-19.06.2015, Düsseldorf

Kötting, G.; Holstegge, M.: Besser als geschweißt – Kleben dicker Stahlbleche im Maschinenbau. In: adhäsion KLEBEN & DICHTEN, Jg. 59 (2015), H. 9, S. 29-37.

Kötting, G.; Holstegge, M.: Bonding of Thick-Walled Steel Sheets – Adhesive Bonding in Applications of Agricultural and Plant Engineering, 11th European Adhesion Conference, 21.-23.08.2016, Glasgow

Laubrock, M.; Kötting, G.; Göddecke, J.; Teutenberg, D.; Meschut, G.: Auslegung von Klebverbindungen in schwingbeanspruchten Konstruktionen des Landmaschinen- und Anlagenbaus. 18. Kolloquium: Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, 27.-28.02.2018, Köln

Laubrock, M.; Kötting, G.; Göddecke, J.; Teutenberg, D.; Meschut, G.: Entwicklung einer Methode zur Auslegung von Klebverbindungen in schwingbeanspruchten Konstruktionen des Landmaschinen- und Anlagenbaus. 19. Kolloquium: Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, 12.-13.02.2019, Köln

Laubrock, M.; Kötting, G.; Göddecke, J.; Teutenberg, D.; Meschut, G.: Festigkeitsverhalten struktureller Klebverbindungen für den Landmaschinenbau. 9. Doktorandenseminar Klebtechnik, DVS-Berichte Band 358, 2019

Göhrs, T.; Laubrock, M.; Kötting, G.; Göddecke, J.; Teutenberg, D.; Meschut, G.: Entwicklung einer Methode zur Auslegung von Klebverbindungen in schwingbeanspruchten Konstruktionen des Landmaschinen- und Anlagenbaus. 20. Kolloquium: Gemeinsame Forschung in der Klebtechnik, 03.-04.03.2020, Würzburg

Zusammenfassung

Die zunehmende Forderung nach leichteren Maschinen in der Landwirtschaft führt zu einem vermehrten Einsatz höherfester Stähle zur Einsparung bewegter Maschinenmassen durch die Reduzierung von Wandstärken. Das bislang primär genutzte schweißtechnische Fügen weist in diesem Zusammenhang aber insbesondere unter den vorliegenden schwingenden Belastungen Grenzen auf. Kleben kann dazu eine sinnvolle Alternative sein. Bisherige positive Erfahrungen aus Branchen wie dem Automobilbau lassen sich aber aufgrund abweichender Randbedingungen nicht direkt übertragen. Dies betrifft unter anderem die vorhandenen Wandstärken und Toleranzen, auftretende Korrosionsbelastungen durch landwirtschaftliche Medien sowie den zum Teil deutlich geringeren Automatisierungsgrad.

Im Rahmen dieser Arbeit werden zunächst landwirtschaftstypische Randbedingungen ermittelt. Experimentelle Untersuchungen am Überlappstoß nach FKM-Richtlinie zur quasistatischen und zur Schwingfestigkeit zeigen besonders im High-Cycle-Fatigue Bereich gute Ergebnisse gegenüber vergleichbaren Schweißverbindungen. Auf Basis der Untersuchungen erfolgt eine Klassifizierung signifikanter Einflussgrößen. Anhand derer wird eine Auslegungsmethode in Anlehnung an den Ermüdungsfestigkeitsnachweis mit Nennspannungen nach FKM-Richtlinie zur Abschätzung der Schwingfestigkeit lastübertragender Klebverbindungen aus dickeren Blechen ($t = 3 \text{ mm}$ bis 5 mm) erarbeitet. Die Überprüfung der entwickelten Methode am bauteilähnlichen Prüfkörper Konsolenanschluss zeigt eine gute Übereinstimmung mit den experimentellen Ergebnissen.

Summary

The increasing demand on lightweight constructions in agricultural machines leads to an increasing use of high-strength steels in order to save moving masses by reducing the wall thickness. Especially under frequently occurring vibrating loads, common welded joints show limited strength. In these cases structural adhesive bonding can be an alternative. Previous positive experiences from automotive engineering cannot be transferred directly, because of divergent boundary conditions. This relates in particular to wall thickness and tolerances, the corrosive conditions caused by agricultural environments as well as the level of automation.

In this thesis agricultural boundary conditions are determined. Experimental investigations are performed on a lap joint in accordance with the FKM-guidelines. Tests with regard to quasistatic strength and fatigue show good results in high-cycle-fatigue compared to welded joints. Based on the results significant influencing factors are classified. With the help of these factors a design method following the fatigue strength verification based on nominal stresses from the FKM-guidelines is developed. The fatigue of structural bonded joints of thicker steels ($t = 3 \text{ mm}$ to 5 mm) is to be determined. A verification of the method developed shows good results for the comparison to experimental results on component-type specimens.

Inhalt

1	Einleitung.....	1
2	Stand der Technik.....	3
2.1	Anwendungen lastübertragender Klebverbindungen im Automobilbau und weiteren Anwendungsfeldern	3
2.2	Fügetechniken im Landmaschinenbau	4
2.3	Beanspruchungen von Landmaschinen	7
2.4	Vergleich zwischen Klebungen in Automobilkarosseriebau und Landtechnik	8
2.5	Festigkeitsverhalten und Berechnung von Klebverbindungen	9
2.5.1	Festigkeitsverhalten	9
2.5.2	Berechnung von Metall-Klebverbindungen	12
2.6	Auslegung und Nachweisführung	14
2.6.1	Nachweisführung und Versagensverhalten von Klebverbindungen bei zyklischer Belastung	14
2.6.2	Rechnerischer Festigkeitsnachweis für Maschinenbauteile nach FKM-Richtlinie	16
3	Zielsetzung und Vorgehensweise.....	23
4	Verwendete Berechnungsprogramme, Prüfkörper, Versuchseinrichtungen und Versuchswerkstoffe.....	25
4.1	Berechnungsprogramme	25
4.1.1	Analytische Berechnungen	25
4.1.2	FEM-Berechnungen	25
4.2	Prüfkörper und Versuchseinrichtungen	26
4.2.1	Zugversuch an Baustählen nach DIN EN ISO 6892-1	26
4.2.2	Zugversuch an Klebstoffsubstanzproben nach DIN EN ISO 527-2	27
4.2.3	Zugscherversuche an Klebverbindungen in Anlehnung an DIN EN 14869-2	28
4.2.4	Zugscherversuche an Überlappverbindungen in Anlehnung an DIN EN 1465 und Konstruktionsdetail Nr. 612 der FKM-Richtlinie	29
4.3	Werkstoffe	34
4.3.1	Stähle	34
4.3.2	Klebstoffe	35
4.4	Alterungsbeständigkeit und Korrosionsschutz	37

5	Einflussgrößen auf die Festigkeit dickwandiger Klebverbindungen bei quasistatischer Zugscherbelastung	39
5.1	Festlegung einer zweckmäßigen Überlappungslänge	39
5.2	Statistische Versuchsplanung	40
5.3	Detailliertere Betrachtung ausgewählter Einflussgrößen	42
5.3.1	Einfluss des Klebstoffes	42
5.3.2	Einfluss der Fügeteilfließgrenze	43
5.3.3	Einfluss der Fügeteildicke	45
5.3.4	Einfluss der Klebschichtdicke	46
5.4	Abschätzung der quasistatischen Festigkeit der geklebten FKM-Probe	47
5.5	Quasistatische Festigkeit nach Alterung	48
5.6	Festigkeitsvergleich mit geschweißten Verbindungen	50
6	Einflussgrößen auf die Schwingfestigkeit dickwandiger Klebverbindungen	53
6.1	Einfluss des Klebstoffes	53
6.2	Einfluss der Fügeteilfließgrenze	56
6.3	Einfluss der Fügeteildicke	57
6.4	Einfluss der Überlappungslänge	58
6.5	Einfluss der Klebschichtdicke	60
6.6	Einfluss der Mittelspannung	60
6.7	Vergleich mit geschweißten Verbindungen	61
6.8	Betriebsfestigkeitsversuche	63
6.9	Schwingfestigkeit nach Alterung	64
6.9.1	Wöhlerversuche nach Alterung	64
6.9.2	Betriebsfestigkeitsversuche nach Alterung	65
7	Konzept zur Ermittlung der Bauteil-Wöhlerlinie und der Bauteilbetriebsfestigkeit mit Nennschubspannungen nach der FKM-Richtlinie	66
7.1	Ermittlung einer Bauteil-Wöhlerlinie	68
7.1.1	Kerbfallklasse, Wöhlerlinienneigung und Knickpunktzyklenzahl	68
7.1.2	Vorgehensweise zur Ermittlung der Bauteil-Wöhlerlinie für Wechselfestigkeit	68
7.1.3	Bestimmung des Mittelspannungsfaktors K_{AK}	69
7.1.4	Ermittlung der Bauteil-Wechselfestigkeit	70
7.1.5	Bestimmung von Sicherheitsfaktoren und Auslastungsgrad	76
7.1.6	Vergleich der berechneten Wöhlerlinie für geschweißte und geklebte Überlappstöße	78
7.2	Verifizierung der entwickelten Methode	80

7.2.1	Vergleich der experimentell ermittelten und der berechneten Wöhlerlinie für zur Methodenentwicklung herangezogenen Klebstoffe	80
7.2.2	Vergleich der experimentell ermittelten und der berechneten Wöhlerlinie für den nicht zur Methodenentwicklung herangezogenen Klebstoff SP 498	84
7.2.3	Berechnung der Bauteil-Betriebsfestigkeit	85
8	Validierung der Vorgehensweise nach FKM-Richtlinie am Konstruktionsdetail Konsolenanschluss	88
9	Hinweise zur Fertigung und Auslegung lastübertragender Klebverbindungen im Landmaschinenbau	95
9.1	Oberflächenvorbehandlung	95
9.2	Beständigkeit und Korrosionsschutz	95
9.3	Werkstoffauswahl im Hinblick auf Leichtbau	95
9.3.1	Klebstoffauswahl	95
9.3.2	Stahlauswahl	96
9.4	Konstruktion	97
9.4.1	Spalttoleranzen	97
9.4.2	Konstruktion der Fügezone	97
9.5	Nachweisführung	98
10	Zusammenfassung	99
11	Literatur	101
12	Formelzeichen und Abkürzungen	110
12.1	Formelzeichen	110
12.2	Abkürzungen	113