

Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut  
Dr.-Ing. Patrick Giese

# **Methode zur Prognose des Tragverhaltens von Halbhohlstanznietverbindungen**

Berichte aus dem Laboratorium für Werkstoff- und Füge­technik

Band 153

**Gerson Meschut  
Patrick Giese**

**Methode zur Prognose des Tragverhaltens  
von Halbhohlstanznietverbindungen**

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 978-3-8440-8113-8

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](http://www.shaker.de) • E-Mail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

Teile dieser Arbeit sind in folgenden Veröffentlichungen erschienen:

Meschut, G.; Hein, D.; Giese, P.; Iwainsky, A.; Herfert, D.; Günther, M.; Gumbsch, P.; Sommer, S.; Bier, M.: *Daten – und prognosebasierte Generierung von Modellparametern für die Crashsimulation mechanisch gefügter Verbindungen*. Tagungsband. 5. Fügetechnisches Gemeinschaftskolloquium 2015, 08.-09.12.2015 Paderborn

Meschut, G.; Hein, D.; Giese, P.; Iwainsky, A.; Herfert, D.; Günther, M.; Gumbsch, P.; Sommer, S.; Rochel, P.: *Daten – und prognosebasierte Generierung von Modellparametern für die Crashsimulation mechanisch gefügter Verbindungen*. Tagungsband. 6. Fügetechnisches Gemeinschaftskolloquium 2016, 07.-08.12.2016 München

Meschut, G.; Hein, D.; Giese, P.; Iwainsky, A.; Herfert, D.; Günther, M.; Gumbsch, P.; Sommer, S.; Rochel, P.: *Daten – und prognosebasierte Generierung von Modellparametern für die Crashsimulation mechanisch gefügter Verbindungen*. Tagungsband. 7. Fügetechnisches Gemeinschaftskolloquium 2017, 12.-13.12.2017 Dresden

Rochel, P.; Sommer, S.; Günther, M.; Herfert, D.; Meschut, G.; Giese, P.: *Daten – und prognosebasierte Generierung von Modellparametern für die Crashsimulation mechanisch gefügter Verbindungen*. Tagungsband. 15. Deutsches LS-DYNA Forum, DYNAmore GmbH (Hrsg.), Stuttgart, 2018

Sommer, S.; Rochel, P.; Guenther, M.; Herfert, D.; Meschut, G.; Giese, P.: *Crash simulation of mechanical joints with automatically determined model parameters based on test results and prediction algorithms*. 15th International LS-DYNA Users Conference, Detroit, 2018



## **Kurzfassung**

Die zunehmende Ressourcenknappheit und das wachsende Umweltbewusstsein veranlasst die Automobilindustrie verbrauchsarme und klimaneutrale Fahrzeuge zu entwickeln. Ein Weg zur Erreichung dieses Ziels ist die konsequente Umsetzung von Leichtbaukonzepten im Karosseriebau unter Nutzung von mechanischen Fügeverfahren. Eine dabei häufig verwendete Füge­technologie ist das Halbhohlstanznieten. Im Fahrzeugentwicklungsprozess wird zur Absicherung der Anforderungen, wie z.B. der Karosseriesteifigkeit, ein virtueller Prototyp des Fahrzeugs erstellt. Hierbei werden die Stanznietverbindungen durch vereinfachte Ersatzmodelle berücksichtigt. Die Ermittlung der notwendigen Eingangsdaten für die Ersatzmodelle ist jedoch mit einer Vielzahl von zeit- und kostenaufwändigen experimentellen Versuchen verbunden. Das Ziel dieser Arbeit ist es daher, eine Methode zur Prognose des Tragverhaltens von Halbhohlstanznietverbindungen zu entwickeln. Damit sollen wichtige Ersatzmodellparameter, wie z.B. die Maximalkraft der Stanznietverbindung, ohne die Durchführung von experimentellen Versuchen ermittelt werden können. Die für die Prognose erforderliche Datenbasis wird zunächst mit einer Charakterisierung des Trag- und Versagensverhaltens von Stanznietverbindungen ermittelt. Bei der Analyse von datenbasierten Zusammenhängen zeigen die mit der Blechdicke gewichteten festigkeitsbeschreibenden Werkstoffkennwerte die beste Korrelation zur Maximalkraft der Verbindungen. Auf der Grundlage dessen wird eine Prognosefunktion für die Vorhersage der Maximalkraft einer Stanznietverbindung entwickelt und validiert. Nach einer Optimierung der Prognosefunktion wird insgesamt eine gute Prognosegüte erzielt.

## **Abstract**

The increasing scarcity of resources and growing environmental awareness is prompting the automotive industry to develop fuel-efficient and climate-neutral vehicles. One way to achieve this goal is the consistent implementation of lightweight design concepts in body construction using mechanical joining processes. One joining technology frequently used in this context is semi-tubular self-pierce riveting. In the vehicle development process, a virtual prototype of the vehicle is created to verify the requirements, such as body stiffness. In this process, the self-pierce riveting joints are considered by simplified models. However, the determination of the necessary input data for the simplified models involves many time-consuming and costly experimental tests. Therefore, the aim of this thesis is to develop a method to predict the load bearing behavior of semi-tubular self-pierce rivet joints. With this method, important simplified model parameters, such as the maximum force of the self-pierce rivet joint, can be determined without conducting experimental tests. The data base required for the prognosis is first determined by characterizing the load bearing and failure behavior of self-pierce riveted joints. In the analysis of data-based correlations, the strength-describing material parameters weighted with the sheet thickness show the best correlation to the maximum force of the joints. Based on this, a prediction function is developed and validated for predicting the maximum force of a self-pierce rivet joint. After optimizing the prediction function, a good overall prediction quality is achieved.



## Inhaltsverzeichnis

<b>Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen .....</b>	<b>iv</b>
<b>1 Einleitung .....</b>	<b>1</b>
<b>2 Stand der Technik .....</b>	<b>3</b>
2.1 Halbhohlstanznieten .....	3
2.1.1 Verfahrenseinordnung .....	3
2.1.2 Verfahrensablauf .....	4
2.1.3 Einsatzgebiete des Halbhohlstanznietens .....	5
2.2 Berechnung und Auslegung von punktförmigen Verbindungen .....	7
2.2.1 Analytische Auslegung von punktförmigen Fügeverbindungen .....	7
2.2.2 Numerische Berechnung von punktförmigen Verbindungen.....	9
2.3 Statistische Analyseverfahren.....	10
2.3.1 Lineare Regression .....	10
2.3.2 Maßzahlen für die Güte des Regressionsmodells .....	11
2.3.3 Multiple und multivariate Regression.....	12
2.3.4 Statistische Lernverfahren .....	13
2.3.5 Vorhersage von Prozessparametern und Verbindungseigenschaften beim Fügen mit Hilfe von statistischen Analyseverfahren.....	14
2.4 Auswertung des Standes der Technik .....	18
<b>3 Zielsetzung und Vorgehensweise.....</b>	<b>19</b>
<b>4 Versuchswerkstoffe und –einrichtungen .....</b>	<b>21</b>
4.1 Verwendete Fügeteilwerkstoffe.....	21
4.1.1 HC340LA.....	21
4.1.2 HCT590X.....	22
4.1.3 EN AW-6016.....	22
4.1.4 EN AW-6060.....	23
4.2 Verwendete Hilfsfügeelemente und Matrizen .....	24
4.3 Verwendete Probengeometrien .....	25
4.3.1 Proben zur Werkstoffcharakterisierung.....	25
4.3.2 Einfach überlappte Scherzugprobe .....	26
4.3.3 LWF-KS-2-Probe .....	26

---

4.4	Verwendete Füge- und Prüfeinrichtungen .....	27
4.4.1	Halbhohlstanznietanlage .....	27
4.4.2	Universalprüfmaschine .....	28
4.4.3	Optische Verformungsmessung .....	29
<b>5</b>	<b>Charakterisierung der Versuchswerkstoffe und der Stanznietverbindungen.....</b>	<b>30</b>
5.1	Charakterisierung der Versuchswerkstoffe .....	30
5.2	Bemusterung.....	32
<b>6</b>	<b>Experimentelle Ermittlung des Trag- und Versagensverhaltens von Stanznietverbindungen.....</b>	<b>35</b>
6.1	Mischbau-Verbindungen .....	35
6.2	Stahl-Stahl-Verbindungen.....	40
6.3	Aluminium-Aluminium-Verbindungen .....	44
<b>7</b>	<b>Analyse des Einflusses von Werkstoffkennwerten und Verbindungskenngrößen auf das Tragverhalten.....</b>	<b>48</b>
7.1	Analyse des Einflusses der mechanischen Werkstoffkennwerte auf das Tragverhalten.....	48
7.1.1	Mischbau-Verbindungen.....	48
7.1.2	Stahl-Stahl-Verbindungen.....	56
7.1.3	Aluminium-Aluminium-Verbindungen .....	60
7.2	Analyse des Einflusses von Verbindungskenngrößen auf das Tragverhalten.....	64
7.3	Bewertung der Eignung der Werkstoff- und Verbindungskenngrößen für die Prognose des Tragverhaltens .....	68
<b>8</b>	<b>Prognose des Tragverhaltens von Halbhohlstanznietverbindungen .....</b>	<b>69</b>
8.1	Mischbau-Verbindungen .....	70
8.2	Stahl-Stahl-Verbindungen.....	73
8.3	Aluminium-Aluminium-Verbindungen .....	76
<b>9</b>	<b>Validierung der Prognosefunktion.....</b>	<b>79</b>
9.1	Mischbau-Verbindung .....	79
9.2	Stahl-Stahl-Verbindung.....	82
9.3	Aluminium-Aluminium-Verbindung.....	85
9.4	Optimierung der Prognosefunktion .....	88

---

9.4.1	Analyse der Ursache für die unterschiedlich hohe Prognosegüte unter LWF-KS-2-0°- und -90°-Belastung .....	88
9.4.2	Durchführung und Validierung der Prognosefunktionsoptimierung am Beispiel einer Mischbau-Verbindung .....	100
9.4.3	Durchführung und Validierung der Prognosefunktionsoptimierung am Beispiel einer Stahl-Stahl-Verbindung .....	105
9.5	Implementierung der Prognosefunktion in ein Software-Tool .....	107
<b>10</b>	<b>Zusammenfassung.....</b>	<b>109</b>
<b>11</b>	<b>Literaturverzeichnis .....</b>	<b>112</b>

## Verwendete Formelzeichen und Abkürzungen

### Abkürzungen

Abkürzung	Benennung
Al	Aluminium
B	Bor
Bzw.	Beziehungsweise
C	Kohlenstoff
CO <sub>2</sub>	Kohlenstoffdioxid
Cr	Chrom
Cu	Kupfer
D.h.	Das heißt
DIN	Deutsches Institut für Normung
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
EFB	Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.
Fe	Eisen
FDM	Feindehnungsmessaufnehmer
FEM	Finite-Elemente-Methode
FM	Flachmatrize
FKM	Forschungskuratorium Maschinenbau
GmbH	Gesellschaft mit beschränkter Haftung
GmbH & Co. KG	Gesellschaft mit beschränkter Haftung & Compagnie Kommanditgesellschaft
GOM	Gesellschaft für Optische Messtechnik
KA	Kegelmatrize vom Typ A
KNN	Künstliche Neuronale Netze
KS-2	Kopfzug-Scherzug 2

LWF	Laboratorium für Werkstoff- und Fügetechnik
Mg	Magnesium
Mn	Mangan
Mo	Molybdän
Nb	Niob
Nd:YAG-Laser	Neodym-dotierter Yttrium-Aluminium-Granat-Laser
P	Phosphor
S	Schwefel
SEP	Stahl-Eisen-Prüfblatt
Si	Silizium
SQE	Sum of Squares Explained
SQR	Sum of Squares Residuals
SQT	Sum of Squares Total
SK	Senkkopf
SKR	Senkkopf mit Radius
Ti	Titan
u.a.	Unter anderem
V	Vanadium
vgl.	vergleiche
WEZ	Wärmeeinflusszone
z.B.	zum Beispiel
Zn	Zink

### Formelzeichen

Formelzeichen	Benennung	Einheit
$\alpha$	Regressionskoeffizient	-
$\hat{a}$	Kleinste-Quadrate-Schätzer	-

$\alpha_N$	Abminderungsfaktor	-
$A_{20}$	Bruchdehnung bei $L_0 = 20$ mm	%
$A_{80}$	Bruchdehnung bei $L_0 = 80$ mm	%
$\beta$	Regressionskoeffizient	-
$\hat{\beta}$	Kleinste-Quadrate-Schätzer	-
$c_P$	Steifigkeit der Probe	N/mm
$\varepsilon$	Dehnung	%
$\dot{\varepsilon}$	Dehnrage	-
$E$	E-Modul	N/m <sup>2</sup>
$f$	Funktion	-
$F$	Kraft	N
$F_{max}$	Maximalkraft	N
$F_{p0,2}$	Streckkraft	N
$F_u$	Unterkraft	N
$I$	Flächenträgheitsmoment	mm <sup>4</sup>
$L_0$	Anfangsmesslänge	mm
$L_c$	Parallele Länge	mm
$r$	Korrelationskoeffizient	-
$R$	Lastverhältnis	-
$R^2$	Bestimmtheitsmaß	-
$R_m$	Zugfestigkeit	MPa
$R_{m,M}$	Zugfestigkeit des matrizenseitigen Fügeteils	MPa
$R_{m,NR}$	Grenznahtfestigkeit	MPa
$R_{m,S}$	Zugfestigkeit des stempelseitigen Fügeteils	MPa
$R_{p0,2}$	Dehngrenze	MPa

$R_{p0,2,M}$	Dehngrenze des matrizenseitigen Fügeteils	MPa
$R_{p0,2,S}$	Dehngrenze des stempelseitigen Fügeteils	MPa
$s$	Weg	mm
$s_B$	Weg bei Probenbruch	mm
$s_{Fmax}$	Weg bei Maximalkraft	mm
$s_{1/3Fmax}$	Weg bei 1/3 $F_{max}$	mm
$\sigma$	Spannung	MPa
$\sigma_{nenn}$	Nennspannung	MPa
$t$	Fügeteildicke	mm
$t_{gesmin}$	Minimale Gesamtblechdicke	mm
$t_{gesmit}$	Mittlere Gesamtblechdicke	mm
$t_{gesmax}$	Maximale Gesamtblechdicke	mm
$t_M$	Fügeteildicke des matrizenseitigen Fügeteils	mm
$t_S$	Fügeteildicke des stempelseitigen Fügeteils	mm
$v$	Geschwindigkeit	mm/min
$w$	Durchbiegung	mm
$W$	Energieaufnahme	J
$x$	Kovariable	-
$y$	Zielvariable	-
$\bar{x}$	Arithmetisches Mittel der Kovariablen	
$\bar{y}$	Arithmetisches Mittel der Zielvariable	-
$\hat{y}$	Prognostizierter Wert der Zielvariable	-