

Forschungsbericht 1-2003

**Berechnung und Dimensionierung von  
Klebverbindungen mit der Methode der Finiten Elemente  
und experimentelle Überprüfung der Ergebnisse**

M. Schlimmer

J. Bornemann

Institut für Werkstofftechnik

Werkstofftechnik mit dem Schwerpunkt

Verbundwerkstoffe / Werkstoffverbunde

Universität Kassel



Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel

**Michael Schlimmer,  
Jörg Bornemann**

**Berechnung und Dimensionierung von  
Klebverbindungen mit der Methode der  
Finiten Elemente und experimentelle Überprüfung  
der Ergebnisse**

Shaker Verlag  
Aachen 2004

**Bibliografische Information der Deutschen Bibliothek**

Die Deutsche Bibliothek verzeichnet diese Publikation in der Deutschen Nationalbibliografie; detaillierte bibliografische Daten sind im Internet über <http://dnb.ddb.de> abrufbar.

Copyright Shaker Verlag 2004

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

Printed in Germany.

ISBN 3-8322-2484-X

ISSN 1613-3498

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) • eMail: [info@shaker.de](mailto:info@shaker.de)

## Kurzfassung

Derzeit setzt die Fahrzeugindustrie verstärkt Kleben als industrielles Fügeverfahren ein. Beispielhaft seien Klebverbindungen an der Karosserie von Pkws sowie an Beplankungen von Bussen und Bahnen genannt. Im Wesentlichen geschieht der Konstruktions-, Dimensionierungs- und Berechnungsprozess im Fahrzeugbau rechnergestützt mit Hilfe der Methode der Finiten Elemente (FEM). Doch herrscht noch immer in vielen Bereichen Unkenntnis über den numerischen Berechnungsprozess von geklebten Verbindungen. Das Ziel der Arbeit war daher die Entwicklung und die Verifizierung eines Berechnungsverfahrens auf der Grundlage der FEM zur Auslegung geklebter Strukturen.

Zur Ermittlung von Klebstoffkennwerten und zum Aufstellen von Stoffgleichungen wurden daher exemplarisch ein Polyurethan- und ein Epoxidharzklebstoff in einachsigen und kombinierten Grundversuchen an Zugscherproben, angelehnt an ISO 11003-2, sowie an stumpf geklebten Rohrproben in Anlehnung an ISO 11003-1 untersucht.

Die ermittelten Klebschichtfestigkeiten des EP-Klebstoffs unter kombinierter Beanspruchung zeigen, dass die bisher in den FE-Programmen implementierten Anstrengungshypothesen nach Mises und Drucker-Prager für den untersuchten Klebstoff nicht zutreffen. Eine aus dem allgemeinen plastischen Potential hergeleitete Anstrengungshypothese beschreibt jedoch die experimentell ermittelte Fließortkurve. Auf der Basis dieser Fließbedingung können die Spannung-Verformung-Zusammenhänge aus einachsigen und kombinierten Versuchen in einen einheitlichen Vergleichszustand überführt werden.

Berechnet man dennoch das Verformungsverhalten einer geklebten Rohrprobe bei Zug- und Schubbeanspruchung sowie das Verformungsverhalten einer Zugscherprobe mit den bereits in FE-Programmen implementierten Stoffgleichungen, so stimmt das numerische Ergebnis nur bei reiner Schubbeanspruchung mit dem experimentellen Befund überein. Treten hydrostatische Spannungszustände auf, so stimmt das numerische Klebschichtverhalten nur bei kleinen rein elastischen Deformationen mit dem Experiment überein. Das Verformungsverhalten einer überlappt geklebten bauteilähnlichen Verbindung, deren Klebschicht einer äußeren Zugscherbeanspruchung unterliegt, konnte deshalb mit dem in ABAQUS

implementierten modifizierten Drucker-Prager-Modell in erster Näherung numerisch berechnet werden.

**Somit wurde das Ziel des Vorhabens erreicht.**

Der vorliegende Forschungsbericht beinhaltet die vom Institut für Werkstofftechnik der Universität Kassel erarbeiteten Teilergebnisse eines gemeinsam mit dem ehemaligen Lehr- und Forschungsgebiet Klebtechnik (LKT) der RWTH Aachen bearbeiteten Forschungsprojekts. Die vom LKT unter der Leitung von Prof. Dr.-Ing. Dilger (heute Leiter des Instituts für Füge- und Schweißtechnik der TU Braunschweig) durchgeführten, in diesem Bericht nicht dargestellten Untersuchungen behandelten u. a. die Berechnungen zur Auslegung von geklebten Strukturen für einen PUR-Klebstoff.

Die Untersuchungen wurden aus Haushaltsmitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Arbeit über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) (AiF-Nr. 12.620 N / DVS-Nr. 9.024) gefördert und von der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS unterstützt. Für diese Förderung und Unterstützung sei gedankt.

# Inhaltsverzeichnis

<b>KURZFASSUNG</b>	<b>III</b>
<b>INHALTSVERZEICHNIS</b>	<b>V</b>
<b>ABKÜRZUNGEN, SYMBOLE, INDIZES</b>	<b>IX</b>
<b>1 EINLEITUNG UND PROBLEMSTELLUNG</b>	<b>1</b>
<b>2 STAND DER FORSCHUNG</b>	<b>5</b>
<b>3 MECHANISCHE KENNWERTERMITTLUNG</b>	<b>9</b>
3.1 Probekörper	9
3.1.1 Versuchswerkstoffe	9
3.1.2 Probenfertigung	10
3.2 Versuchseinrichtungen	16
3.2.1 Zugversuch	16
3.2.2 Zugscherversuch	18
3.2.3 Einachsige und kombinierte Zug- / Torsionsversuche	21
3.3 Experimentelle Ergebnisse für den EP-Klebstoff	27
3.3.1 Einachsiger Zugversuch	27
3.3.2 Zugscherversuch	28
3.3.3 Zug- / Torsionsversuche	33
3.4 Experimentelle Ergebnisse für den PUR-Klebstoff	41
3.4.1 Einachsiger Zugversuch	41
3.4.2 Zugscherversuch	43
3.4.3 Zug- / Torsionsversuche	43

---

<b>4</b>	<b>MATERIALMODELLE FÜR DEN EP-KLEBSTOFF</b>	<b>47</b>
4.1	Linearelastisches Verhalten	47
4.2	Ramberg-Osgood Plastizität	47
4.3	Allgemeine Fließbedingung / Anstrengungshypothese	48
4.4	Erweiterte Drucker-Prager Modelle	55
<b>5</b>	<b>NICHTLINEARE FINITE ELEMENTE ANALYSE DER EP- PROBEKÖRPER</b>	<b>57</b>
5.1	Spannung-Dehnung Beziehung	57
5.1.1	Vergleichsspannung-Vergleichsdehnung nach Mises	57
5.1.2	Vergleichsspannung-Vergleichsdehnung nach Schlimmer	59
5.2	Analyse mit dem plastischen Potential nach Mises (Deformation-Plasticity- Modell)	64
5.2.1	Bestimmung der Ansatzfreiwerte	65
5.2.2	Validierung an Ein-Element-Modell	66
5.2.3	Nachrechnung der Rohrprobe bei Zug- und Torsionsbeanspruchung	67
5.2.4	Nachrechnung des Zugscherversuchs	72
5.3	Analyse mit dem plastischen Potential nach Drucker-Prager	74
5.3.1	Bestimmung der Ansatzfreiwerte	74
5.3.2	Validierung an Ein-Element-Modell	76
5.3.3	Nachrechnung der Rohrprobe bei Zug- und Torsionsbeanspruchung	77
5.3.4	Nachrechnung des Zugscherversuchs	82
5.4	Auswahl eines Materialmodells für weitere Berechnungen	84

---

<b>6</b>	<b>EP-PROTOTYP</b>	<b>87</b>
6.1	Experimentelle Untersuchungen	87
6.1.1	Probekörper	87
6.1.2	Untersuchung der bauteilähnlichen Klebverbindung	89
6.1.3	Ergebnis der Bauteilprüfung	90
6.2	Finite Elemente Analyse	94
6.2.1	FE-Modell	94
6.2.2	Berechnungsergebnis	95
6.3	Vergleich mit experimentell ermitteltem Bauteilverhalten	100
<b>7</b>	<b>WIRTSCHAFTLICHE BEDEUTUNG DES FORSCHUNGSPROJEKTES FÜR KLEINE UND MITTLERE UNTERNEHMEN</b>	<b>105</b>
<b>8</b>	<b>ZUSAMMENFASSUNG</b>	<b>109</b>
<b>9</b>	<b>LITERATURVERZEICHNIS</b>	<b>115</b>