

# **Untersuchung der mechanischen Eigenschaften injektionsgefügter Rundsteckverbindungen**

Dissertation

zur Erlangung des akademischen Grades eines  
Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.)

im Fachbereich Maschinenbau der  
Universität Kassel

vorgelegt von  
Dipl.-Ing. Marc Siebert

Immenhausen, den 06. Dezember 2005

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Schlimmer

Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. O. Hahn



Schriftenreihe des Instituts für Werkstofftechnik Kassel

**Marc Siebert**

**Untersuchung der mechanischen Eigenschaften  
injektionsgefügter Rundsteckverbindungen**

Shaker Verlag  
Aachen 2006

### **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.

Zugl.: Karlsruhe, Univ., Diss., 2006

Die vorliegende Arbeit wurde vom Fachbereich Maschinenbau der Universität Kassel als Kasseler Dissertation zur Erlangung des akademischen Grades eines Doktors der Ingenieurwissenschaften (Dr.-Ing.) angenommen.

Erster Gutachter: Prof. Dr.-Ing. M. Schlimmer  
Zweiter Gutachter: Prof. Dr.-Ing. O. Hahn

Tag der mündlichen Prüfung: 16.02.2006

Copyright Shaker Verlag 2006

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

Printed in Germany.

ISBN-10: 3-8322-5412-9

ISBN-13: 978-3-8322-5412-4

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

## **Erklärung**

Hiermit versichere ich, dass ich die vorliegende Dissertation selbständig und ohne unerlaubte Hilfe angefertigt und andere als die in der Dissertation angegebenen Hilfsmittel nicht benutzt habe. Alle Stellen, die wörtlich oder sinngemäß aus veröffentlichten oder unveröffentlichten Schriften entnommen sind, habe ich als solche kenntlich gemacht. Kein Teil dieser Arbeit ist in einem anderen Promotions- oder Habilitationsverfahren verwendet worden.

Teile dieser Dissertation sind vorab in Form von Forschungsberichten, die im Rahmen von durch die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) geförderten Forschungsvorhaben mit den Titeln „Verkleben von Aluminiumschäumen mit metallischen Hohl- und Vollprofilen“ und „Prozesssicheres Kleben von Rundsteckverbindungen aus metallischen Werkstoffen unter rauen Fertigungsbedingungen“ verfasst worden, sowie in Form von Veröffentlichungen erschienen.

Immenhausen, 06. Dezember 2005

Marc Siebert

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Angestellter am Institut für Werkstofftechnik der Universität Kassel. Mein Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. M. Schlimmer für die Überlassung des Themas, die Betreuung der Arbeit sowie die Übernahme des Hauptreferats. Herrn Prof. Dr.-Ing. O. Hahn danke ich für die Übernahme des Korreferats.

Weiterhin gilt mein Dank allen Mitarbeitern des Instituts für Werkstofftechnik, die mich bei der Durchführung der Forschungsarbeiten tatkräftig unterstützt haben.

Ebenfalls möchte ich allen Studierenden danken, die mich als studentische Hilfskräfte, Studienarbeiter oder Diplomanden unterstützt haben.

Der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen (AiF) sei für die finanzielle Unterstützung gedankt.

Mein besonderer Dank gilt meiner Frau Meike und meinen Eltern für das Verständnis und die liebevolle Unterstützung, die sie mir während dieser Zeit entgegengebracht haben.

Immenhausen, 06. Dezember 2005

Marc Siebert

## Inhaltsverzeichnis

Inhalt	Seite
<b>Kurzfassung</b>	8
<b>Abkürzungen, Formelzeichen, Indizes</b>	9
<b>1 Einleitung</b>	11
<b>2 Stand der Technik</b>	13
<b>2.1 Rundsteckverbindungen aus metallisch zellularen Werkstoffen</b>	13
2.1.1 Aluminiumschaum	13
2.1.2 Herstellung von Aluminiumschaum	14
2.1.3 Eigenschaften von Aluminiumschaum	15
2.1.4 Fügen von Metallschäumen	17
<b>2.2 Rundsteckverbindungen aus metallischen Werkstoffen</b>	21
<b>3 Proben</b>	28
<b>3.1 Verwendete Werkstoffe</b>	28
3.1.1 Klebstoffsysteme	28
3.1.2 Fügeartikelwerkstoffe	29
<b>3.2 Fügeartikelgeometrie und Probenform</b>	32
3.2.1 Variante a)	32
3.2.2 Variante b)	37
<b>3.3 Rundsteckverbindungen mit metallischen Fügeartikeln</b>	40
<b>3.4 Probenfertigung und Fügeverfahren</b>	43
3.4.1 Problematik	43
3.4.2 Probenvorbereitung	44
<b>3.5 Klebstoffinjektion</b>	45
3.5.1 Klebstoffinjektion für Rundsteckverbindungen mit metallisch zellularen Komponenten	45
3.5.2 Spaltfüllung	53
3.5.3 Klebstoffinjektion für Rundsteckverbindungen mit metallisch kompakten Komponenten	56
<b>4 Raue Umgebungs- und Fertigungsbedingungen</b>	64
<b>4.1 Staubniederschlag-Stoffeigenschaften</b>	69
<b>4.2 Reinigung der Klebfläche</b>	70
<b>4.3 Wasseraufnahme polymerer Werkstoffe</b>	72
4.3.1 Wasseraufnahme von O-Ringen	72
<b>4.4 Auslagerung von Klebverbindungen</b>	78
4.4.1 Klebverbindungen mit Aluminiumschaum als einem der Fügeartikelwerkstoffe	78
4.4.2 Klebverbindungen mit Fügeartikeln aus Edelstahl	79
4.4.3 Bewitterung von geklebten Proben	81
4.4.4 Fügen bei niedrigen Umgebungstemperaturen	81

<b>5 Injektion</b>	<b>82</b>
<b>5.1 Füllvorgang</b>	82
<b>5.2 Potenziale und Grenzen des Injektionsverfahrens</b>	86
5.2.1 „Typ-I-Fehler“ (Spaltmaß $\leq 0,1$ mm)	87
5.2.2 „Typ-II-Fehler“ (Exzentrizität)	88
5.2.3 „Typ-III-Fehler“ (Nachgiebigkeit)	91
5.2.4 „Typ-IV-Fehler“ (Topographie)	93
<b>5.3 Gestaltungsrichtlinien (Fügeprozess)</b>	95
<b>5.4 Druckmessung</b>	98
5.4.1 Druckermittlung mechanisch betätigte Dosierpistole (DELO 902)	99
5.4.2 Druckermittlung pneumatisch betätigte Dosierpistole (DELO 903)	100
<b>5.5 Dichtungswirkung und Vorpressung der Dichtelemente</b>	102
<b>6 Substrateigenschaften</b>	<b>105</b>
<b>6.1 Messprinzip</b>	105
<b>6.2 Oberflächenmessung</b>	108
<b>7 Experimentelle Untersuchungen</b>	<b>117</b>
<b>7.1 Versuchseinrichtungen</b>	117
7.1.1 Beanspruchung auf Zug und Torsion	117
<b>7.2 Substanzproben</b>	119
7.2.1 Zugversuche mit Substanzproben	120
7.2.2 Quasistatische Zugbeanspruchung metallisch zellulärer Werkstoffe	122
7.2.3 Quasistatische Torsionsbeanspruchung metallisch zellulärer Werkstoffe	123
7.2.4 Zugbeanspruchung von Rundsteckverbindungen aus metallisch kompakten Werkstoffen	124
7.2.5 Torsionsbeanspruchung von Rundsteckverbindungen aus metallisch kompakten Werkstoffen	125
<b>8 Experimentelle Ergebnisse</b>	<b>126</b>
<b>8.1 Ergebnisse der Zugversuche an Substanzproben</b>	126
<b>8.2 Ergebnisse der Zug- und Torsionsbeanspruchung</b>	130
<b>8.2.1 Zugbeanspruchung</b>	133
<b>8.2.2 Torsionsbeanspruchung</b>	147
<b>9 Biegebeanspruchung</b>	<b>157</b>
<b>9.1 Aufbau zur Biegebeanspruchung</b>	160
<b>10 Experimentelle Ergebnisse der Biegebeanspruchung</b>	<b>163</b>



<b>11</b>	<b>Spannungsverteilung und sektorielle Klebschichten</b>	<b>170</b>
11.1	Spannungsverteilung in Klebschichten	170
11.2	Linearelastische Finite Elemente Analyse (FEA)	171
11.3	Sektorielle Klebschichten	176
11.4	Experimentelle Ergebnisse der Klebverbindungen mit sektoriellen Klebschichten	181
<b>12</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>183</b>
<b>13</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>186</b>