

# **Möglichkeiten der Optimierung von punktförmigen, form- und kraftschlüssigen Feinblechverbindungen**

Von der Fakultät für Maschinenbau  
der Technischen Universität Chemnitz

genehmigte

## **Habilitationsschrift**

zur Erlangung des akademischen Grades  
Doktoringenieur habitatus  
(Dr.-Ing. habil.)

von

**Dr.-Ing. Frank Riedel**

geboren am 04. März 1964 in Karl-Marx-Stadt (heute Chemnitz)

eingereicht am 16. April 2004

Gutachter: Prof. Dr.-Ing. habil. K.-J. Matthes  
Prof. Dr.-Ing. habil. U. Füssel  
Prof. Dr.-Ing. habil. H. Herold

Chemnitz, den 04. Oktober 2004



Schriftenreihe Füge-technik / Schweiß-technik

Band 1/2004

**Frank Riedel**

**Möglichkeiten der Optimierung von punktförmigen,  
form- und kraftschlüssigen Feinblechverbindungen**

D 93 (Habil.-Schr. TU Chemnitz)

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.

Zugl.: Chemnitz, Techn. Univ., Habil.-Schr., 2004

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 3-8322-3398-9

ISSN 1434-7393

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)

*Meiner Tochter Laura*



## **Vorwort**

Die vorliegende Habilitationsschrift entstand während meiner Tätigkeit als Oberingenieur der Professur Schweißtechnik der Technischen Universität Chemnitz.

Dem Leiter der Professur, Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Klaus-Jürgen Matthes, gilt mein besonderer Dank für die großzügige Unterstützung und Betreuung der Arbeit. Danken möchte ich auch Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Uwe Füssel für die kritische Durchsicht dieser Arbeit und die daraus erwachsene Diskussion und konstruktiven Hinweise. Mein Dank für die Begutachtung der Habilitationsschrift gilt ebenfalls Herrn Prof. Dr.-Ing. habil. Horst Herold.

Darüber hinaus möchte ich mich bei Herrn Doz. Dr.-Ing. habil. Erhard Richter für die Gespräche und Anregungen bedanken, die eine wichtige Grundlage für die Struktur der Habilitationsschrift bildeten.

Danken möchte ich auch allen Mitarbeitern der Professur Schweißtechnik, die die Entstehung der Habilitationsschrift unterstützten. Mein besonderer Dank gilt Herrn Dipl.-Ing. Marcel Todtermuschke und Herrn Dipl.-Ing. Heiko Lang, die bei der Durchführung von Versuchen einen wichtigen Beitrag für die praktischen Ergebnisse dieser Arbeit leisteten und insbesondere an zahlreichen wissenschaftlichen Diskussionen beteiligt waren.

Nicht zuletzt gilt mein Dank allen, insbesondere meiner Familie, die mich direkt oder indirekt während der Zeit meines Habilitationsvorhabens unterstützt haben.

Chemnitz, Oktober 2004

Frank Riedel



---

## Inhaltsverzeichnis

	Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole	IV
<b>1</b>	<b>Einleitung</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Punktförmige, form- und kraftschlüssige Feinblechverbindungen</b>	<b>4</b>
2.1	Definitionen, Begriffsbestimmungen und Grundlagen	4
2.1.1	Feinbleche	4
2.1.2	Fügen	4
2.1.3	Fügeprozess	5
2.1.4	Fügeverfahren	6
2.1.5	Fügeverbindungen	8
2.1.5.1	Definition	8
2.1.5.2	Schlussarten	9
2.1.5.3	Grundeigenschaften	10
2.1.5.3.1	Allgemeine Eigenschaften	10
2.1.5.3.2	Konstruktive Eigenschaften	13
2.1.5.4	Elementare und kombinierte Fügeverbindungen	16
2.2	Bedeutung von Feinblechen	17
2.3	Verfahren zum Fügen von Feinblechen	23
2.3.1	Übersicht der Verfahren und Anwendungen	23
2.3.2	Verfahren der Fertigungsverfahrengruppe Fügen durch Umformen	27
2.4	Punktförmige, form- und kraftschlüssige Feinblechverbindungen, hergestellt durch Fügen durch Umformen	31
2.4.1	Allgemeiner Überblick	31
2.4.1.1	Übersicht, Fügbarkeit und Grundeigenschaften der Verbindungen	31
2.4.1.2	Vorteile der Verbindungen und Anwendungspotenzial	32
2.4.1.3	Nachteile der Verbindungen, Entwicklungs- und Optimierungspotenzial	33
2.4.2	Clinchverbindungen	34
2.4.2.1	Begriffsdefinition	34
2.4.2.2	Verfahrensprinzipien, Herstellungstechnologie und Fügbarkeit	35
2.4.2.3	Eigenschaften	38
2.4.2.3.1	Mechanische Eigenschaften und Wirkmechanismus der Kraftübertragung	38
2.4.2.3.2	Sonstige Grundeigenschaften	41
2.4.2.4	Vor- und Nachteile der Verbindungen	42

<b>3</b>	<b>Möglichkeiten der Optimierung von punktförmigen, form- und kraftschlüssigen Feinblechverbindungen</b>	<b>44</b>
3.1	Optimierung der Fügetechnik bezüglich des Produktlebenszyklus	44
3.2	Optimierung von punktförmigen, form- und kraftschlüssigen Feinblechverbindungen am Beispiel Clinchverbindungen	46
3.2.1	Optimierungsmöglichkeiten	46
3.2.2	Technologische Optimierung - Entwicklung einer einseitig ebenen Verbindung	50
3.2.3	Konstruktive Optimierung	51
<b>4</b>	<b>Entwicklung einer einseitig ebenen, mechanisch einstufig gefügten Feinblechverbindung</b>	<b>53</b>
4.1	Theoretische Betrachtungen zur möglichen Herstellung einseitig ebener, mechanisch einstufig gefügter Feinblechverbindungen	53
4.1.1	Entwicklungsstrategie	53
4.1.2	Voraussetzungen für die Herstellung von Kaltpressschweißverbindungen	54
4.1.3	Möglichkeiten der Beeinflussung des Werkstoffflusses beim Fügen	56
4.2	Herstellung und Untersuchung von einseitig ebenen, mechanisch einstufig gefügten Feinblechverbindungen	58
4.2.1	Versuchsplanung, Versuchsdurchführung, Auswert- und Prüfmethode	58
4.2.1.1	Versuchsplanung	58
4.2.1.2	Versuchsdurchführung	60
4.2.1.3	Auswert- und Prüfmethode	62
4.2.1.3.1	Beurteilung der Ausbildung der Verbindungen	62
4.2.1.3.2	Bestimmung der mechanischen Eigenschaften	65
4.2.2	Experimenteller Nachweis der Herstellung von einseitig ebenen, mechanisch einstufig gefügten Feinblechverbindungen	66
4.2.3	Signifikante Einflussgrößen auf die Herstellung und die Eigenschaften von einseitig ebenen, mechanisch einstufig gefügten Feinblechverbindungen	69
4.2.3.1	Oberflächenbeschaffenheit	69
4.2.3.2	Feinblechwerkstoffe	72
4.2.3.3	Feinblechdicke	74
4.2.3.4	Fügewerkzeuge	75
4.2.3.5	Fügekraft und Stempelweg	77
4.2.4	Bereiche der Fügbarkeit und Eigenschaften von einseitig ebenen, mechanisch einstufig gefügten Feinblechverbindungen	81
4.2.4.1	Bereiche der Fügbarkeit	81
4.2.4.2	Verbindungseigenschaften	82

---

4.3	Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den theoretischen Vorbetrachtungen zur Herstellung und den Eigenschaften von einseitig ebenen, mechanisch einstufig gefügten Feinblechverbindungen	84
<b>5</b>	<b>Ermittlung von mechanischen Kennwerten von punktförmigen, form- und kraftschlüssigen Feinblechverbindungen am Beispiel Clinchverbindungen</b>	<b>88</b>
5.1	Theoretische Betrachtungen	88
5.2	Untersuchungen zur Ermittlung von mechanischen Kennwerten für Clinchverbindungen	95
5.2.1	Versuchsplanung, Versuchsdurchführung, Auswert- und Prüfmethode	95
5.2.1.1	Allgemeine Randbedingungen der Versuche	95
5.2.1.2	Randbedingungen für die Versuche zur Ermittlung eines Kraftschlussanteiles in den Verbindungen	96
5.2.1.3	Randbedingungen für die Versuche zur Ermittlung von Dehnwerten der Verbindungen	98
5.2.2	Auswertung der Versuchsergebnisse zum Nachweis eines Kraftschlussanteiles	101
5.2.3	Auswertung der Versuchsergebnisse mehrfach be- und entlasteter Clinchverbindungen	103
5.3	Vergleich der Untersuchungsergebnisse mit den theoretischen Vorbetrachtungen und Ausblick auf notwendige fortführende Untersuchungen	109
<b>6</b>	<b>Möglichkeit der analytischen Bemessung von punktförmigen, form- und kraftschlüssigen Fügenähten mittels Nennspannungen</b>	<b>112</b>
6.1	Methoden der Bemessung von punktförmig, form- und kraftschlüssig gefügten Konstruktionen	112
6.2	Theoretische Betrachtungen und Voruntersuchungen	113
6.3	Diskussion der theoretischen Betrachtungen und Vorversuche und Ausblick auf notwendige fortführende Untersuchungen	124
<b>7</b>	<b>Einschätzung der Ergebnisse zur Optimierung von punktförmigen, form- und kraftschlüssigen Feinblechverbindungen und Ausblick</b>	<b>126</b>
<b>8</b>	<b>Zusammenfassung</b>	<b>130</b>
<b>9</b>	<b>Literaturverzeichnis</b>	<b>133</b>
<b>Anlagen</b>		<b>146</b>

## Formelzeichen, Abkürzungen und Symbole

Symbol	Einheit	Benennung
A	mm <sup>2</sup>	Fläche
A <sub>KP</sub>	mm <sup>2</sup>	kaltpressverschweißte Fläche
A <sub>Ü</sub>	mm <sup>2</sup>	Überlappfläche
A <sub>ges</sub>	mm <sup>2</sup>	gesamte Fläche
A <sub>50mm</sub>	%	Bruchdehnung für nichtproportionale Proben (L <sub>0</sub> = 50 mm)
α <sub>N</sub>	-	Konstante für die Abminderung der Nahtfestigkeit
b	mm	Probenbreite
d <sub>A</sub>	mm	Ambossdurchmesser
d <sub>M</sub>	mm	Matrizendurchmesser
d <sub>S</sub>	mm	Stempeldurchmesser
e	mm	Punktabstand (Abstand der Verbindungen)
e <sub>R</sub>	mm	Punkttrandabstand (Abstand der Verbindungen vom Rand)
ε	-	Dehnung
ε <sub>p</sub>	-	Dehngrenze
ε <sub>t</sub>	-	Gesamtdehnung
ε <sub>Ü</sub>	%	Maß des Verformungsgrades beim Kaltpressüberlappschweißen
F	kN	Kraft
F <sub>B</sub>	kN	Bruchkraft
F <sub>D</sub>	kN	Dauerschwingkraft
F <sub>F</sub>	kN	Fügekraft
F <sub>K</sub>	kN	Kopfzugkraft
F <sub>N</sub>	kN	Normalkraft
F <sub>O</sub>	kN	Oberkraft
F <sub>S</sub>	kN	Scherzugkraft
F <sub>U</sub>	kN	Unterkraft
F <sub>a</sub>	kN	Kraftamplitude
F <sub>m</sub>	kN	Höchstzugkraft
F <sub>ms</sub>	kN	Höchstscherzugkraft
F <sub>p0,2</sub>	kN	Streckgrenzenkraft
f	Hz	Frequenz
H	mm	Hinterschnitt
k <sub>f</sub>	MPa	Fließspannung
L	mm	Verlängerung

Symbol	Einheit	Benennung
$L_B$	mm	gesamte Verlängerung bis Bruch
$L_C$	mm	Versuchslänge
$L_E$	mm	freie Einspannlänge
$L_m$	mm	gesamte Verlängerung bis Höchstzugkraft
$L_{p0,2}$	mm	gesamte Verlängerung bis Streckgrenzkraft
$L_0$	mm	Anfangsmesslänge
$L_{0,0,2}$	mm	nichtproportionale Verlängerung (0,2 % der Anfangsmesslänge)
$l_{\dot{u}}$	mm	Überlapplänge
N	-	Schwingenspielzahl
n	-	Probenanzahl
$P_{\dot{U}}$	%	Überlebenswahrscheinlichkeit
$p_{KP}$	%	Kaltpressschweißanteil
R	-	Kraftamplitudenverhältnis
$R_{eH}$	MPa	Streckgrenze
$R_{eL}$	MPa	untere Streckgrenze
$R_m$	MPa	Zugfestigkeit
$R_{m,e=12}$	MPa	Nahtscherzugfestigkeit (Punktabstand: 12 mm)
$R_{m,Naht}$	MPa	Nahtscherzugfestigkeit
$R_p$	MPa	Dehngrenze
$R_{p0,2}$	MPa	0,2 % Dehngrenze
$r_B$	mm	Radius der Bodenfläche
$S_0$	mm <sup>2</sup>	Anfangsquerschnitt
$s_s$	mm	Stempelweg
$\sigma$	MPa	Spannung
$\sigma_a$	MPa	Spannungsamplitude
$\sigma_m$	MPa	Mittelspannung
T	°C	Temperatur
t	mm	Blechdicke
t	s	Zeit
$t_B$	mm	Bodendicke
$t_E$	mm	Stempeleindringtiefe
$t_G$	mm	Gesamtlechdicke
$t_{SA}$	mm	Ausgangsblechdicke des stempelseitigen Bleches
$t_{SR}$	mm	Restblechdicke des stempelseitigen Bleches
$t_1$	mm	stempelseitige Blechdicke
$t_2$	mm	matrizen- oder ambosseiteige Blechdicke

<b>Symbol</b>	<b>Einheit</b>	<b>Benennung</b>
VW	-	Verbindungswertigkeit
v	%	Variationskoeffizient
v <sub>s</sub>	m s <sup>-1</sup>	Schlaggeschwindigkeit
v <sub>z</sub>	mm min <sup>-1</sup>	Zuggeschwindigkeit
φ	-	Winkel für Polarkoordinaten
W <sub>B</sub>	Nm	Brucharbeit