
**Beitrag zur Prozessgestaltung und -optimierung
zum rationellen Widerstandsschweißen
von hochbelasteten Faser-Thermoplast-Strukturen**

**Prozessanalyse, Auslegungsmethode, Parameterstudien,
Anwendung und Industrialisierungskonzept**

Am Fachbereich Maschinenbau
an der Technischen Universität Darmstadt
zur
Erlangung des Grades eines Doktor-Ingenieurs (Dr.-Ing.)
genehmigte

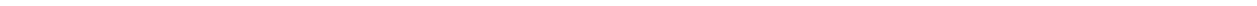
D i s s e r t a t i o n

vorgelegt von

Timm Freudenberg, M. Sc.

aus Weinheim

Berichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann
Mitberichterstatter:	Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam
Tag der Einreichung:	19.10.2016
Tag der mündlichen Prüfung:	20.12.2016



Schriftenreihe Konstruktiver Leichtbau mit
Faser-Kunststoff-Verbunden

Timm Freudenberg

**Beitrag zur Prozessgestaltung und -optimierung
zum rationellen Widerstandsschweißen von
hochbelasteten Faser-Thermoplast-Strukturen**

Prozessanalyse, Auslegungsmethode, Parameterstudien,
Anwendung und Industrialisierungskonzept

D 17 (Diss. TU Darmstadt)

Shaker Verlag
Aachen 2017

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.: Darmstadt, Techn. Univ., Diss., 2016

Copyright Shaker Verlag 2017

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-5065-3

ISSN 1439-7390

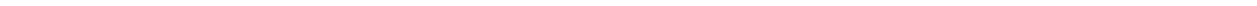
Shaker Verlag GmbH • Postfach 101818 • 52018 Aachen
Telefon: 02407 / 95 96 - 0 • Telefax: 02407 / 95 96 - 9
Internet: www.shaker.de • E-Mail: info@shaker.de

Kurzfassung

Diese Arbeit untersucht und optimiert das Widerstandsschweißen – ein äußerst universelles Verfahren, welches sich hervorragend für anspruchsvolle und hochbelastete Faser-Kunststoff-Strukturen eignet. Das Ziel ist es, die Verfahrensindustrialisierung für größere Produktionsumfänge voranzutreiben. Zur effizienten Prozessqualifizierung wird dem Anwender eine Auslegungsmethode bereitgestellt. Mithilfe dieser Methode wurde das Fügeverfahren befähigt und wurden detaillierte Empfehlungen abgeleitet, sodass zuverlässig hochfeste Schweißverbindungen hergestellt werden können. Darüber hinaus werden betriebsrelevante Fragestellungen wie bspw. der Temperatureinfluss auf die Fügenahtfestigkeit sowie die Reparierbarkeit widerstandsgeschweißter Verbindungen beleuchtet.

Nach der Prozessbefähigung an Flachprobekörpern wurden die erlangten Kenntnisse auf die Schweißung eines generischen Bauteils transferiert. Erläutert werden praktische Herausforderungen, welche die Schweißung realer dreidimensionaler Bauteile entscheidend erschweren (Formtoleranzen, inhomogene Wärmediffusion etc.). Die formulierten Leitsätze unterstützen den Konstrukteur bei einer fügegerechten Bauteil- und Werkzeugkonstruktion, um höchste Fügequalitäten zu realisieren.

Zum Einsatz kamen faserverstärkte Polyamide (PA6), da technische Kunststoffe aufgrund ihres ausgewogenen Kosten-Nutzen-Verhältnisses besonders interessant für Großserienanwendungen sind. Um die Wirtschaftlichkeit des Verfahrens entscheidend zu verbessern, wurden abschließend gänzlich neuartige, innovative Schweißelemente entwickelt: gedruckte Heizelemente. Nach einer systematischen Analyse und Optimierung konnten Fügenahtfestigkeiten auf Referenzniveau erreicht werden. Das Ergebnis einer Wirtschaftlichkeitsbetrachtung bestätigt das hohe Einsparungspotenzial der gedruckten Heizelemente.



Vorwort

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als Doktorand der Fa. *BMW AG*, München, sowie als wissenschaftlicher Mitarbeiter am Fachgebiet *Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen* der *TU Darmstadt* von 2013 bis 2016.

Mein besonderer Dank gilt Herrn Prof. Dr.-Ing. Helmut Schürmann, ehemaliger Leiter des Fachgebiets, für die exzellente Betreuung – fachlich sowie zwischenmenschlich. Ihr großes entgegengebrachtes Vertrauen und Ihre konsequente Förderung haben diese Arbeit erst ermöglicht.

Herrn Prof. Dr.-Ing. Edgar Dörsam, Leiter des *Instituts für Druckmaschinen und Druckverfahren* an der *TU Darmstadt*, danke ich vielmals für die interessierte Übernahme des Koreferats und die umfangreiche experimentelle Unterstützung. Ohne Ihre Versuchseinrichtungen sowie das freundliche Zusammenwirken Ihrer Mitarbeiter wären zahlreiche Experimente nicht realisierbar gewesen. Insbesondere sei den Kollegen Herrn Dr. Hans Martin Sauer und Thorsten Euler sowie Frau Christina Bodenstein gedankt.

Herrn Dr. Wolfgang Hahn, Fa. *BMW AG*, danke ich im Besonderen. Als Initiator dieses Forschungsprojekts hast Du nicht nur das Fundament für diese Arbeit gelegt, sondern mich darüber hinaus herausragend betreut, gefordert und entwickelt. Deine fortwährende Rückendeckung bildete eine entscheidende Grundlage für eine produktive Arbeitsumgebung. An der Stelle sei ebenso den Kollegen Andreas Keller, Detlef Helm und Karol Virsik mein größter Dank für die umfängliche und aktive Unterstützung zugesprochen.

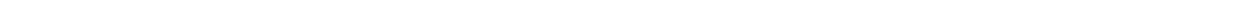
Für die kompetente, engagierte und tatkräftige Mitarbeit verdienen Dr.-Ing. Erich Blohberger, ehemaliger akademischer Direktor des Fachgebiets, sowie das gesamte Werkstatt- und Technikumpersonal meine besondere Anerkennung: Thomas Kötting, Hasan Dadak, Martin Schwarz, Sebastian Locker, Kevin Göttmann, Volker Rosmann sowie Wolfgang Hess.

Meinen Kollegen bei *BMW* sowie am Fachgebiet danke ich für die freundschaftliche, abwechslungsreiche und außergewöhnlich hilfsbereite Zusammenarbeit. Durch Euer Mitwirken habt Ihr ein äußerst positives und unvergessliches kollegiales Arbeitsumfeld geschaffen. Auch sei den zahlreichen von mir betreuten Studierenden gedankt, welche mit großem Einsatz wertvolle Beiträge zu dieser Arbeit geleistet haben.

Meiner Familie gilt mein besonderer Dank für die Förderung und den uneingeschränkten Rückhalt während meiner gesamten akademischen Ausbildung. Besondere Wertschätzung gebührt meiner Frau in spe, auf deren bedingungslose Unterstützung ich immerwährend vertrauen durfte.

München, Januar 2017

Timm Freudenberg

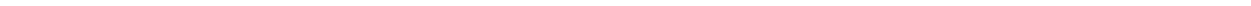


Inhaltsverzeichnis

Symbolverzeichnis	v
1 Einleitung	1
1.1 Motivation: Werkstoffgerechtes Fügen von thermoplastischen FKV	1
1.2 Stand der Technik: Kunststoffschweißen	2
1.2.1 Anforderungen großserientauglicher Fügeverfahren	4
1.2.2 Technologieüberblick und Bewertung	5
1.2.3 Gewählte Technologie: das Widerstandsschweißen	6
1.2.4 Anwendungen und Forschungsstand des Widerstandsschweißens	8
1.3 Fazit: Handlungsbedarf und Ziele der Arbeit	11
2 Diskussion der Einflussparameter	13
2.1 Prozessanalyse: Wirkzusammenhänge und Prozessberechnung	13
2.2 Methode zur Auslegung des Widerstandsschweißprozesses	18
2.3 Untersuchte Einflussgrößen	21
2.3.1 Zur Auswahl des Schweißelementes	21
2.3.2 Zur Realisierung der elektrischen Kontaktierung	22
2.3.3 Zur Problematik elektrischer Verlustströme	23
2.3.4 Zur Festigkeitsminderung durch feuchte Fügepartner	23
2.3.5 Zu den Prozessparametern: Schweißleistung, -energie und Fügedruck..	24
2.3.6 Weitere Einflussgrößen	25
3 Systematische Untersuchungen und Optimierungen zur Prozessbefähigung	27
3.1 Fügepartner, Schweißwerkzeug und Prozessablauf	27
3.2 Qualifizierung der Verfahrenseinflüsse mittels zerstörender Prüfmethode	29
3.2.1 Zugscherversuch	30
3.2.2 G_{IC} -Prüfung	31
3.3 Einfluss der offenen Siebfläche	34
3.4 Einfluss der elektrischen Kontaktierung	36
3.5 Einfluss elektrischer Verlustströme	38
3.6 Einfluss der Feuchtigkeit	43
3.6.1 Analytik zur Diffusion und eingestellte Konditionierungszustände.....	44
3.6.2 Ergebnisse optischer Prüfungen	45
3.6.3 Ergebnisse zerstörender Prüfungen	47
3.6.4 Diskussion zur Korrelation des Feuchtegehalts und der mechanischen Eigenschaften.....	49
3.7 Einfluss der Prozessparameter	50
3.7.1 Einfluss der Schweißleistung und -energie.....	51
3.7.2 Einfluss des Fügedrucks	54
3.7.3 Bruchverhalten und Spannungsbetrachtung der Verschweißung	55

3.7.4	Fazit: Prozessfenster	57
3.8	Einfluss der Prüfbedingungen auf die Festigkeit	59
3.8.1	Abhängigkeit von der Prüftemperatur	59
3.8.2	Abhängigkeit von der Feuchtigkeit	61
3.9	Reparaturkonzept: Festigkeit getrennter, wiederverschweißter Fügepartner	62
3.10	Fazit: Einflussfaktoren und Prozessempfehlungen	64
4	Prozessanwendung an Knoten-Profil-Verbindungen	67
4.1	Fügepartner, Schweißwerkzeug und Prozessablauf	67
4.1.1	Fügepartner: PAZ-Profil und HLV-Knoten	68
4.1.2	Verwendetes Schweißelement	69
4.1.3	Schweißwerkzeug und -ablauf	70
4.2	Analytische Vorauslegung der Verschweißung	71
4.3	Herausforderungen des Schweißprozesses am dreidimensionalen Bauteil	73
4.3.1	Formtoleranz der Fügepartner	73
4.3.2	Ungleichmäßigkeit des Fügedrucks	74
4.3.3	Lokale Überhitzungen aufgrund inhomogener Wärmediffusion	77
4.3.4	Problematik auftretender Verlustströme	80
4.4	Prüfung der Knoten-Profil-Verbindung am Bauteil	81
4.4.1	Prüfaufbau und Vorgehen	81
4.4.2	Einteilung der wichtigsten Versagensarten	82
4.4.3	Überprüfung des Reparaturkonzepts am Bauteil	86
4.4.4	Zusammenfassung und Diskussion der Prüfergebnisse	87
4.5	Fazit: Untersuchungen an Knoten-Profil-Verbindungen	88
4.5.1	Ableitung eines bauteilbezogenen Prozessfensters	90
5	Industrialisierungskonzept: Entwicklung, Untersuchung und Optimierung neuartiger Schweißelemente	91
5.1	Potenziale gedruckter Leiterbahnen im Schweißprozess	91
5.2	Zielsetzung und Vorgehen	92
5.3	Stand der Technik: Technologien für gedruckte Elektronik	93
5.3.1	Funktionales Drucken	94
5.4	Machbarkeitsstudie: Druckversuche und Funktionalitätsprüfung	96
5.4.1	Vorauswahl geeigneter Drucktechniken	96
5.4.2	Bewertungskriterien zur Druckbild- und Funktionalitätsanalyse	98
5.4.3	Untersuchungen geeigneter Drucktechniken	100
5.4.4	Bewertung und Auswahl der Drucktechnologie: der Siebdruck	106
5.5	Fügepartner, Schweißwerkzeug, Verfahren und Methoden	108
5.6	Experimentelle Grundlagenuntersuchungen von gedruckten Leiterbahnen zur Prozessauslegung	109
5.6.1	Zur prototypischen Leiterbahnherstellung mithilfe der Laserkonturierung	109
5.6.2	Zum thermischen Verhalten gedruckter Tinten	112

5.6.3	Zur elektrotechnischen Auslegung von Leiterbahnen in Abhängigkeit von geometrischen Randbedingungen	113
5.6.4	Empfehlungen zur thermischen Nachbehandlung	115
5.7	Simulation und Optimierung des Wärmeeintrags mittels FEM.....	116
5.7.1	Aufbau und Abgleich des FE-Modells	116
5.7.2	FE-Optimierungsrechnungen zum Leiterbahn-Druckbild.....	119
5.7.3	Empfehlungen zur Druckbildgestaltung	124
5.7.4	Übertragbarkeit und Anwendung der Ergebnisse	125
5.8	Experimentelle Ermittlung des Prozessfensters und realisierbarer Festigkeiten .	126
5.8.1	Randbedingungen und Prozessführung.....	126
5.8.2	Bestimmung der Schweißleistung und -energie	129
5.8.3	Bestimmung des Fügedrucks.....	131
5.8.4	Ergebnis: Prozessfenster	132
5.9	Fazit: Prozessinnovation mittels funktionaler Drucktechnologien	133
6	Wirtschaftlichkeitsbetrachtung	135
6.1	Kostenvergleichsrechnung	135
7	Zusammenfassung und Ausblick	137
7.1	Zusammenfassung	137
7.2	Ausblick.....	138
	Literaturverzeichnis	141
	Anhang	151
A	Details zu untersuchten Knoten-Profil-Verbindungen	151
B	Bewertung der Drucktechnologien nach VDI 2225	156
C	Einzelheiten zur Analyse der unterschiedlichen Drucktechnologien.....	162
D	FE-Modellaufbau: Grundlagen, Werkstoffkennwerte und Validierung	169
E	Einzelschritte der Kostenvergleichsrechnung	175



Symbolverzeichnis

Abkürzungen

<i>BMW</i>	<i>Bayrische Motoren Werke</i>
CF	Kohlenstofffaser
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
CT	Computertomografie
DSC	Differential Scanning Calorimetry
EDX	energiedispersive Röntgenspektroskopie
EP	Epoxidharz
FEM	Finite-Elemente-Methode
FKV	Faser-Kunststoff-Verbund
FTV	Faser-Thermoplast-Verbund
GEH	Gestaltenergiehypothese
GF	Glasfaser
HLV	hauptlastpfadverstärkt
<i>IDD</i>	<i>Institut für Druckmaschinen und Druckverfahren</i>
KE	Krafteinleitung
<i>KLuB</i>	<i>Konstruktiver Leichtbau und Bauweisen</i>
PA	Polyamid
PA6	Polyamid aus ϵ -Caprolactam
PA6.6	Polyamid aus Hexamethyldiamin-Adipinsäure
PAZ	Profil-Armierungs-Ziehen
PE	Polyethylen
PEEK	Polyetheretherketon
PEI	Polyetherimid
PEKK	Polyetherketonketon
PP	Polypropylen
PPS	Polyphenylensulfid
PTFE	Polytetrafluorethylen
PVC	Polyvinylchlorid
QI	quasiisotrop
REM	Rasterelektronenmikroskop
SAN	Styrol-Acrylnitril-Copolymer
UD	unidirektional

Griechische Formelzeichen

		Einheit
α	Wärmeübertragungskoeffizient	W/m ² K
α_{20}	Temperaturbeiwert	1/°C
β	Benetzungswinkel	°

δ	spezifischer Widerstand	$\Omega \text{ mm}^2/\text{m}$
ε	Emissionsgrad	–
ε	Dehnung	–
θ	Widerstandsverhältnis	–
κ	Korrekturfaktor	–
λ	Wärmeleitfähigkeit	$\text{W}/\text{m K}$
ζ	Überhöhungsfaktor	–
ρ	Dichte	kg/m^3
σ	Normalspannungen	N/mm^2
τ	Schubspannung	N/mm^2
φ	relativer Faservolumengehalt	%
ϕ	el. Potenzial	V
ψ	relativer Fasermassenanteil	%

Lateinische Formelzeichen		Einheit
A	Fläche	mm^2
a	Risslänge	mm
A_0	relative offene Sieb- bzw. Fügefläche	%
A_s	aufgeschmolzene Fläche	%
A_t	theoretische offene Schweißfläche	%
b	Breite	mm
C	Nachgiebigkeit	mm/N
c	Konzentration	g/mm^3
c	spezifische Wärmekapazität	$\text{J}/\text{kg K}$
d	Durchmesser	mm
D	Diffusionskoeffizient	mm^2/h
E	spezifische Energie	J/m^2
E	Elastizitätsmodul	N/mm^2
f	Abstandsfaktor	–
F	Kraft	N
G_{IC}	Energiefreisetzungsrate unter Mode-I-Belastung	J/m^2
H	Korrekturfaktor	–
h	Höhe	mm
I	el. Stromstärke	A
J	el. Stromdichte	A/m^2
k	Anzahl	–
l	Länge	mm
M	relative Feuchte	%
m	Masse, Flächengewicht	kg, g/m^2
N	Korrekturfaktor	–
n	Anzahl, Wiederholung	–
p	Druck	N/mm^2

P	spezifische Leistung	W/m^2
P_{el}	elektrische Leistung	W
\dot{q}	Wärmestromdichte	$W/m^2, W/m^3$
rF	relative Luftfeuchte	%
R	el. Widerstand	Ω
R	Festigkeit	N/mm^2
R_{sq}	el. Oberflächenwiderstand je Einheitsquadrat (square)	$\Omega \mu m/sq$
s	Weg, Abstand	mm
t	Dicke	mm
t	Zeit	s
T	Temperatur	$^{\circ}C$
T_g	Glasübergangstemperatur	$^{\circ}C$
v	Geschwindigkeit	m/s
w	Maschenweite	mm

Indizes

-	Druck
+	Zug
\perp	senkrecht zur Faser
	faserparallel
CFK	kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff
e	eingbracht
el	elektrisch
f	fabric
gem	gemessen
HE	Heizelement
K	Kontaktierung
L	Leiter
m	Matrix
M	Mitte
MA	Mittelachse
max	maximal
min	minimal
n	normal
NL	Nicht-Leiter
R	Rand
Ref	Referenz
Se	Schweißelement
V	Verlust

Koordinaten

x, y, z	kartesisches Koordinatensystem, Laminatkoordinatensystem
---------	--