

Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Sven Roth

**Schädigungsfreie Anbindung von
hybriden FVK/Metall-Bauteilen
an metallische Tragstrukturen durch
Widerstandspunktschweißen**

Band 244



Forschungsberichte aus dem
wbk Institut für Produktionstechnik
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

Hrsg.: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza
Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Sven Roth, M.Sc.

Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen an metallische Tragstrukturen durch Widerstandspunktschweißen

Band 244

**Schädigungsfreie Anbindung von hybriden FVK/Metall-Bauteilen
an metallische Tragstrukturen durch
Widerstandspunktschweißen**

Zur Erlangung des akademischen Grades
Doktor der Ingenieurwissenschaften
der KIT-Fakultät für Maschinenbau
Karlsruher Institut für Technologie (KIT)

genehmigte
Dissertation

von

Sven Roth, M.Sc.
aus Kandel

Tag der mündlichen Prüfung: 07.06.2021
Hauptreferent: Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Axel Herrmann

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.: Karlsruhe, Karlsruher Institut für Technologie, 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 978-3-8440-8124-4

ISSN 0724-4967

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 • E-Mail: info@shaker.de

Vorwort des Herausgebers

Die schnelle und effiziente Umsetzung innovativer Technologien wird vor dem Hintergrund der Globalisierung der Wirtschaft der entscheidende Wirtschaftsfaktor für produzierende Unternehmen. Universitäten können als "Wertschöpfungspartner" einen wesentlichen Beitrag zur Wettbewerbsfähigkeit der Industrie leisten, indem sie wissenschaftliche Grundlagen sowie neue Methoden und Technologien erarbeiten und aktiv den Umsetzungsprozess in die praktische Anwendung unterstützen.

Vor diesem Hintergrund wird im Rahmen dieser Schriftenreihe über aktuelle Forschungsergebnisse des Instituts für Produktionstechnik (wbk) am Karlsruher Institut für Technologie (KIT) berichtet. Unsere Forschungsarbeiten beschäftigen sich sowohl mit der Leistungssteigerung von additiven und subtraktiven Fertigungsverfahren, den Produktionsanlagen und der Prozessautomatisierung sowie mit der ganzheitlichen Betrachtung und Optimierung der Produktionssysteme und -netzwerke. Hierbei werden jeweils technologische wie auch organisatorische Aspekte betrachtet.

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer

Prof. Dr.-Ing. Gisela Lanza

Prof. Dr.-Ing. habil. Volker Schulze

Vorwort des Verfassers

Die vorliegende Arbeit entstand im Rahmen meiner Tätigkeit als Akademischer Mitarbeiter am wbk Institut für Produktionstechnik des Karlsruher Instituts für Technologie (KIT).

Prof. Dr.-Ing. Jürgen Fleischer möchte ich für die Betreuung meiner wissenschaftlichen Arbeit als Hauptreferent, die konstruktiven Diskussionen und Ratschläge sowie das entgegengebrachte Vertrauen danken. Weiter danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Axel Herrmann für sein Interesse an der Arbeit und die Übernahme des Korreferats. Ebenfalls gilt mein Dank Herrn Prof. Dr. rer. nat. Frank Gauterin für die Übernahme des Prüfungsvorsitzes.

Allen Kolleginnen und Kollegen am wbk, insbesondere im Bereich „Maschinen, Anlagen und Prozessautomatisierung“, danke ich für die kollegiale Zusammenarbeit und die vielen gemeinsamen Erinnerungen am Institut. Auch möchte ich mich bei allen Sekretariaten, Service-Centern und insbesondere bei der Werkstatt für die Unterstützung und die freundschaftliche Zusammenarbeit am Institut bedanken. Gleiches gilt für die vielen Studentinnen und Studenten, die im Rahmen von Abschlussarbeiten oder als wissenschaftliche Hilfskräfte zum Gelingen meiner Arbeit beigetragen haben.

Meinen Eltern und meiner Schwester danke ich herzlich für die jahrelange Unterstützung und den benötigten Freiraum zur Verfolgung meiner Wünsche und Ziele.

Zuletzt möchte ich meiner Ehefrau Simone meinen tiefen Dank aussprechen. Dein Rückhalt und deine bedingungslose Liebe geben mir die Kraft mich zu entfalten und auch schwierige Aufgaben zu meistern.

Kandel, 07. Juni 2021

Sven Roth, M.Sc.

Abstract

Legal framework conditions for climate protection and a growing ecological awareness are leading to an increasingly important role for lightweight design in the automotive sector. In order to be able to achieve the resource efficiency goals of future vehicles from an economic point of view, modern car bodies are being built using the so-called mixed construction method. Depending on the prevailing component requirements, components made of metal and fiber-reinforced plastic (FRP) are combined with each other to achieve weight savings.

The joining of the individual body components is of particular importance, with resistance spot welding being the preferred joining method due to the achievable degree of automation and the low costs per weld spot. To enable the spot welding technology for joining metal components with fiber-reinforced plastics, spot weldable inserts can be used. They act as a welding interface and are used to transfer the load into the composite over a large area.

So far, however, there are no approaches that consider the introduction of weldable inserts in the resin transfer molding (RTM) process, which has a great potential for industrialization in large-scale production. It is also not known how the temperature distribution during spot welding of FRP/metal composites appears and how thermal damage to the fiber composite can be avoided.

In order to counteract this deficit, a three-step approach is chosen in this thesis. In the first step, the influence of the insert shape and the fiber composite on local temperature maxima is determined by a systematic experimental procedure. Based on this, a recommendation for action shall be derived, which allows a design of the welding process regarding a small temperature influence zone. In a second step, the RTM process is being extended to allow the reliable production of spot-weldable FRP/metal components. The modified RTM process is tested by means of a realistic component geometry and its suitability for automotive body construction will be verified. In the third step, a methodology is developed that allows the design of the joint while avoiding thermal damage to the fiber composite. An analytical approximation of the fiber path allows a realistic description of the fiber orientation after the fiber-appropriate insert integration. Finally, a finite element model is developed which allows the prediction of the temperature distribution during spot-welding of fiber reinforced plastic/metal components under consideration of the anisotropic fiber properties.

As a result of the work it is possible to produce hybrid FRP/metal components using the RTM process and to design their connection to metallic support structures without damage by resistance spot welding.

Inhaltsverzeichnis

Inhaltsverzeichnis	I
Abkürzungen	IV
1 Einleitung	1
1.1 Motivation	1
1.2 Aufbau der Arbeit	5
2 Grundlagen und Stand der Forschung und Technik	6
2.1 Widerstandspunktschweißen	6
2.1.1 Grundlagen	6
2.1.2 Temperaturverteilung	7
2.2 Herstellung von Faserverbundbauteilen im RTM-Prozess	10
2.3 Lasteinleitungselemente für monolithische FVK-Bauteile	12
2.3.1 Lasteinleitung	13
2.3.2 Fügeschnittstelle als Schraubenbindung	17
2.3.3 Fügeschnittstelle als Punktschweißanbindung	18
2.4 Fasergerechte Locheinbringung	20
2.4.1 Modellierung zu Optimierungszwecken	22
2.4.2 Modellierung zu Beschreibungszwecken	23
2.5 Bewertung des Standes von Forschung und Technik	25
2.5.1 Zusammenfassung	25
2.5.2 Defizite vor dem Kontext einer schädigungsfreien Anbindung hybrider FVK/Metall-Bauteile durch punktschweißbare Inserts	26
3 Zielsetzung und Vorgehensweise	29
3.1 Zielsetzung	29
3.2 Vorgehensweise	31
4 Analyse der Einflussgrößen auf lokale Temperaturmaxima	35
4.1 Einfluss der Schweißparameter auf den Wärmeeintrag	36
4.1.1 Verwendete Materialien	37
4.1.2 Ermittlung der Schweißbereichsdiagramme	38

4.1.3	Bewertung des Energieeintrags	42
4.2	Einfluss der Insertgestalt auf die Temperaturverteilung	43
4.2.1	Experimentelles Vorgehen	44
4.2.2	Bewertung der Temperaturverteilung	47
4.3	Einfluss des Faserverbunds auf die Temperaturverteilung	52
4.3.1	Experimentelles Vorgehen	52
4.3.2	Bewertung der Temperaturverteilung	55
5	Herstellung punktschweißbarer FVK/Metall-Bauteile im RTM-Verfahren	58
5.1	Einfluss des Preformings auf den Faserverlauf	58
5.1.1	Experimentelles Vorgehen	59
5.1.2	Bewertung der Einflussgrößen	66
5.2	Modifikation des RTM-Verfahrens	72
5.2.1	Anforderungsprofil	72
5.2.2	Konzepterstellung	73
5.2.3	Technische Umsetzung und experimentelle Erprobung	78
5.2.4	Konzeptbewertung	82
5.3	Praxisnahe Erprobung	86
5.3.1	Anwendungsszenario	87
5.3.2	Bewertung der Bauteilfertigung im RTM-Verfahren	89
5.3.3	Bewertung des Schweißprozesses	96
6	Methodik zur schädigungsfreien Gestaltung der Fügestelle	100
6.1	Analytische Modellierung fasergerecht eingebrachter Löcher	100
6.1.1	Vorgehen zur Bestimmung typisierter Faserverläufe	101
6.1.2	Verlaufsapproximation durch Spline-Verfahren	106
6.1.3	Bewertung des Modells	112
6.2	FE-Modell zur Beschreibung des Temperatureintrags	120
6.2.1	Aufbereitung der Geometriedaten	122
6.2.2	Abbildung und Zuweisung der Materialkennwerte	124
6.2.3	Implementierung der Schweißwärme	134
6.2.4	Modellierung der Temperaturentstreuung	134

6.3	Validierung	135
6.3.1	Quantifizierung der Modellparameter	135
6.3.2	Sensitivitätsanalyse	139
6.3.3	Experimenteller Modellabgleich	145
7	Zusammenfassung und Ausblick	149
7.1	Zusammenfassung	149
7.2	Ausblick	152
	Literaturverzeichnis	153
	Abbildungsverzeichnis	I
	Tabellenverzeichnis	VII
	Anhang	X

Abkürzungen

Formelzeichen	Größe	Einheit
CFK	Kohlenstofffaserverstärkter Kunststoff	
FE	Finite-Elemente	
FVK	Faserverstärkter Kunststoff	
MB	Mischbauweise	
OK	Konzepte des RTM-Oberwerkzeugs	
RT	Raumtemperatur	
RTM	Resin Transfer Moulding	
SÄ	Schweißpunktäquivalent	
UK	Konzepte des RTM-Unterwerkzeugs	
$a(z_M)^i$	Materialabhängige Steigung der Relation zwischen einer Größe X und dem Dorndurchmesser	-
a_0	Splineabstand im ungestörten Bereich	mm
a_x	Splineabstand im gestörten Bereich	mm
A_N	Bereich der Faserneuorientierung	mm ²
A_W	Bereich welliger Faserabschnitte	mm ²
$b(z_M)^i$	Materialabhängiger Ordinatenabschnitt der Relation zwischen einer Größe X und dem Dorndurchmesser	-
c_p	Spezifische Wärmekapazität	J/(kg·K)
c_{pB}	Spezifische Wärmekapazität des Fügeblechs	J/(kg·K)
c_{pe}	Effektive spezifische Wärmekapazität	J/(kg·K)
c_{pE}	Spezifische Wärmekapazität der Schweißelektrode	J/(kg·K)
c_{pf}	Spezifische Wärmekapazität der Fasern	J/(kg·K)

c_{pF}	Spezifische Wärmekapazität des Faserverbunds	J/(kg·K)
c_{pi}	Spezifische Wärmekapazität des Inserts	J/(kg·K)
c_{pm}	Spezifische Wärmekapazität der Matrix	J/(kg·K)
d_B	Blechstärke	mm
d_s	Gemessener Schweißlinsendurchmesser	mm
d_W	Mittlerer Schweißlinsendurchmesser	mm
d_{Wmin}	Mindestschweißlinsendurchmesser	mm
d_{WS}	Widerstandsschichtdicke	mm
d_x	Innendurchmesser schweißbarer Inserts	mm
D_x	Außendurchmesser schweißbarer Inserts	mm
E_S	Energieeintrag einer Punktschweißung	J
F_E	Elektrodenkraft	N
F_K	Klemmkraft des Niederhalters beim Preforming	N
h	Thermische Kontaktleitfähigkeit	W/(m ² ·K)
h_i	Hilfsvariable	-
h_{iF}	Thermische Kontaktleitfähigkeit zwischen Insert und Faserverbund	W/(m ² ·K)
I_S	Schweißstrom	kA
k_n	Koeffizient innerhalb eines Gleichungssystems	-
l_{Spitze}	Länge des Dorns zur Lochformung	mm
L_{max}	Maximale Anzahl an Pfaden ober- bzw. unterhalb der Spitze für die Parameterkombination	-
n	Anzahl der Interpolationspunkte bei der Spline Erstellung	-
p^t	Menge der typisierten Pfade	-

q	Variable zur Charakterisierung der Betrachtungshälfte	-
R_m	Zugfestigkeit	N/mm ²
s_i	Datenpunkt eines Faserpfads ($i = 1, 2, 3, \dots$)	-
$S(x)$	Spline-Funktion	-
$S_i(x_i)$	Stückweise definiertes Polynom auf $[x_i, x_{i+1}]$	-
t	Ordinatenwert des Übergangspunkts vom ungestörten zum deformierten Bereich	mm
T	Temperatur	°K
t_R	Rechenzeit des Simulationsmodells	min
t_S	Schweißdauer	ms
V_f	Faservolumengehalt	-
$V_{f, \max}$	Maximaler Faservolumengehalt	-
V_m	Faservolumengehalt im ungestörten Laminat	-
z_M	Materialvariable	-
α_a^i	Steigung der linearen Funktion zwischen der materialabhängigen Steigung und der Materialvariablen der Interpolationsstelle i	-
α_b^i	Steigung der linearen Funktion zwischen dem materialabhängigen Ordinatenabschnitt und der Materialvariablen der Interpolationsstelle i	-
α_S	Spitzenwinkel	°
β_a^i	Ordinatenabschnitt der linearen Funktion zwischen der materialabhängigen Steigung und der Materialvariablen der Interpolationsstelle i	-
β_b^i	Ordinatenabschnitt der linearen Funktion zwischen dem materialabhängigen Ordinatenabschnitt und der Materialvariablen der Interpolationsstelle i	-
γ	Elektrische Leitfähigkeit	1/($\Omega \cdot m$)

γ_B	Elektrische Leitfähigkeit des Fügeblechs	$1/(\Omega \cdot m)$
γ_E	Elektrische Leitfähigkeit der Schweißelektrode	$1/(\Omega \cdot m)$
γ_i	Elektrische Leitfähigkeit des Inserts	$1/(\Omega \cdot m)$
ε	Emissionsgrad	-
ε_B	Emissionsgrad des Fügeblechs	-
ε_E	Emissionsgrad der Schweißelektrode	-
ε_i	Emissionsgrad des Inserts	-
ε_F	Emissionsgrad des Faserverbunds	-
λ	Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \cdot K)$
λ_B	Wärmeleitfähigkeit des Fügeblechs	$W/(m \cdot K)$
λ_e	Effektive Wärmeleitfähigkeit	$W/(m \cdot K)$
λ_E	Wärmeleitfähigkeit der Schweißelektrode	$W/(m \cdot K)$
λ_{\perp}	Wärmeleitfähigkeit quer zur Faserrichtung	$W/(m \cdot K)$
λ_{\parallel}	Wärmeleitfähigkeit parallel zur Faserrichtung	$W/(m \cdot K)$
λ_i	Wärmeleitfähigkeit des Inserts	$W/(m \cdot K)$
λ_m	Wärmeleitfähigkeit der Matrix	$W/(m \cdot K)$
λ_{WS}	Wärmeleitfähigkeit der äquivalent dünnen Widerstandsschicht	$W/(m \cdot K)$
$v_i(\varnothing_{Dorn}, z_M)$	Abszisse der Interpolationsstelle i in Abhängigkeit der Parameter	mm
ρ	Dichte	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_B	Dichte des Fügeblechs	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_E	Dichte der Schweißelektrode	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_f	Dichte der Fasern	$kg \cdot m^{-3}$
ρ_F	Dichte des Faserverbunds	$kg \cdot m^{-3}$

ρ_i	Dichte des Inserts	$\text{kg}\cdot\text{m}^3$
ρ_m	Dichte der Matrix	$\text{kg}\cdot\text{m}^3$
$\varphi_0, \varphi_1, \dots, \varphi_n$	Funktionssystem aus linear unabhängigen Funktionen	-
\varnothing_{Loch}	Lochdurchmesser	mm
