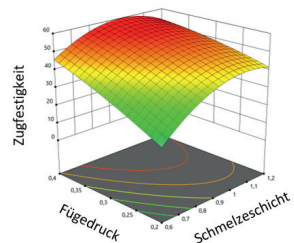
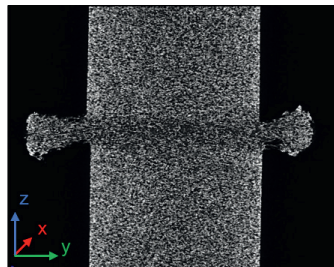
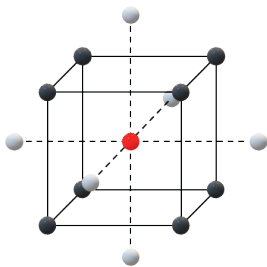


# Ein Beitrag zum Vibrations-schweißen von drei-dimensionalen Fügenahtgeometrien sowie zum Schweißen von hochtemperaturbeständigen Thermoplasten

Sascha Vogtschmidt

Band  
2024/07



*Ein Beitrag zum Vibrationsschweißen von dreidimensionalen Fügenahtgeometrien  
sowie zum Schweißen von hochtemperaturbeständigen Thermoplasten*

zur Erlangung des akademischen Grades  
DOKTOR DER INGENIEURWISSENSCHAFTEN (DR.-ING.)  
der Fakultät für Maschinenbau  
der Universität Paderborn

genehmigte  
DISSERTATION

von  
Sascha Vogtschmidt, M.Sc.  
aus Lübbecke

Tag des Kolloquiums: 17.04.2024  
Referent: Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner  
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. Andreas Seefried



Schriftenreihe Kunststofftechnik Paderborn

Band 7/2024

**Sascha Vogtschmidt**

**Ein Beitrag zum Vibrationsschweißen von dreidimensionalen Fügenahtgeometrien sowie zum Schweißen von hochtemperaturbeständigen Thermoplasten**

D 466 (Diss. Universität Paderborn)

Shaker Verlag  
Düren 2024

**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.: Paderborn, Univ., Diss., 2024

Copyright Shaker Verlag 2024

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

Printed in Germany.

ISBN 978-3-8440-9532-6

ISSN 2941-6205

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

## **Vorwort**

Die vorliegende Arbeit entstand während meiner Tätigkeit als wissenschaftlicher Mitarbeiter in dem Fachgebiet Füge-technik der Kunststofftechnik Paderborn (KTP) an der Universität Paderborn in den Jahren 2018 bis 2022.

Einen besonderen Dank möchte ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Volker Schöppner aussprechen, welcher mir die Promotion ermöglichte und der mich durch zahlreiche Gespräche und Diskussionen kontinuierlich fachlich unterstützte. Für die Übernahme des Korreferats danke ich Herrn Prof. Dr.-Ing. Andreas Seefried sowie Herrn Prof. Dr.-Ing. Gerson Meschut und Herrn Prof. Dr.-Ing. Elmar Moritzer für die Übernahme des Vor- bzw. Beisitzes der Promotionskommission.

Des Weiteren danke ich meinen ehemaligen Arbeitskollegen und Arbeitskolleginnen an der Universität Paderborn für die gute Zusammenarbeit, für die zahlreichen fachlichen Diskussionen und für die in dieser Zeit entstandenen Freundschaften. Einen besonderen Dank möchte ich hiermit auch meinen langjährigen studentischen Hilfskräften sowie den zahlreichen Abschlussarbeitern aussprechen, die mich bei der Erarbeitung der Forschungsergebnisse tatkräftig unterstützt haben. In diesem Zusammenhang möchte ich insbesondere den Herren Pascal Osterloh und Jan-Ole Maras persönlich danken.

Die Inhalte dieser Arbeit sind in Teilen im Rahmen von öffentlich geförderten Forschungsprojekten entstanden. Daher gilt mein Dank dem Bundesministerium für Wirtschaft und Klimaschutz der Bundesrepublik Deutschland für die finanzielle Förderung des Projektes. Den zahlreichen Unterstützern der Forschungsvorhaben aus der Industrie sei an dieser Stelle ebenfalls gedankt.

Abschließend möchte ich mich bei meiner Familie, meinen Freunden und insbesondere bei meiner Frau Jenny aus tiefsten Herzen dafür bedanken, dass sie mich immer unterstützt und motiviert haben.

Herzlichen Dank!

Sascha Vogtschmidt

Bielefeld im Mai 2024



## **Zusammenfassung**

Im Rahmen dieser Arbeit werden zwei Herausforderungen im Bereich des Schweißens von Kunststoffen fokussiert und entsprechende Lösungsalternativen betrachtet. Das Vibrations-schweißen von dreidimensionalen Fügenähten kann eine große Herausforderung darstellen, da durch die Abweichung der Fügeebene von der Vibrationsebene ein verminderter Wärmeeintrag erfolgt. Es konnte in diesem Zusammenhang gezeigt werden, dass die Grenzen des Vibrationsschweißens durch die Kombination aus Infrarotvorwärmung und Vibrati-onsschweißen erweitert werden können. Für dreidimensionale Bauteilgeometrien sind mit Hilfe des Vibrationsschweißens mit Infrarotvorwärmung unter bestimmten Bedingungen hochfeste Schweißnähte realisierbar. Der weitere Fokus dieser Arbeit liegt auf dem mehr-stufigen Schweißen von hochtemperaturbeständigen Thermoplasten. Da die plastifizierten Fügezonen während der verfahrenstypischen Umstellphase stark abkühlen und daraus Schweißnähte mit verminderten Eigenschaften resultieren können, stellt dies eine weitere Herausforderung in der Serienproduktion dar. Im Rahmen der Untersuchungen wurde nach-gewiesen, dass durch den Einsatz des Infrarot-, des Warmgasserien- und des Vibrations-schweißens mit Infrarotvorwärmung bei entsprechender Parameterwahl hochfeste Schweißnähte generiert werden können. Dabei werden die Langzeiteigenschaften der ge-nerierten Verbindungen jedoch stärker von der Art der Wärmeeinbringung beeinflusst als die Kurzzeiteigenschaften. Des Weiteren konnte auf Basis der Kurz- und Langzeitprüfungen ein Lebensdauermodell entwickelt werden, mit dem die Langzeiteigenschaften von geschweißten hochtemperaturbeständigen Thermoplasten prognostiziert werden können.

## **Summary**

This thesis focuses on two challenges in the field of welding plastics and looks at corre-sponding alternative solutions. The vibration welding of three-dimensional joining seams poses a major challenge, as the deviation of the joining plane from the vibration plane results in a reduced heat input. In this context, it has been shown that the limits of vibration welding can be extended by combining infrared preheating and vibration welding. For three-dimen-sional component geometries, high-strength weld seams can be achieved using vibration welding with infrared preheating under certain conditions. The further focus of this work is on the multi-stage welding of high-temperature resistant thermoplastics. As the plasticized joining zones cool down considerably during the process-related changeover phase and this can result in weld seams with reduced properties, this represents a major challenge in series production. As part of the investigations, it was demonstrated that high-strength weld seams can be generated by using infrared, hot gas series and vibration welding with infrared pre-heating if the appropriate parameters are selected. However, the long-term properties of the generated joints are more strongly influenced by the type of heat input than the short-term properties. Furthermore, a lifetime model could be developed on the basis of the short and long-term tests, with which the long-term properties of welded high-temperature resistant thermoplastics can be predicted.





## Liste der Vorveröffentlichungen

### 2019

S. VOGTSCHMIDT, V. SCHÖPPNER: *Vibration Welding of Components with Angled Areas in the Direction of Vibration*. 72<sup>th</sup> Annual Assembly of the International Institute of Welding (IIW), Bratislava, Slowakei, 2019

### 2020

S. VOGTSCHMIDT, V. SCHÖPPNER: *Schweißnahtkennwerte für die lebensdaueroptimierte Bauteilauslegung von hochtemperaturbeständigen Thermoplasten*. *Joining Plastics*, Jahrgang 14, Ausgabe 3 - 4, S. 134 - 135, 2020

S. VOGTSCHMIDT, V. SCHÖPPNER: *Vibration Welding of Components with Angled Areas in the Direction of Vibration*. *Welding in the World*, Vol. 64, S. 1843 - 1853, 2020

S. VOGTSCHMIDT, V. SCHÖPPNER, I. FIEBIG: *Wechseldehnungsschweißen - Entwicklung einer Füge-technologie für 3D-Geometrien*. DVS CONGRESS - Große Schweißtechnische Tagung, Düsseldorf, 2020

S. VOGTSCHMIDT, V. SCHÖPPNER, I. FIEBIG: *Wechseldehnungsschweißen - Entwicklung einer Füge-technologie für 3D-Geometrien*. *Joining Plastics*, Jahrgang 14, Ausgabe 3 - 4, S. 172 - 179, 2020

### 2021

S. VOGTSCHMIDT, V. SCHÖPPNER: *Anwendungsorientiertes Schweißen von hochtemperaturbeständigen Kunststoffen*. *Technomer - 27*. Fachtagung über Verarbeitung und Anwendungen von Polymeren, Tagungsband S. 70, Chemnitz, 2021

S. VOGTSCHMIDT, V. SCHÖPPNER: *Analyse des Erwärm- und Umstellverhaltens beim Schweißen von hochtemperaturbeständigen Kunststoffen*. DVS CONGRESS - Große Schweißtechnische Tagung, Vortragsband S. 500 - 507, Essen, 2021

### 2022

S. VOGTSCHMIDT, V. SCHÖPPNER: *The Short- and Long-Term Properties of Welded High-Temperature Resistant Thermoplastics*. 75<sup>th</sup> Annual Assembly of the International Institute of Welding (IIW), Tokyo, Japan, 2022

S. VOGTSCHMIDT, V. SCHÖPPNER: *Schweißnahtkennwerte für die lebensdaueroptimierte Bauteilauslegung von hochtemperaturbeständigen Thermoplasten*. DVS CONGRESS - Große Schweißtechnische Tagung, Vortragsband S. 534 - 540, Koblenz, 2022

### 2023

S. VOGTSCHMIDT, V. SCHÖPPNER: *Schweißnahtkennwerte für die lebensdaueroptimierte Bauteilauslegung von hochtemperaturbeständigen Thermoplasten*. *Joining Plastics*, Jahrgang 17, Ausgabe 1, S. 36 - 43, 2023

S. VOGTSCHMIDT, V. SCHÖPPNER: *The Short- and Long-Term Properties of Welded High-Temperature Resistant Thermoplastics*. *Welding in the World*, Vol. 67, S. 2811 - 2821, 2023

## Inhaltsverzeichnis

<b>Inhaltsverzeichnis</b> .....	<b>I</b>
<b>Abkürzungs- &amp; Symbolverzeichnis</b> .....	<b>IV</b>
<b>1 Einleitung</b> .....	<b>1</b>
1.1 Problematik .....	1
1.2 Motivation und Zielsetzung .....	2
<b>2 Stand der Forschung und Technik</b> .....	<b>5</b>
2.1 Schweißen von unverstärkten Kunststoffen .....	5
2.2 Schweißen von faserverstärkten Kunststoffen .....	8
2.3 Schweißen von wärmestabilisierten Kunststoffen.....	12
<b>3 Vibrationsschweißen dreidimensionaler Bauteilgeometrien</b> .....	<b>15</b>
3.1 Stand der Forschung und Technik beim Vibrationsschweißen dreidimensionaler Bauteilgeometrien.....	15
3.1.1 Vibrationsschweißen .....	15
3.1.2 Aktuelle Herausforderungen beim Vibrationsschweißen dreidimensionaler Bauteilgeometrien .....	18
3.1.3 Lösungsansatz .....	20
3.2 Methoden der experimentellen Untersuchungen .....	23
3.2.1 Maschinen und Geräte .....	23
3.2.2 Materialien und Prüfkörpergeometrien .....	25
3.2.3 Eingesetzte Prüfverfahren .....	27
3.3 Voruntersuchungen .....	28
3.3.1 Bestimmung der Schmelzeschichtdicke .....	29
3.3.2 Zugfestigkeit nach Schmelzeabriss .....	29
3.3.3 Temperaturentwicklung in der Fügezone .....	31
3.3.4 Zugfestigkeit nach dynamischer Belastung .....	33
3.4 Schweißuntersuchungen .....	35
3.4.1 Schweißuntersuchungen mit minimaler initialer Schmelzeschichtdicke .....	37
3.4.2 Schweißuntersuchungen mit erhöhter initialer Schmelzeschichtdicke .....	48

<b>4</b>	<b>Schweißen hochtemperaturbeständiger Thermoplaste .....</b>	<b>57</b>
4.1	Stand der Forschung und Technik beim Schweißen hochtemperaturbeständiger Thermoplaste.....	58
4.1.1	Vibrationsschweißen mit Infrarotvorwärmung.....	58
4.1.2	Infrarotschweißen.....	60
4.1.3	Warmgasserienschweißen .....	65
4.1.4	Zeitrafende Prüfung von Kunststoffen .....	68
4.1.5	Aktuelle Herausforderungen beim Schweißen hochtemperaturbeständiger Thermoplaste .....	72
4.1.6	Lösungsansatz .....	73
4.2	Methoden der experimentellen Untersuchungen.....	75
4.2.1	Maschinen und Geräte .....	75
4.2.2	Materialien und Prüfkörpergeometrien .....	77
4.2.3	Eingesetzte Prüfverfahren .....	80
4.2.4	Statistische Versuchsplanung und -auswertung.....	87
4.3	Voruntersuchungen .....	89
4.3.1	Materialcharakterisierung .....	89
4.3.2	Prozessgestaltung.....	105
4.3.3	Erwärm- und Umstellverhalten der betrachteten hochtemperaturbeständigen Thermoplaste .....	106
4.4	Schweißuntersuchungen .....	112
4.4.1	Charakterisierung der resultierenden Schweißverbindungen bei Normklima .....	113
4.4.2	Kurzzeit-Zugverhalten bei unterschiedlichen Prüftemperaturen .....	143
4.4.3	Zeitstandzugversuche .....	147
4.5	Lebensdauermodell .....	153
4.5.1	Zeitstandzugversuch .....	154
4.5.2	Laststeigerungsverfahren .....	157
4.5.3	Zeitrafende Prüfungen.....	161
<b>5</b>	<b>Zusammenfassung und Ausblick.....</b>	<b>166</b>
5.1	Zusammenfassung .....	166

---

5.1.1	Zusammenfassung	Vibrationsschweißen	dreidimensionaler Bauteilgeometrien .....	166
5.1.2	Zusammenfassung	Schweißen	hochtemperaturbeständiger Thermoplaste .....	168
5.2	Ausblick .....			170
5.2.1	Ausblick Vibrationsschweißen dreidimensionaler Bauteilgeometrien .....			170
5.2.2	Ausblick Schweißen hochtemperaturbeständiger Thermoplaste .....			170
<b>6</b>	<b>Literaturverzeichnis.....</b>			<b>172</b>
6.1	Zitierte Quellen .....			172
6.2	Verwendete studentische Arbeiten .....			180
6.3	Erklärung zur Zitation von Inhalten aus studentischen Arbeiten .....			181
<b>Anhang</b>	<b>.....</b>			<b>182</b>

## Abkürzungs- & Symbolverzeichnis

### Abkürzungen

2FI	two factor interaction
ABS	Acryl-Nitril-Butadienstyrol-Copolymer
bspw.	beispielsweise
bzw.	beziehungsweise
CCD	Central Composite Design
CT	Computertomographie
d.h.	das heißt
DOE	Design of Experiments
DSC	Differential Scanning Calorimetry
DVS	Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.
engl.	englisch
FTIR	Fourier-Transformations-Infrarot-Spektroskopie
FKV	Faserverbundkunststoffe
i.d.R.	in der Regel
IR	Infrarot
o.ä.	oder ähnliches
PA	Polyamid
PA6	Polyamid 6
PA6 cb	Polyamid 6 carbon black
PA6 GF30	Polyamid 6 mit 30 % Kurzglasfasern
PA66	Polyamid 66
PA66 CF	kohlenstofffaserverstärktes Polyamid 66
PA66 GF	glasfaserverstärktes Polyamid 66
PC	Polycarbonat
PES	Polyethersulfon
PMMA	Polymethylmethacrylat

PP	Polypropylen
PP GF30	Polypropylen mit 30 % Kurzglasfasern
PP LGF30	Polypropylen mit 30 % Langglasfasern
PPA	Polyphthalamid
PPA EF GF	glasfaserverstärktes, organisch stabilisiertes Polyphthalamid
PPA HSL GF	glasfaserverstärktes, anorganisch stabilisiertes Polyphthalamid
PPS GF	glasfaserverstärktes Polyphenylensulfid
PS	Polystyrol
s.	siehe
s.u.	siehe unten
u.a.	unter anderem
v.a.	vor allem
vgl.	vergleiche
VIB	Vibrationsschweißen
WGS	Warmgasserienschweißen
z. B.	zum Beispiel

## Lateinische Symbole

a	Amplitude [mm]
A	Fläche [m <sup>2</sup> ]
A <sub>F</sub>	Fügefläche [mm <sup>2</sup> ]
c <sub>p</sub>	spezifische Wärmekapazität [J/kg*K]
d	Bauteildicke [mm]
d <sub>p</sub>	optische Eindringtiefe der Strahlung
e	Eulersche Zahl
E	Federsteifigkeit [MPa]
E <sub>e</sub>	elastischer Anteil der Federsteifigkeit [MPa]
E <sub>i</sub>	Elastizitätsmodul [MPa]



---

et al.	et alii
f	Frequenz [Hz]
f <sub>S</sub>	Kurzzeit-Schweißfaktor [-]
F <sub>S</sub>	Schweiß- bzw. Fügekraft [N]
F <sub>S,E</sub>	Fügekraft in der Ebene [N]
f <sub>S,E</sub>	Schweißfaktor bezogen auf die ermittelte Festigkeit des faserverstärkten Grundmaterials [-]
f <sub>S,G</sub>	Schweißfaktor bezogen auf die unverstärkte Grundmaterialfestigkeit [-]
F <sub>S,W</sub>	Fügekraft in angewinkeltem Bereich [N]
I(z)	Strahlungsintensität in der Bauteiltiefe z
I <sub>0</sub>	Initiale Strahlungsintensität
k	Anzahl an Einflussfaktoren bei der statistischen Versuchsplanung
L <sub>0</sub>	Schmelzeschichtdicke [mm]
$\bar{M}$	mittlere Molmasse [g/mol]
p <sub>F</sub>	Fügedruck [MPa]
p <sub>S</sub>	Schweißdruck [MPa]
R <sup>2</sup>	Bestimmtheitsmaß
s	Standardabweichung
s <sub>F</sub>	Fügeweg [mm]
T	absolute Temperatur [K]
t	Zeit [s]
t <sub>E</sub>	Erwärmzeit [s]
T <sub>G</sub>	Glasübergangstemperatur [°C]
T <sub>K</sub>	Kristallitschmelztemperatur [°C]
T <sub>m</sub>	Schmelztemperatur [°C]
T <sub>Prüfung</sub>	Prüftemperatur [°C]
T <sub>S</sub>	Schmelztemperatur [°C]
t <sub>S</sub>	Schweißzeit [s]
t <sub>U</sub>	Umstellzeit [s]

$T_U$	Umgebungstemperatur [ $^{\circ}\text{C}$ ]
$v$	Lastanstiegsgeschwindigkeit [ $\text{mm/s}$ ]
$v$	Varianz [%]
$v_S$	mittlere lineare Reibgeschwindigkeit
$\tilde{\nu}$	Wellenzahl [ $\text{cm}^{-1}$ ]
$\bar{x}$	Mittelwert

## Griechische Symbole

$\alpha_W$	Fügewinkel [ $^{\circ}$ ]
$\alpha$	Absorptionsgrad
$\alpha_{DoE}$	Verlängerungsfaktor
$\varepsilon(T)$	Emissionskoeffizient [-]
$\varepsilon_B$	gemittelte Bruchdehnung [%]
$\varepsilon_e$	elastischer Dehnungsanteil [%]
$\varepsilon_M$	gemittelte maximale Dehnung [%]
$\varepsilon_v$	viskoser Dehnungsanteil [%]
$\varepsilon_{ve}$	viskoelastischer Dehnungsanteil [%]
$\eta$	Dämpfungviskosität [ $\text{MPa}\cdot\text{s}$ ]
$\eta_v$	viskose Dämpfungviskosität [ $\text{MPa}\cdot\text{s}$ ]
$\eta_{ve}$	viskoelastische Dämpfungviskosität [ $\text{MPa}\cdot\text{s}$ ]
$\lambda$	Wellenlänge [ $\mu\text{m}$ ]
$\lambda_{\text{max}}$	Wellenlänge, bei Vorliegen der maximalen Strahlungsintensität [ $\mu\text{m}$ ]
$\mu$	Parameter zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit der Dämpfungviskosität [-]
$\nu$	Parameter zur Berücksichtigung der Zeitabhängigkeit der Dämpfungviskosität [-]
$\rho$	Reflexionsgrad
$\sigma$	Stefan-Boltzmann-Konstante [ $\text{W} / \text{m}^2 \cdot \text{K}^4$ ]
$\sigma_B$	gemittelte Bruchspannung [ $\text{MPa}$ ]
$\sigma_{GM}$	Festigkeit des Grundmaterials [ $\text{MPa}$ ]

$\sigma_M$	gemittelte maximale Spannung [MPa]
$\sigma_S$	Festigkeit der geschweißten Probe [MPa]
$\sigma_{S,E}$	Festigkeit in der Ebene [MPa]
$\sigma_{S,W}$	Festigkeit in angewinkeltem Bereich [MPa]
$\dot{\sigma}$	Lastanstiegsgeschwindigkeit [MPa/s]
$\sigma_0$	Spannung [MPa]
$\tau$	Transmissionsgrad