

CeramTec GmbH
CeramTec-Platz 1-9
73207 Plochingen

**CO₂-HyChain – CO₂-Einsparung durch Reifegradsteigerung
der Wertschöpfungskette hybrider Hochleistungsbauteile
für den funktionalen Leichtbau.
Teilvorhaben: Entwicklung keramischer Werkzeuge für das
Rührreißschweißen mit hoher Verschleißbeständigkeit**

Abschlussbericht

Förderkennzeichen: 03LB4003J

Gefördert durch:

Bewilligungszeitraum: 01.03.2021 – 29.02.2024



Bundesministerium
für Wirtschaft
und Klimaschutz

Projektleiter: Dr. Björn Schunck

aufgrund eines Beschlusses
des Deutschen Bundestages

Hauptsächlich beteiligte
wissenschaftliche Bearbeiter:

Dr. Björn Schunck
Dr. Sandra Nemrava
Dr. Volker Dietrich

Datum: 22.07.2024

Unterschrift: _____
Dr. B. Schunck

1 Einführung

1.1 Aufgabenstellung und Zielsetzung

Beim Rührreibschweißen (englisch: **Friction Stir Welding, FSW**) wird ein rotierendes Werkzeug entlang der Berührungsflächen der zu fügenden Materialien geführt. Durch die Reibungswärme plastifiziert das Material und die Fügepartner werden miteinander verschweißt.

Das Verfahren ist insbesondere für das Fügen von Nichteisenmetallen mit niedriger Schmelztemperatur und für Mischverbindungen geeignet. Durch das Rührreibschweißen können selbst schwer schweißbare oder artfremde Werkstoffe wie Aluminium, Magnesium, Kupfer, Titan oder Stahl miteinander verfügt werden.

Ziel dieses Teilvorhabens ist die Entwicklung keramischer Werkzeugwerkstoffe sowie die Herstellung von Musterwerkzeugen aus diesem Material, welche in der Lage sind, diesen Prozess mit langer Standzeit sowie einer gleichbleibenden Schweissnahtqualität abzubilden. Die Bewertung des Einsatzverhaltens der keramischen Schweisswerkzeuge erfolgt bei den Projektpartnern.

1.2 Stand der Technik

Der Prozess des Rührreibschweissens wurde in den 1990er Jahren vom TWI (The Welding Institute) in England entwickelt. Nachfolgende Untersuchungen beschäftigten sich intensiv mit werkstofflichen Fragen der zu fügenden Materialien, mit der Auslegung der Fügezonen, dem Werkzeugdesign sowie der Prozessparameter. Anwendung findet das Verfahren im Schiff- und Schienenfahrzeugbau, in der Luft- und Raumfahrt sowie auch verstärkt in der Automobilindustrie. Als Werkzeugwerkstoffe werden oftmals Warmarbeitsstähle, Wolframlegierungen oder Hartmetalle eingesetzt. Hohe Prozesstemperaturen in Verbindung mit hohen tribologischen Beanspruchungen führen jedoch auf Grund tribologisch-chemischer Korrosionsvorgänge zu einem erhöhten Werkzeugverschleiß und somit zu verkürzten Standzeiten.

Erste positive Ergebnisse bei dem Einsatz von keramischen Rührreibwerkzeugen zeigten im Rahmen des Projekts „Ressourcenschonende Mischschweißverbindungen für Hochleistungs-Leichtbauverbunde“ das Potenzial dieses Werkzeugwerkstoffs auf. [Werz18]

1.3 Vorgehensweise

Der Lösungsansatz bei CeramTec wird zunächst darin gesehen, zusammen mit den Projektpartnern über die prozessspezifischen Randbedingungen in Verbindung mit FE-Simulationsberechnungen ein Anforderungsprofil an die geplanten keramischen Werkzeugwerkstoffe zu erarbeiten.

Werkstoffentwicklung und -charakterisierung erfolgen im nächsten Arbeitspaket.

Basierend auf diesen Informationen findet die Ableitung möglicher Werkzeuggeometrien sowie die Herstellung von Musterwerkzeugen statt, welche dann bei den Projektpartnern bezüglich ihres Einsatzpotenzials bewertet werden.

2 Ergebnisse und Diskussion

2.1 Anforderungsprofil

Mit Hilfe der Arbeit von [KOH15] war es möglich, die relevanten thermischen und mechanischen Belastungen, welche auf das Schweißwerkzeug im Einsatz wirken, abzuschätzen, Abbildung 1. Nach Erstellung eines einfachen Simulationsmodells konnten nun die zu erwartenden Belastungen auf das Werkzeug für zwei mögliche Geometrien berechnet werden, Abbildung 2 und 3.

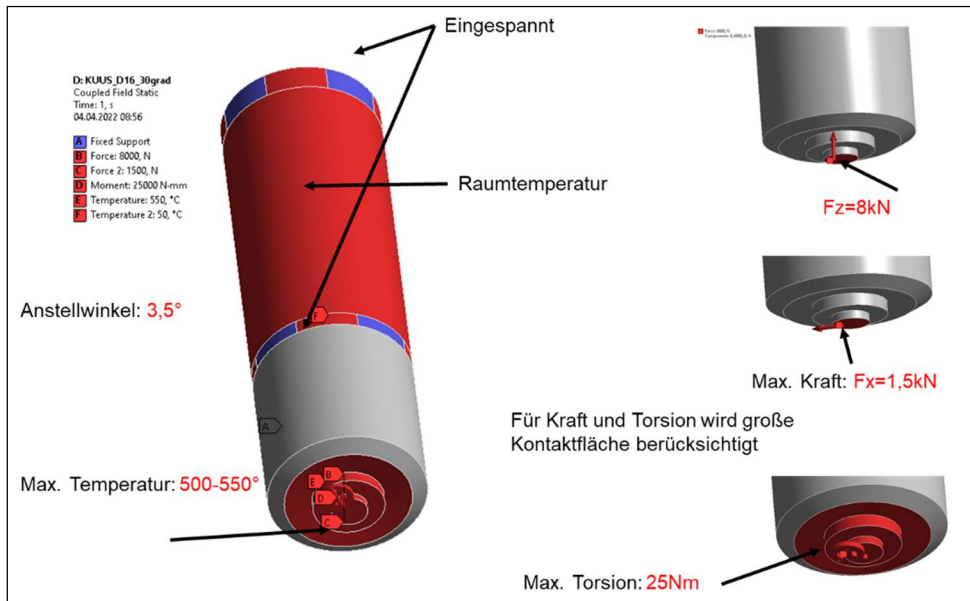


Abb. 1: thermische und mechanische Anforderungen an ein Schweißwerkzeug unter Einsatzbedingungen

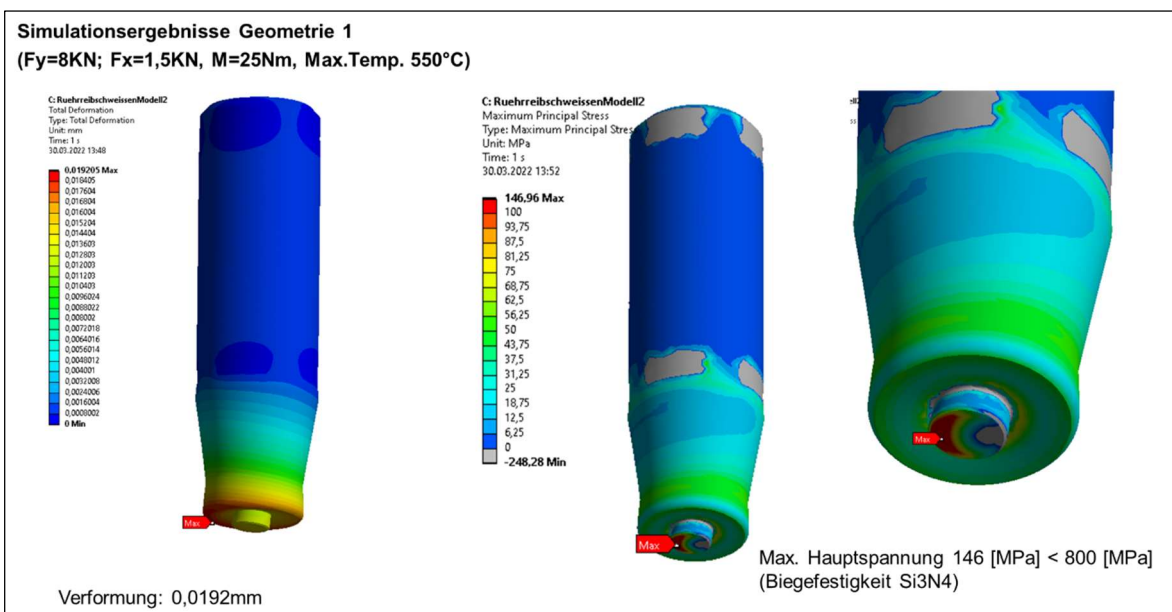


Abb. 2: zu erwartende Verformungen und mechanische Spannungen im Werkzeug unter Belastung (Geometrie 1)

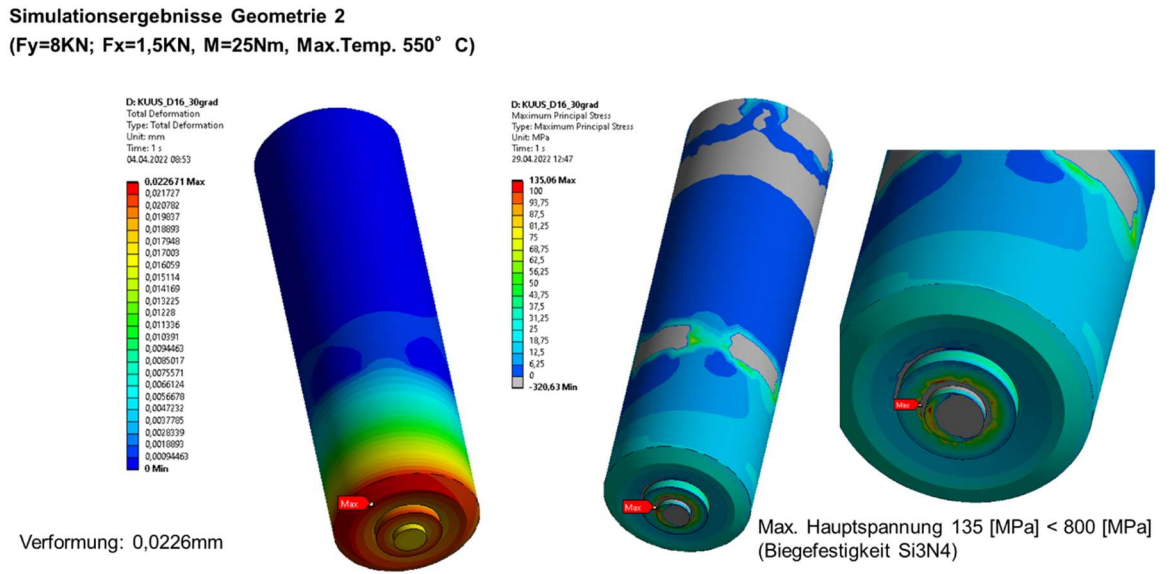


Abb. 3: zu erwartende Verformungen und mechanische Spannungen im Werkzeug unter Belastung (Geometrie 2)

Basierend auf diesen Simulationsrechnungen sowie Erfahrungen der Projektpartner aus vorherigen Untersuchungen erfolgte die Festlegung eines Anforderungsprofils für den zu entwickelnden Werkzeugwerkstoff, Tabelle 1. Ebenso dienten die Simulationsergebnisse bei der Auslegung der geplanten Werkzeuggeometrien.

	Festigkeit [MPa]	Risszähigkeit [MPa m ^{1/2}]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [g/cm ³]	thermische Dehnung [1E-06/K]	E-Modul [GPa]	Härte HV05 [GPa]	spez. Wärmekapazität [J/gK]
Anforderung	hoch (>800)	hoch (>5)	gering (<40)	gering (<4)	gering (<4,0)	eher hoch (>300)	hoch >14	gering 0,7 - 0,9

Tab. 1 Anforderungsprofil an den Werkzeugwerkstoff

2.2 Werkstoffentwicklung und Materialeigenschaften

In Verbindung mit den erarbeiteten Randbedingungen sowie der Ergebnisse der Simulationsberechnungen wurden eine α/β -SiAlON-Keramik sowie eine Si₃N₄-Keramik entwickelt, welche das Potenzial besitzen, die zu erwartenden Eigenschaftsansprüche zu erreichen und somit den Prozess des Rührreißschweißens mit keramischen Werkzeugen zu ermöglichen.

Nach Aufbereitung der entsprechenden Keramikmassen sowie Herstellung der erforderlichen Laborproben und der festgelegten Probengeometrien erfolgte die Materialcharakterisierung der relevanten Eigenschaften, Tabelle 2.

	Festigkeit [MPa]	Risszähigkeit [MPa m ^{1/2}]	Wärmeleitfähigkeit [W/mK]	Dichte [g/cm ³]	thermische Dehnung [1E-06/K]	E-Modul [GPa]	Härte HV05 [GPa]	spez. Wärmekapazität [J/gK]
Anforderung	>800	>5	<40	<4	<4,0	>300	>14	0,7 - 0,9
Keramik A	800	5,5	21	3,21	3	320	15	0,7
Keramik B	830	6,5	30	3,24	3	310	16	0,7

Tab. 2 Materialeigenschaften der ausgewählten Keramiken

2.3 Werkzeuggeometrien

Zusammen mit den Projektpartnern wurden zwei unterschiedliche Werkzeuggeometrien mit einem einheitlichen Spanndurchmesser von 20mm festgelegt. Geometrie 1 (Abbildung 4) für den Al - Al Stumpfstoß und Geometrie 2 (Abbildung 5) für den kombinierten Überlapp-Stumpfstoß. Ebenso wurde ein einheitliche Spansystem für die zum Einsatz kommenden Spindelsysteme abgestimmt, welches die Nutzung beider Werkzeugvarianten auf den verwendeten Spindelsystemen gewährleistet.

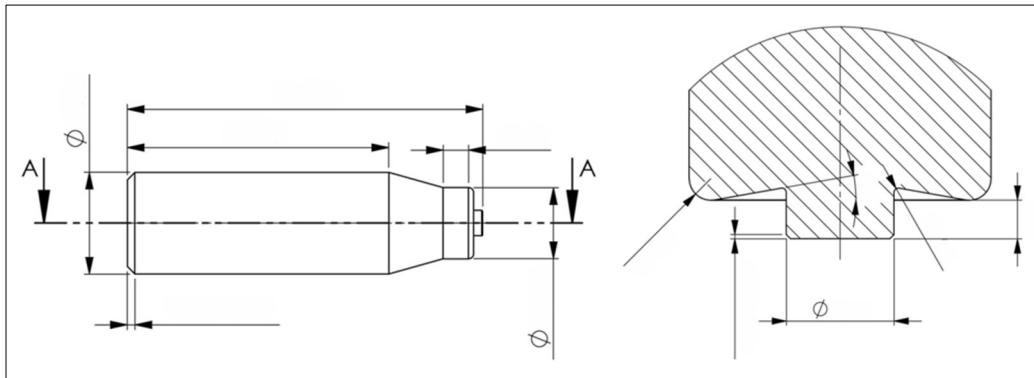


Abb. 4 Werkzeug Geometrie 1

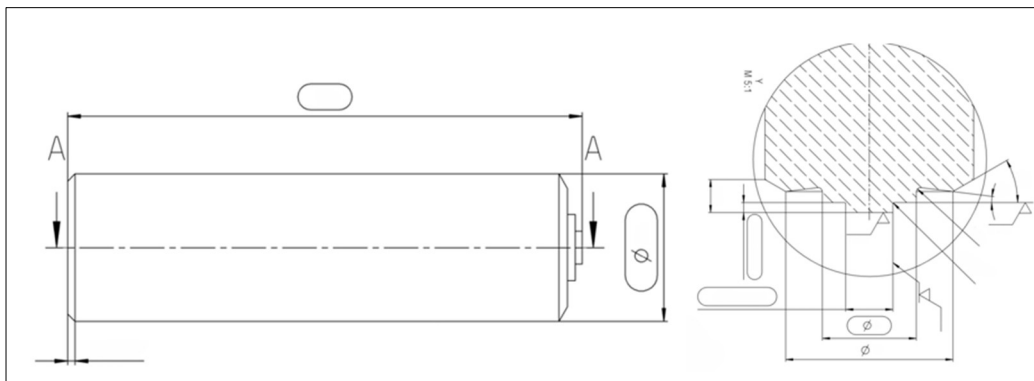


Abb. 5 Werkzeug Geometrie 2

2.4 Musterwerkzeuge

Um neben der technologischen Machbarkeit auch den wirtschaftlichen Aspekt der Werkzeugherstellung beurteilen zu können, wurden bei der Fertigung der Rührreibschweisswerkzeuge zwei unterschiedliche Prozessrouten verfolgt. Die Standard-Route umfasste die klassische Aufbereitung der keramischen Pressmasse mit einem anschließenden isostatischen Verpressen des Pulvers zu zylindrischen Körpern. Im weiteren Verlauf erfolgte die Grünbearbeitung der Presskörper unter Berücksichtigung des erforderlichen Schleifaufmaßes. Nach Entbinderung, Sinterung und heißisostischem Nachverdichten (HIP), wurde die erforderliche Endkontur durch Schleifen erzeugt.

Im Rahmen einer alternativen Fertigungsroute wurde auf den kostenintensiven Schleifprozess verzichtet, so dass die Werkzeuge bereits nach dem HIP-Prozess die endgültige Form aufwiesen. Dieser Zustand wird im Folgenden als „as fired“ beschrieben. Hierbei wurden bewusst Form- und Maßabweichungen außerhalb der Toleranzen aufgrund der Sinterschwindung in Kauf genommen. Die Bewertung dieser Abweichungen

auf das spätere Einsatzverhalten der Werkzeuge erfolgte im Rahmen der Versuche bei dem Projektpartner.

Die solchermaßen hergestellten Werkzeuge aus den beiden Keramikvarianten 1 und 2 sowie den Geometrien 1 und 2 wurden an den Projektpartner zur Bewertung des Einsatzverhaltens übergeben, Tabelle 3.

Material	Alternativ-Route: as fired		Standard-Route: hartbearbeitet	
	Geometrie 1	Geometrie 2	Geometrie 1	Geometrie 2
Keramik 2	6 Gut / 5 Ausschuss	1 Gut / 10 Ausschuss	11 Gut	2 Gut / 9 Ausschuss
Keramik 1	11 Gut	11 Gut	11 Gut	4 Gut / 7 Ausschuss

Tab. 3 Übersicht der gefertigten und an den Projektpartner übergebenen Werkzeuge

Bei der Werkzeugfertigung zeigten sich speziell bei der Sorte Keramik 2 noch Defizite bei der isostatischen Verpressbarkeit sowie der Grünbearbeitbarkeit, wodurch nach der Sinterung vereinzelt Rissbildungen im zylindrischen Schaftbereich beobachtet wurden, Abb. 6. Diese Risse befanden sich zum Teil jedoch nur innerhalb des Schleifaufmaß und konnten somit im Rahmen der Hartbearbeitung der Standard-Route entfernt werden.



Abb. 6: Rissbildung nach Sinterung, Keramik 2

Die folgenden Abbildungen zeigen beispielhaft die gefertigten Werkzeuge in unterschiedlichen Zuständen der Fertigung, Abbildungen 7-11.



Abb. 7: Geometrie 2, nach Grünbearbeitung mit Schleifaufmaß, Standard-Route



Abb. 8: Geometrie 1, nach Grünbearbeitung mit Schleifaufmaß, Standard-Route



Abb. 9: Geometrie 1 as fired, Keramik 2, Alternativ-Route



Abb. 10: Geometrie 2 as fired, Keramik 2, Alternativ-Route



Abb. 11: Variante 1 geschliffen, Keramik 2, Standard-Route

Rührreißschweisswerkzeuge, welche nur as fired (Verzicht auf Hartbearbeitung aufgrund wirtschaftlicher Aspekte) gefertigt wurden, erwiesen sich bei Bearbeitungsversuchen beim Projektpartner aufgrund eines unzureichenden Rundlaufs als ungeeignet für diesen Prozess. Formverzug auf Grund der Schwindungsvorgänge während der Sinterung verhindern den Weg dieser alternativen Fertigungsroute.

Jedoch als positiv zu bewerten beim Einsatz des keramischen Werkstoffs ist die Beobachtung einer deutlich reduzierten Klebeneigung zwischen Metall und Keramik im Vergleich zu metallischen Werkzeugen. Daher wurden weitere Werkzeuge aus dem Material Keramik 1 (Siliziumnitrid) gefertigt, welche nur an Pin und Schaft geschliffen wurden, um den Rundlauf sicherzustellen, Abbildung 12. Weniger kritische Bereiche blieben as fired. Diese Fertigungsroute stellt somit eine Hybridlösung dar, und ermöglicht eine Verbesserung der wirtschaftlichen Werkzeugfertigung. Weitere 15 solchermaßen gefertigte Werkzeuge wurden ebenfalls an den Projektpartner MPA Uni

Stuttgart übergeben. Versuchsergebnisse und Bewertungen zum Einsatzverhalten der keramischen Werkzeuge werden im Abschlussbericht des Projektpartners dokumentiert.

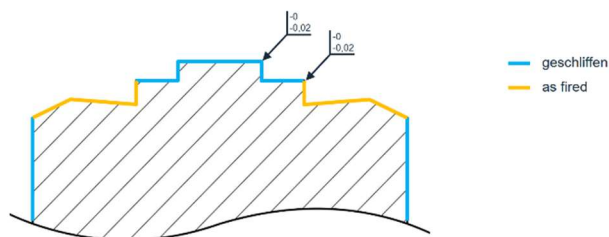


Abb. 12 angepasste Fertigungsstrategie zur Herstellung keramischer Rührreischweisswerkzeuge



Abb. 13 einsatzfertige Werkzeuge

3 Zusammenfassung

Der Fügeprozess des Rührreischweissens besitzt ein hohes Potenzial bei der Realisierung von Leichtbaustrukturen. Um die Leistungsfähigkeit und die Qualität des Verfahrens bei der Verwendung von keramischen Werkzeugen weiter zu steigern, wurden in diesem Teilprojekt in einem ersten Schritt das Anwendungsprofil an einen Werkzeugwerkstoff ermittelt und unterstützend durch Simulationsrechnungen mögliche Werkzeuggeometrien festgelegt. Nach der Entwicklung und Aufbereitung ausgewählter Keramiksorten wurden erste Werkzeuge gefertigt. Dies erfolgte unter dem besonderen Augenmerk einer wirtschaftlichen Fertigung für einen möglichen Serienprozesses. Erste Ergebnisse zum Einsatzverhalten der Werkzeuge, welche bei dem Projektpartner durchgeführt wurden, zeigen jedoch, dass ein vollständiger Verzicht der kostenintensiven Hartbearbeitung die Funktionsweise der Werkzeuge stark beeinträchtigt. Zur Herstellung weiterer Werkzeuge wurde die Bearbeitungsstrategie überarbeitet. Die Hartbearbeitung erfolgte hierbei nur an ausgewählten Bereichen der Werkzeuggeometrie. Die Rührreischweissversuche sowie die Bewertungen zum Einsatzverhalten der Werkzeuge erfolgten beim Projektpartner.

Literatur

- [Werz18] WERZ, Martin; PANZER, Florian; NGUYEN, Phuc Lanh; SCHNEIDER, Matthias. Ressourcenschonende Mischschweißverbindungen für Hochleistungs-Leichtbauverbunde. Ministerium für Finanzen und Wirtschaft des Landes Baden-Württemberg, Februar 2016 – April 2018.
- [KOH15] KOH, Isabell; Influence of welding parameters on strength, fatigue properties and microstructure of friction stir welded aluminum and aluminum-steel joints“; Bachelorarbeit Nr. 758 042; IMWF Universität Stuttgart, 2015