

Geplantes Vorhaben im Rahmen der industriellen Gemeinschaftsforschung der AiF:

## Modellbasiertes reaktives Fügen zur Erhöhung der Prozesssicherheit und -zuverlässigkeit

### Problemstellung:

Seit einigen Jahren werden reaktive Multischichtsysteme (RMS) intensiv untersucht, damit sie in der Aufbau- und Verbindungstechnik (AVT) für unterschiedliche Komponenten eingesetzt werden können [1, 2]. RMS werden durch wechselnde Abscheidung zweier Materialien hergestellt, welche innerhalb des Schichtsystems in einem thermodynamischen Ungleichgewicht stehen und durch Einbringen einer Aktivierungsenergie eine exotherme Reaktion erzeugen können. Nach erfolgter

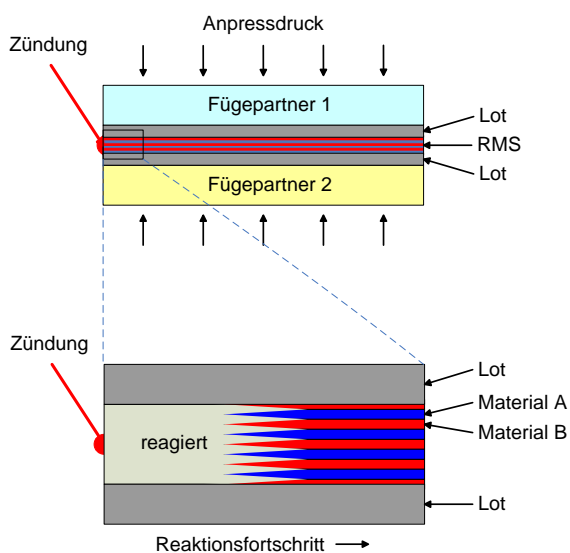


Abbildung 1: Prinzip des reaktiven Fügens

Aktivierung startet eine selbsterhaltende Reaktion, infolge derer die gesamte RMS durchreagiert und einen Teil der Bindungsenthalpie in Form von Wärme freisetzt (Siehe Abbildung 1 und 2). Diese Wärmefreisetzung erfolgt innerhalb weniger Millisekunden direkt innerhalb der Fügezone, so dass eine signifikante Erwärmung der Bauteile nicht stattfindet. Durch die ultrakurzen Prozesszeiten und dem Wegfall von externen Wärmequellen können neuartige Materialkombinationen schonend und hochproduktiv miteinander verbunden werden.

Zwar ist das grundlegende Prinzip schon länger bekannt, aber für spezifische Anwendungen in der AVT sind noch viele offene Fragen zu klären.

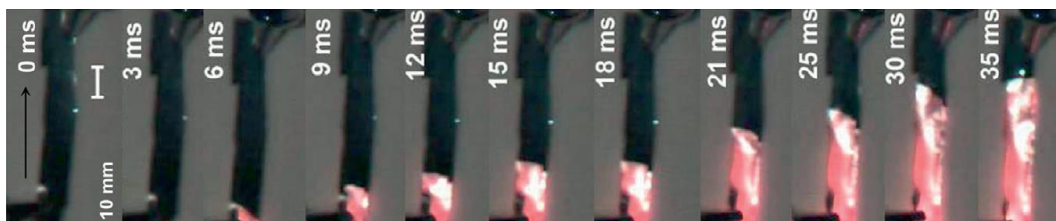


Abbildung 2: Hochgeschwindigkeitsbilder der Reaktion in einer 1Ti/3Al-Reaktivfolie bei elektrischer Zündung [3]

Neben den etablierten Ni/Al-Schichten, die zum mittleren Energiebereich zählen, werden in jüngster Zeit vermehrt alternative Schichtsysteme, entweder höher-energetische, basierend auf Pd/Al bzw. Zr/Si, oder niedrigerenergetische Zr/Al-

Systeme entwickelt und auf ihre Eignung für Anwendungen in der Mikrosystemtechnik hin untersucht.

Die Anbindung an die zu fügenden Oberflächen geschieht meistens durch Lötsschichten, bei niedrig- und mittlereenergetischen Systemen mit zinnbasierten Weichloten, bei den hochenergetischen Systemen auch mit Hartloten (z.B. InCuSil oder AlSi). Der Auswahl und der Dimensionierung der RMS und der Lötsschichten kommt eine besondere Bedeutung zu, da eine räumlich und zeitlich falsch dosierte Energieverteilung entweder zu Schäden im Bauteil oder im Verbindungsgefüge oder zu einer mangelhaften Benetzung und Festigkeit der Fügeverbindung führen kann. In der Regel erfolgt die Dimensionierung jedoch nur auf der Basis von Erfahrungswerten, auf einer begrenzten Anzahl von Vorversuchen oder letztlich auf verfügbaren Folien in Standarddicken und Standardbelastungen. Ein sicherer und zuverlässiger Fügeprozess ist somit nicht immer gewährleistet, und die Potentiale der RMS Technologie bleiben somit möglicherweise ungenutzt. Die Zündung der RMS geschieht beispielsweise durch eine lokale Aktivierung mit einem elektrisch initiierten Funken am Rand des Bauteils, von wo aus sich die Reaktion selbstständig ausbreitet. Der Einfluss alternativer Zündungsarten, wie beispielsweise Mehrpunktzündung oder Laserzündung auf den Reaktionsverlauf und auf das Fügeergebnis sind bisher nicht ausreichend erforscht. Ebenso ist noch ungeklärt, inwieweit das Fügeergebnis durch geeignete Strukturierung der Fügegeschichte optimiert werden kann.

### **Projektziel:**

Ziel des geplanten Projekts ist die Erlangung eines tieferen Prozessverständnisses des reaktiven Fügens, insbesondere hinsichtlich der dynamischen Aspekte. Durch eine möglichst exakte Modellierung unter Einsatz moderner numerischer Simulationstools für CFD, multi-physics FEM und Optimierung sollen die räumliche und zeitliche Wärme- und Spannungsverteilung sowohl innerhalb der Fügezone als auch im angrenzenden Bauteil ermittelt werden, um die optimalen Material- und Prozessparameter beim reaktiven Fügen ohne vorherige, aufwändige Versuchsreihen zu finden. Zusätzlich sollen der Zündvorgang und der Reaktionsverlauf genauer untersucht werden.

### **Projekthalt:**

1. Gemeinsame Spezifikation und Festlegung der zu fügenden Bauteile und anwendungsrelevanter Schichtsysteme. Akquisition der relevanten Werkstoffkennwerte: Die temperaturabhängigen Materialdaten der Komponenten und der Fügegeschichte werden, sofern verfügbar, aus einer detaillierten Recherche zusammengestellt. Fehlende Daten werden durch zusätzliche eigene Messungen im Konsortium erarbeitet. Geometrie- und Materialdaten dienen als Grundlage für die Modellierung und Simulation der Reaktion und der daraus resultierenden Wärme- und Spannungsverteilung.

2. Modellierung des transienten thermodynamischen Prozesses zur Ermittlung von lokalen Temperaturen unter Nutzung eines numerischen 3D Strömungssimulationsprogramms (CFD). Modellierung der lokalen und zeitlichen mechanischen Spannungsverteilung im Prozessverlauf, wie auch der verbleibenden Vorspannung in Schichtsystem und Fügepartnern durch Kopplung der CFD Simulation mit einem FEM Programm.
3. Geeignete RMS auf der Basis von Ni/Al, Zr/Al und Zr/Si werden entwickelt und für Versuche bereitgestellt. Parallel werden geeignete Testsubstrate hergestellt. Nach dem Fügeprozess werden die Fügeverbindungen und die Fügepartner analysiert. Ein Vergleich der Ergebnisse mit der Simulation dient der Rückkopplung auf die Eingangsdaten der Modellierung. Falls erforderlich, werden auch mehrfache Iterationen von Modellierung, experimenteller Durchführung und Charakterisierung und anschließender Korrektur der Materialdaten oder Modellparameter durchgeführt.
4. Bei erfolgreicher Verifizierung der Simulationsergebnisse werden ausgewählte Demonstratoren erstellt. Abschließend werden die gesammelten Erkenntnisse in einem Prozesshandbuch zusammengefasst.

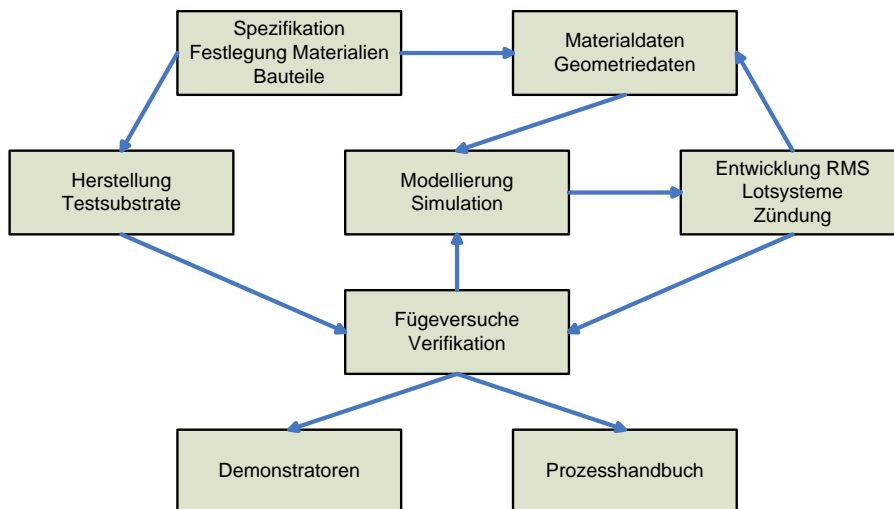


Abbildung 3: Projektstruktur

Abbildung 3 zeigt wie die verschiedenen Arbeitspakete ineinandergreifen. Besonders hervorzuheben ist hier, dass die Ergebnisse aus den Fügeversuchen wieder in die Modellierung und Simulation einfließen sollen, um so eine kontinuierliche Verbesserung zu erreichen.

Abbildung 4 gibt die Ergebnisse von numerischen Strömungssimulationen aus einem Vorgängerprojekt wieder. Eine Beobachtung ist, dass die Wärmeleitung der inneren Energie sehr viel schneller voranschreitet als die Diffusion von Ti und Al ineinander.

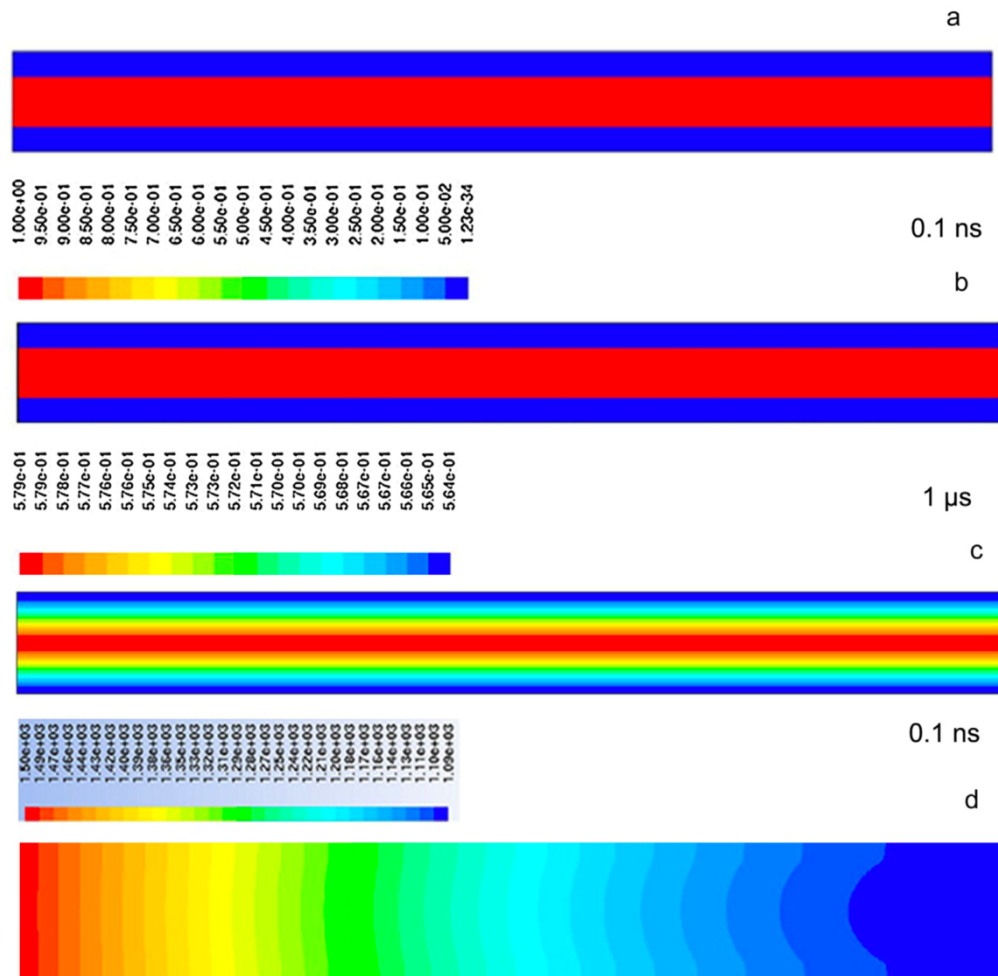


Abbildung 4: Simulation der Element- und Temperaturverteilung in 1Ti/1Al Folien nach Zündung am linken Rand. Abbildung a zeigt den Massenanteil von Ti bei  $t = 0$  s (rot: Massenanteil von Ti 100 % und blau: Massenanteil von Ti 0 %). In Abbildung b wird der Massenanteil von Ti nach 1 ns wiedergegeben. Die Diffusion hat gerade begonnen. Abbildung c beschreibt das Profil des Massenanteils von Ti nach 1 Mikrosekunde. Die Diffusion ist fortgeschritten. Abbildung d zeigt die Temperaturverteilung nach 0,1 ns (rot: 1.500 K und blau: 1.090 K) [3]. Die horizontale Skala beträgt hier 100nm.

Das Projekt ist für eine Laufzeit von 2,5 Jahren ausgelegt.

### Literatur:

- [1] G. Dietrich, S. Braun, A. Leson, Reaktive Nanometer-Multischichten als maßgeschneiderte Wärmequellen beim Fügen, Vakuum in Forschung und Praxis 2009/01, Wiley Verlag 2009
- [2] G. Dietrich, A. Schumacher, J. Freitag, Reaktive Nanoschichten – ein innovatives Fügekonzept für die AVT auf Bauteil- und Waferlevel, Mikrosystemtechnik-Kongress 2017, 23.-25. Oktober 2017, München
- [3] S. Sen, M. Lake, N. Kroppen, P. Farber, J. Wilden, P. Schaaf, Self-propagating exothermic reaction analysis in Ti/Al reactive films using experiments and computational fluid dynamics simulation, Applied Surface Science 396 (2017) 1490-1498

**Forschungseinrichtungen und Ansprechpersonen:**

<p>Hahn-Schickard Wilhelm - Schickard - Str. 10 78052 Villingen-Schwenningen</p>	<p>Dr. Axel Schumacher Tel. +49 7721 943-237 Axel.Schumacher@Hahn-Schickard.de</p>
<p>IMH - Institut für Modellbildung und Hochleistungsrechnen, STAR - Kompetenzzentrum Surface Technology Applied Research, Hochschule Niederrhein Reinarzstr. 49 47805 Krefeld</p>	<p>Prof. Dr. Peter Farber Tel.: +49 2151 822-5038 Peter.farber@hs-niederrhein.de</p>
<p>Fraunhofer-Institut für Werkstoff- und Strahltechnik (IWS) Winterbergstr. 28 01277 Dresden</p>	<p>Dipl.-Ing. Erik Pflug Tel. +49 351 83391 3524 Erik.pflug@iws.fraunhofer.de</p>