

Zur simulationsbasierten Beurteilung der quasi-statischen Festigkeit von laserstrahlgeschweißten Hybridverbindungen

Babaei, M., Sakkiettibutra, J.

BIAS – Bremer Institut für angewandte Strahltechnik

Barr, A., Karsten, O., von Barga, R., von Hehl, A.

IWT – Stiftung Institut für Werkstofftechnik, Bremen

Luttmann, A., Schmidt, A.

ZeTeM – Zentrum für Technomathematik/Universität Bremen

Korrespondenzadresse: andreasl@math.uni-bremen.de

Abstract

Der moderne Leichtbau bietet weiterhin großes Potenzial zur Erhöhung der Material- und Kosteneffizienz. Durch die Kombination unterschiedlicher metallischer Werkstoffe lassen sich maßgeschneiderte Konstruktionen mit optimierten Eigenschaften herstellen. Die Erweiterung der Einsatzmöglichkeiten von stoffschlüssig mittels Laserstrahlgeschweißten hergestellten Werkstoffverbunde aus Stahl und Aluminium bzw. Titan und Aluminium ist mit hohen Anforderungen an die Fertigungstechnik verbunden. Sowohl die Nahtgeometrie als auch das lokale Werkstoffverhalten werden durch Prozessparameter beim Schweißen beeinflusst. Bemessungsansätze, die den Werkstoffzustand infolge eines Spannungsausgleichs unter Last berücksichtigen, sind zurzeit nicht vorhanden, aber zwingend erforderlich, um eine zuverlässige Bewertung von Hybridstrukturen ohne kostenintensive Versuchsreihen zu ermöglichen.

Hierzu sollen im ZUTECH-Projekt HyProMiS Prozess-, Gefüge- und Struktursimulation unter Berücksichtigung der lokalen Werkstoffzustände und der sich ausbildenden Nahtgeometrie zur Beurteilung der quasi-statischen Festigkeit laserstrahlgeschweißter Hybridverbindungen in ein Gesamtmodell integriert werden. Als Voraussetzung dafür müssen Nahtgeometrie und Werkstoffverhalten während des Schweißens sowie Werkstoffzustände nach dem Schweißen simuliert und gekoppelt werden, um eine Versagensvorhersage basierend auf werkstoffzustandsabhängigen Kriterien treffen zu können.

Im Rahmen des Posterbeitrages werden Ergebnisse von Schweißversuchen gezeigt und den Ergebnissen von Simulationsrechnungen gegenübergestellt. Korrelationen zwischen Schweißprozessparametern und berechneter Nahtgeometrie sollen aufgezeigt und diskutiert werden.

1 Einleitung

Bei der Entwicklung von laserstrahlgeschweißten Hybridstrukturen bieten Simulationen große Einsparpotenziale hinsichtlich Entwicklungszeit und -kosten. Die Realisierung dieser Potenziale setzt jedoch eine durchgängige Modellierung in einer Schweiß-

prozesssimulation voraus, die sowohl die Berechnung der Nahtgeometrie als auch die Strukturmechanik und das Gefüge in einer thermo-physikalischen Schweißstruktursimulation beinhalten muss, welche nach derzeitigem Kenntnisstand nicht verfügbar ist. Darüber hinaus sind allgemeine Bemessungsansätze insbesondere für tragende hybride Bauteile noch nicht verfügbar. Zusätzlich zu den üblichen Festigkeitsbeeinflussungen beim Schweißen findet bei hybriden Bauteilen in und um die Fügezone infolge der im Vergleich zu den lokalen Fließgrenzen vorherrschenden hohen Eigenspannungen [1] und der lokal variierenden Festigkeiten ein nur schwer vorhersagbarer Spannungsausgleich statt. Im Belastungsfall kann dies zum Überschreiten der lokalen Fließgrenzen führen. Bemessungsansätze, die den Werkstoffzustand infolge eines Spannungsausgleichs unter Last berücksichtigen, sind zurzeit nicht vorhanden, aber zwingend erforderlich.

Auch wenn die lokal hohen Eigenspannungen und -dehnungen sowie die Verfestigungen und die erhöhten bzw. gesenkten Fließgrenzen in dem Nahtquerschnitt gemessen und simuliert werden können (vgl. [2-5]), ist eine rechnerische Bemessung der Bauteile einschließlich der Schweißnähte bis jetzt noch nicht möglich, da eine Methode zur Beurteilung der Tragfähigkeit derzeit nicht existiert.

An diesem Punkt setzt das Projekt HyProMiS an. Es sollen Prozess-, Gefüge- und Struktursimulation unter Berücksichtigung der lokalen Werkstoffzustände und der sich ausbildenden Nahtgeometrie zur Beurteilung der quasi-statischen Festigkeit laserstrahlgeschweißter Hybridverbindungen miteinander gekoppelt. Zur Erreichung dieses Kernziels sind folgende Bausteine bereitzustellen und miteinander zu koppeln:

- Methodik zur effizienten Berechnung der lokal aufgelösten Nahtgeometrie (Benetzung, Form) unter Berücksichtigung der Energie- und Massebilanzen in einer Prozesssimulation,
- Modelle und Werkstoffdaten zur Beschreibung des Werkstoffverhaltens von Stahl-, Aluminium- und Titanbasiswerkstoffen, insbesondere der werkstoffzustandsabhängigen Fließkurvenbeschreibung (einschließlich Ent- und Verfestigung),
- Schweißstrukturmodell zur Ermittlung der lokalen Werkstoffzustände nach dem Schweißen,
- Versagensvorhersage durch Anwendung eines werkstoffzustandsabhängigen Kriteriums auf die lokalen Belastungszustände des Bauteils unter Beanspruchung (z. B. simulierter Zugversuch).

Die Modellierungsmethodik ermöglicht die Bewertung von Schweißverbindungen unter Ausnutzung einer entsprechenden ganzheitlichen Prozessmodellierung. Hierbei wird jedoch nicht nur der Spannungs- und Dehnungszustand nach dem Schweißen berechnet, sondern auch dessen weiteres Verhalten in modellierten Zug- und Schubversuchen untersucht, um so Rückschlüsse auf die reale Bauteilfestigkeit ziehen zu können.

Die Erreichung des Kernziels soll abschließend an realen komplexen Bauteilen wie einem Segment aus der Verbindung einer PKW-Rückwand aus Aluminium an die Fahrzeugstruktur aus Stahl und einer Ti-Al Sitzschiene aus dem Flugzeugbau gezeigt werden.

Dieser Beitrag beschränkt sich auf die Simulation der Nahtgeometrieausbildung, also den ersten Baustein des vorgestellten Projekts. Zur Bewertung der Simulationen wird die simulierte Nahtgeometrie dem Ergebnis eines realen Schweißversuches von Aluminium- und Stahlblechen im Überlappstoß gegenübergestellt.

2 Modell und numerische Lösung

Zur Simulation der Ausbildung der Nahtgeometrie durch den Schweißprozess werden das Schmelz- und Erstarrungsverhalten des Aluminiums, die Dynamik in der Schmelze und die Benetzung des Hybridträgerwerkstoffs durch ein System partieller Differentialgleichungen modelliert. Als Modell wird hierfür die Kopplung des Stefan-Problems (Energiebilanz und Phasenübergang) mit den Navier-Stokes-Gleichungen für inkompressible Fluide mit freier Oberfläche gewählt. Dabei handelt es sich um eine Erweiterung des in [6] vorgestellten Modells zum Anschmelzen eines Drahtendes um den Hybridträgerwerkstoff. Die Lösung des Systems liefert den zeitlichen Verlauf der Temperatur, des Drucks, der Strömung und der Geometrie.

Im Modell werden in den Navier-Stokes-Gleichungen die Oberflächenspannung, der Kontaktwinkel für die Benetzung des Hybridträgerwerkstoffs, die Gravitation und die thermischen Auftriebskräfte (Boussinesq-Approximation) berücksichtigt. Das Stefan-Problem beinhaltet den Wärmeeintrag durch den Laser, die Wärmeabstrahlung nach dem Stefan-Boltzmann-Gesetz, die Wärmeleitung und den konvektiven Wärmetransport. Um eine gesonderte Betrachtung der Aluminium-Stahl-Grenze und der fest-flüssig-Phasengrenze im Aluminium in der Energiebilanz zu vermeiden, wird das Stefan-Problem in seiner Enthalpie-Formulierung betrachtet.

Zur numerischen Lösung des Systems durch eine Finite-Elemente-Methode kann das 3D-Modell für einfache Geometrien, wie z. B. beim Schweißen zweier Bleche, auf ein 2D-Modell reduziert werden, indem nur ein 2D-Querschnitt orthogonal zur Schweißrichtung betrachtet wird. Dadurch werden Temperaturflüsse und Strömungen in Schweißrichtung nicht mehr erfasst und somit zunächst vernachlässigt, in einem erweiterten 2D-Modell soll der Längs-Temperaturfluss durch innere Quellen und Senken ersetzt werden. Der Aufwand zur numerischen Lösung des Systems ist durch die Dimensionsreduktion erheblich geringer und die Simulationen liefern für den Fall einer geraden Schweißnaht gut mit den Experimenten übereinstimmende Nahtgeometrien, wie in Abschnitt 3.2 demonstriert wird. Die eingesetzte Finite-Elemente-Software basiert auf einem Fortran-Code zur Lösung der Navier-Stokes-Gleichungen mit freier Oberfläche in 2D und 3D [7] und dessen Erweiterung um das Stefan-Problem in 2D [6] und wurde um den hybriden Trägerwerkstoff erweitert.

Insbesondere die kapillaren Kräfte an der freien Schmelze-Oberfläche und die Benetzung des Trägerwerkstoffs durch das flüssige Aluminium führen zu großen zeitlichen Veränderungen der Geometrie. Diese werden in der numerischen Methode durch einen *Arbitrary Lagrangian Eulerian* (ALE) Ansatz berücksichtigt, bei dem die Gitterpunkte des Finite-Elemente-Gitters passend zur Geometrieänderung mit verschoben werden. Dies ermöglicht in weiten Bereichen eine Berechnung von Geometrie, Strömungs- und Temperaturfeldern ohne häufige Neuvernetzung.

3 Schweißversuche und Simulationsergebnisse

Verschweißt werden Aluminium- und Stahlbleche mittels Wärmeleitungsschweißen im Überlappstoß. Die Blechdicke des Stahls beträgt 1,0 mm, die des Aluminiums 1,2 mm. Beim Schweißen kommt ein ND:YAG Laser HL4006D der Firma Trumpf zum Einsatz. Die Werkstücklänge und -breite beträgt bei beiden Blechen 200 mm x 100 mm. Der Versuchsaufbau ist schematisch in Abb. 1 dargestellt.

	Laserleistung	2300 W
	Überlappbreite	3 mm
	Spotdurchmesser	5,6 mm
	Laterale Spotlage auf Aluminium/ Stahl	1,8 mm/ 3,8 mm
	Vorschub	0,9 m/min

Abb. 1: Schematischer Versuchsaufbau beim Überlappstoß-Schweißversuch

3.1 Werkstoffe

Zum Einsatz kommen Stahl- (DC 04) und Aluminiumbleche (EN AW-6082, T4). Die chemischen Zusammensetzungen beider Werkstoffe sind in Tab. 1 und Tab. 2 aufgelistet.

Tab. 1: Werkstoffzusammensetzung DC 04, Angaben in Masseprozent [8]

Chemische Zusammensetzung	C [%]	P [%]	S [%]	Mn [%]
DC 04	≤ 0,08	≤ 0,03	≤ 0,03	≤ 0,4

Tab. 2: Werkstoffeigenschaften EN AW 6082, Angaben in Masseprozent [9]

Chemische Zusammensetzung	Si [%]	Fe [%]	Cu [%]	Mn [%]	Mg [%]	Cr [%]	Ni [%]	Zn [%]	Übrige	Ti [%]
EN AW-6082, T4	0,7-1,3	0,5	0,1	0,4-1,0	0,6-1,2	0,25	-	0,2	0,1	0,1

Für die numerischen Simulationen wurden bisher Materialkennwerte für flüssiges Aluminium verwendet. Eine Erweiterung auf temperaturabhängige Kennwerte für beide Materialien ist geplant.

3.2 Resultate

Zur Darstellung der Schweißnahtgeometrie und zur Validierung der simulierten Nahtgeometrie wird das in Abb. 2 dargestellte Schliffbild des Schweißnahtquerschnitts verwendet. Aus dem Schliffbild ist erkenntlich, dass der Aluminiumwerkstoff deutlich aufgeschmolzen ist.

Die zugehörigen Simulationsergebnisse zu verschiedenen Zeitpunkten sind in Abb. 3 und 4 dargestellt. Bei Start der Simulation ist der Laserspot noch 1,4 mm von der betrachteten Schnittebene entfernt.

Der Vergleich zeigt, dass die Ausbildung der Nahtgeometrie in der Simulation weitgehend dem Schliffbild entspricht. Hochdynamische Effekte, die zur Porenbildung führen, sind in der Simulation allerdings nicht abgebildet, wodurch die Schweißnahtform nahe der Oberseite des Stahlbleches in der Simulation deutlich glatter ausfällt.

Die Bilder von unterschiedlichen Zeitpunkten der Simulation demonstrieren, dass die Benetzung des Stahlblechs durch das flüssige Aluminium sehr von den Kontaktwinkeln beeinflusst wird. In der Simulation wurden unterschiedliche Kontaktwinkel an der horizontalen und vertikalen Seitenfläche des Stahlblechs verwendet (30 Grad an der Unterseite, 65 Grad an der vertikalen Seite). Diese zeigen sich ebenfalls in dem Schliffbild (Abb. 2). Dadurch können die Benetzungslängen an beiden Stahlblechseiten

mit der Simulation gut reproduziert werden (Unterseite: Simulation 3,4 mm, Experiment 3,3 mm).

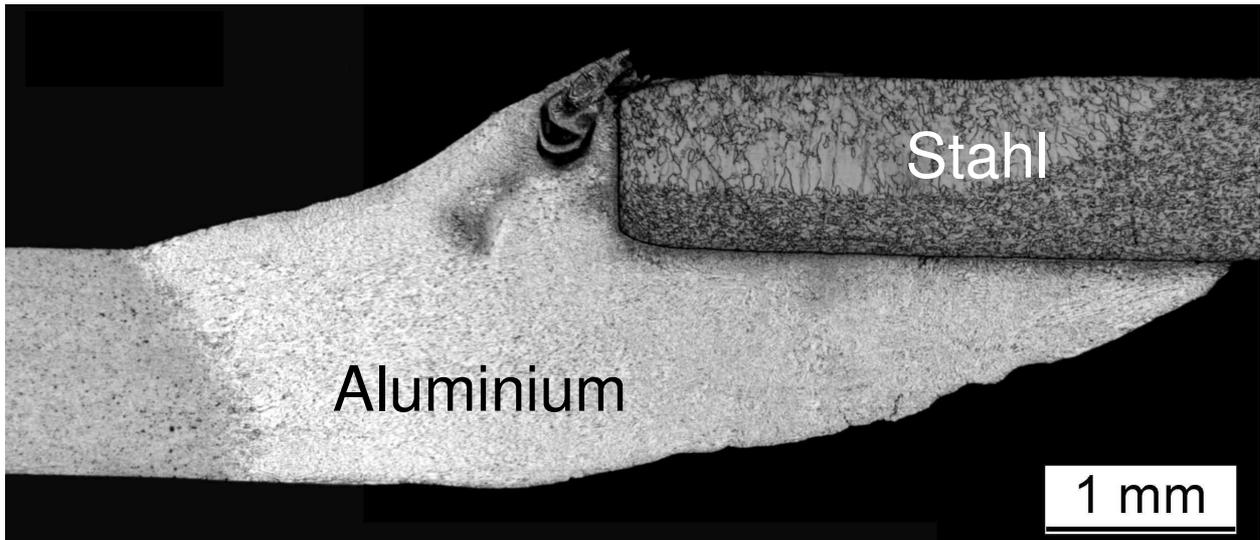


Abb. 2: Schliffbild einer Aluminium-Stahl-Schweißnaht

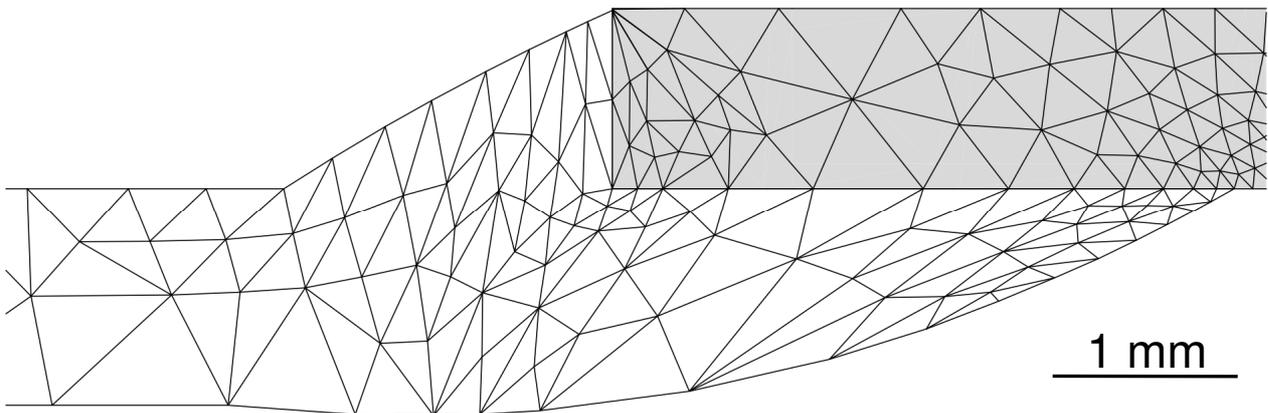


Abb. 3: Simulierte Nahtgeometrie mit FEM-Gitter Stahlblech grau hinterlegt

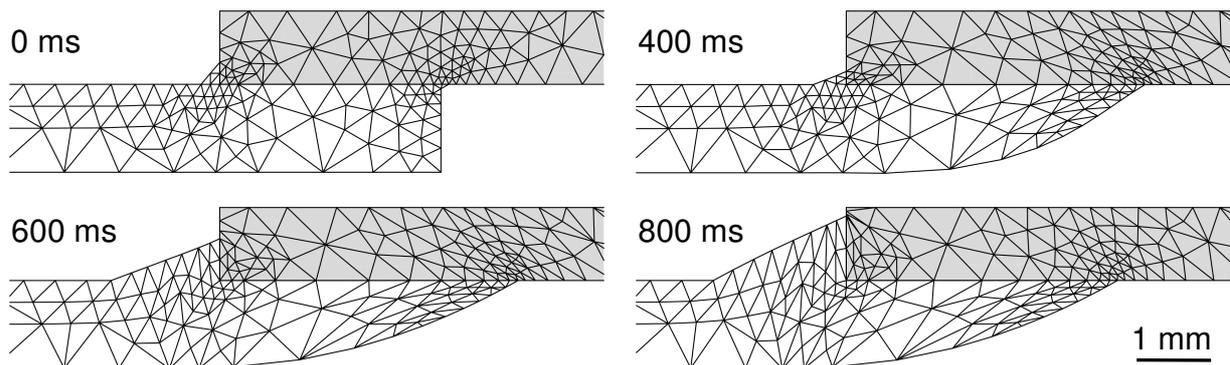


Abb. 4: Ausbildung der simulierten Nahtgeometrie nach 0, 400, 600, 800 ms

4 Fazit

Die weitgehende Übereinstimmung der Schliffbilder mit der simulierten Nahtgeometrie zeigt, dass das zu Grunde liegende Modell die wesentlichen physikalischen Effekte in Bezug auf die Nahtgeometrieausbildung umfasst. Durch die geplanten Erweiterungen der momentan verwendeten Modelle im Hinblick auf temperaturabhängige Materialparameter und Wärmeleitung längs der Schweißnaht kann die Vorhersagegenauigkeit voraussichtlich noch erhöht werden.

Wie in der Einleitung beschrieben, werden auf der hier präsentierten Simulation der Nahtgeometrie mit den entsprechenden Temperaturfeldern weitere Bausteine der ganzheitlichen Prozesssimulation aufbauen. Zunächst kann eine Simulation der Gefügeentwicklung auf die zeitabhängigen Daten zugreifen. Die finale Nahtgeometrie und das entsprechende Gefüge in Aluminium und Stahl bilden dann die Grundlage für eine Beurteilung der quasi-statischen mechanischen Nahtfestigkeit.

Danksagung

Das IGF-Vorhaben 360 ZN der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Straße 172, 40223 Düsseldorf wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Hierfür bedanken sich die Autoren dieses Beitrages.



Weiter danken wir Prof. Dr. E. Bänsch (Univ. Erlangen) für die Unterstützung bei der Modellierung und Implementierung sowie dem Metallurgie-Labor des BIAS für die unkomplizierte Erstellung der Schlibfbilder.

Literatur

- [1] Nitschke-Pagel, Th.; Wohlfahrt, H.: Residual Stresses in Welded Joints – Sources and Consequences, Handbook of Residual Stress, 2nd edition, Vol.1: Residual Stress: Manufacturing and Materials Processing, Society for Experimental Mechanics, Inc., (2005).
- [2] van der Aa, E.: Local Cooling during Welding: Prediction and Control of Residual Stresses and Buckling Distortion, Dissertation, TU Delft, (2007).
- [3] Loose, T.: Einfluss des transienten Schweißvorganges auf Verzug, Eigenstressungen und Stabilitätsverhalten axial gedrückter Kreiszyinderschalen aus Stahl, Dissertation, Karlsruhe, (2008).
- [4] Loose, T.; Sakkiettibutra, J.: Leistungsmerkmale der Schweiß-Struktursimulation, Schweißen und Schneiden 9 (2008), 487-491.
- [5] Wohlfahrt, H.: New calculations checking an adequate materials law. New results on distortion measurements. Report on the Round Robin Tests on Residual Stresses, IIW-Document IIW-X-1668-09, XIII-2291-09, XV-1326-09, (2009).
- [6] Bänsch, E.; Paul, J.; Schmidt, A.: An ALE FEM for solid-liquid phase transitions with free melt surface. Berichte aus der Technomathematik 10-07, Universität Bremen, (2010).
- [7] Bänsch, E.: Finite element discretisation of the Navier-Stokes equations with a free capillary surface, Numer. Math. 88 (2001), 203-235
- [8] Stahlinstitut VDEH, Stahl-Eisen-Liste, 11. Auflage, Verlag: Stahl Eisen GmbH, Düsseldorf (2003).
- [9] Hesse, W.: Aluminium-Werkstoff-Datenblätter, 5. Auflage, Verlag: Aluminium-Verlag Marketing & Kommunikation GmbH, Düsseldorf (2007).