

Beeinflussung der Bildung intermetallischer Phasen beim Laserfügen von Werkstoffkombinationen durch gezielte Nutzung kurzzeitmetallurgischer Effekte

T. Pretorius, M. Kreimeyer, I. Zerner, F. Wagner, H. Kohn, G. Sepold

BIAS Bremer Institut für angewandte Strahltechnik

Durch ein kombiniertes Schweiß-Lötverfahren können Aluminium- und Stahlbleche in Überlapp- oder I-Stoß-Anordnung unter Verwendung von Hochleistungslasersystemen (CO₂ oder Nd:YAG) gefügt werden. Analog zu konventionellen Verfahren - wie z.B. Widerstandsschweißen - kommt es in der Kontaktzone der Metalle zur Entstehung intermetallischer Phasen. Durch eine lokal begrenzte Energieeinbringung und hohe Prozessgeschwindigkeiten beim Laserstrahlfügen kann die Bildung dieser intermetallischen Phasen reproduzierbar begrenzt werden. Durch lichtmikroskopische Untersuchungen der in Überlapp-Anordnung gefügten Proben wurde die Abhängigkeit der Dicke des beim Fügen entstandenen Phasensaums von den Prozessparametern systematisch ermittelt. Das von Radschweit [1] angegebene Prozessfenster konnte erweitert werden. Zur Prüfung der mechanischen Eigenschaften der Verbindung wurden Zugversuche durchgeführt. Es wurde eine Zugfestigkeit für die Überlapp-Anordnung von 180 N/mm² und für die I-Stoß-Anordnung von 166 N/mm² gemessen. Aus den durch FEM-Berechnungen und Thermoelement-Messungen ermittelten Temperaturfeldern ergeben sich Aufheizraten größer 2000 °C/s für die Überlapp-Anordnung bzw. größer 40000 °C/s für den I-Stoß. Die Abkühlraten ergeben sich entsprechend zu 500 °C/s bzw. 1000 °C/s. Mit Hilfe von REM-, TEM- und EDX-Untersuchungen wurden die an der Kontaktzone der gefügten Bleche entstehenden intermetallischen Phasen charakterisiert. Der Phasensaum ist zweigeteilt; auf der Aluminium-Seite bildet sich die Phase FeAl₃, auf der Stahl-Seite FeAl₂.

1 Einleitung

An der Entwicklung von Leichtbaustrukturen aus unterschiedlichen Materialien hat unter anderem die Automobil- und Flugzeugindustrie großes Interesse. Ziel ist es, eine Gewichtsreduzierung von Bauteilgruppen zu erreichen, die aber trotz ihres reduzierten Gewichtes eine hohe Festigkeit und Steifigkeit aufweisen. Durch den Einsatz von gewichtsreduzierten Bauteilgruppen können Nutzlaststeigerungen, Geschwindigkeitserhöhungen und ein geringerer Energieverbrauch erreicht werden. Erste Entwicklungen zum Fügen von Tailored-Blank-Strukturen aus unterschiedlichen Materialien begannen mit dem Einsatz konventioneller Fügemethoden (z.B. durch Schraub- oder Nietverbindungen). Diese Art der Verbindungstechnik wird auch heute noch in zahlreichen Industrieapplikationen eingesetzt. Durch den Einsatz von Hochleistungsstrahlsystemen können in neuerer Zeit auch stoffschlüssige Verbindungen zwischen unterschiedlichen Materialien erzeugt werden.

Diese Technik bringt aber auch einige Probleme mit sich. Ein signifikantes Problem beim thermischen Fügen von Stahl und Aluminium wird beim Betrachten des binären Phasendiagramms

von Eisen und Aluminium (Bild 1) deutlich. Bei der Vermischung der beiden Elemente können sich im Konzentrationsbereich von 51 bis 99 at% Al die intermetallischen Phasen FeAl_2 , Fe_2Al_5 und FeAl_3 bilden. Diese intermetallischen Phasen weisen eine sehr viel größere Härte als die Mischkristallphasen von Eisen bzw. Aluminium auf. Bildet sich beim Fügen von Eisen (bzw. Stahl) mit Aluminium in der Fügezone ein ausgedehnter Saum aus diesen intermetallischen Phasen, so hat dies eine Versprödung der Fügeverbindung zur Folge und die Tragfestigkeit der Verbindung wird herabgesetzt.

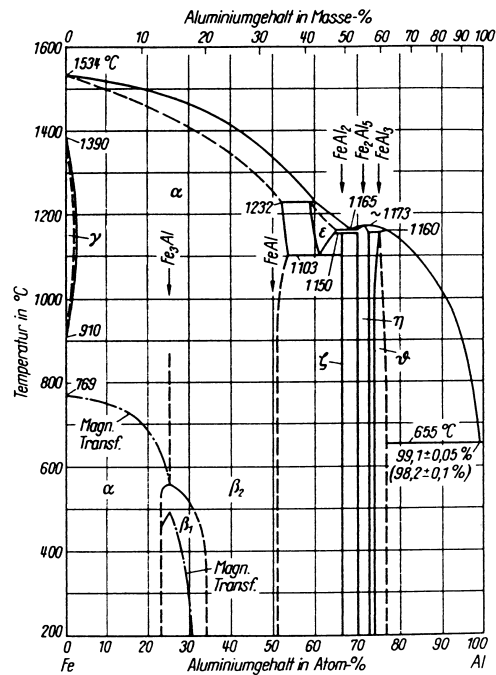


Bild 1. Binäres Phasendiagramm von Eisen und Aluminium [2]

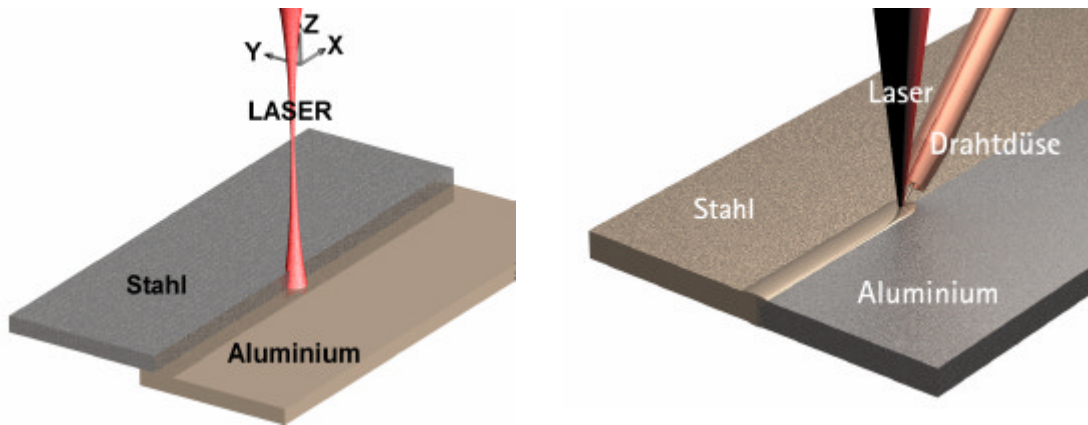
Es wird untersucht, in wie weit eine Begrenzung der eingebrachten Energie die Ausbildung des Phasensaums beeinflussen kann. Weiterhin wird die Zusammensetzung und die Morphologie des Phasensaums untersucht.

2 Experimente

2.1 Prozessanordnung

Die zum Laserfügen verwendete Anordnung ist in Bild 2 dargestellt. Es ist möglich, die Stahl- und Aluminiumbleche sowohl in Überlapp-Anordnung als auch als I-Stoß zu fügen.

Bei der Überlapp-Anordnung (Bild 2a) liegt das Stahlblech über dem Aluminiumblech. Der Überlapp der Bleche beträgt 1,5 mm. Die Laserstrahlung trifft deutlich defokussiert auf die Probe, beleuchtet zu ca. 70% das Stahlblech und zu ca. 30% das Aluminiumblech. Der optionale Zusatzwerkstoff (AISI12) wird schräg von der Seite zugeführt. Um einen Nullspalt zwischen den Blechen zu gewährleisten wird eine im BIAS entwickelte Spannvorrichtung mit Rollenandruckkopf verwendet [3]. Die Laserstrahlleistung muss so gewählt werden, dass sich kein Tiefschweißeffekt einstellt.



a) Überlapp-Anordnung mit deutlich defokussiertem Laserstrahl

b) I-Stoß-Anordnung mit fokussiertem Laserstrahl

Bild 2. Prinzipskizze des Aufbaus zum Fügen von Mischverbindungen

Beim Fügen in I-Stoß-Anordnung (Bild 2b) trifft die Laserstrahlung fokussiert auf die Probe. Der Fokuspunkt liegt dabei etwas seitlich versetzt im Aluminium. Der Zusatzwerkstoff wird als Draht schleppend zugeführt. Auch in dieser Anordnung ist ein Nullspalt zwischen den beiden Blechen erforderlich, der durch eine entsprechende Spannvorrichtung [4] gewährleistet werden kann. Im Gegensatz zur Überlapp-Anordnung wird hier der Tiefschweißeffekt ausgenutzt.

2.2 Werkstoffe und Prozessparameter

Die bei den Laserschweißexperimenten verwendeten Werkstoffkombinationen sind in Tabelle 1 aufgelistet.

Tabelle 1. Verwendete Werkstoffkombinationen

		W1	W2	W3	W4
Al-Seite	Material	Al99,5	Al99,5	AlMg0,4Si1,2	AlMg0,4Si1,2
	Blechdicke	1 mm	1 mm	1,1 mm	1,15 mm
St-Seite	Material	St14	St14	St14	St14 (verzinkt)
	Blechdicke	0,88 mm	0,88 mm	0,88 mm	0,88 mm
Zusatzwerkstoff	Material	ohne	AlSi12	AlSi12	AlSi12
	Durchmesser		0,8 mm	0,8 mm	0,8 mm

Die Werkstoffkombination W1 stellt die werkstoffkundliche Grundlage dar. Hierbei handelt es sich um relative reine Legierungen, die im wesentlichen die Elemente Al und Fe enthalten. Die Werkstoffkombination W2 baut auf W1 auf, wobei durch den Zusatzwerkstoff Silizium in die Verbindung eingebracht wird. Als weitere Steigerung in der Legierungszugabe ist die Werkstoffkombination W3 zu sehen. Hierbei bringt bereits der Aluminium-Grundwerkstoff deutliche Anteile an Magnesium und Silizium in die Verbindung ein. Um die Steigerung gegenüber der Kombination W2 auch sicher zu erhalten, muss zusätzlich Silizium durch den Zusatzwerkstoff

in gleicher Menge wie bei der Kombination W2 zugeführt werden. Für die Verbindung in I-Stoß-Anordnung wurde die Werkstoffkombination W4 verwendet. Der Unterschied zu W3 besteht im Wesentlichen darin, dass verzinktes Stahlblech verwendet wurde.

Um die Oxidschicht auf der Oberfläche des Aluminiums zu zerstören wurde in allen Fällen eine kleine Menge des nicht korrosiven Flussmittels FL H-2 eingesetzt.

Für das Fügen in Überlapp-Anordnung wurden Vorschubgeschwindigkeiten von 500 bis 1400 mm/min verwendet. Im Fall der I-Stoß-Anordnung waren diese mit 6000 bis 8000 mm/min deutlich größer. Die Laserstrahlleistung lag für die Überlapp-Anordnung zwischen 1 und 1,6 kW und für die I-Stoß-Anordnung zwischen 3 und 4 kW.

2.3 Prozessfenster

Durch lichtmikroskopische Untersuchungen in Überlapp-Anordnung gefügter Proben wurde die Phasensaumdicke in Abhängigkeit von der Laserstrahlleistung P_L und der Vorschubgeschwindigkeit v_s systematisch untersucht. Aus der Phasensaumdicke lässt sich das in Bild 3 dargestellte Prozessfenster ableiten. Es stellt eine Erweiterung des von Radschiet [1] ermittelten Prozessfensters dar. Deutlich ist, dass durch Zuführen des Zusatzwerkstoffes das Prozessfenster deutlich vergrößert wird (W1→W2). Die Verwendung von AlMg0,4Si1,2 statt Al99,5 vergrößert das Prozessfenster nochmals (W2→W3). Dabei ist zu beachten, dass für die Werkstoffkombinationen W1 und W3 das Prozessfenster nur im Bereich von $P_L = 1,3 \text{ kW}$ bis $P_L = 1,6 \text{ kW}$ ermittelt wurde.

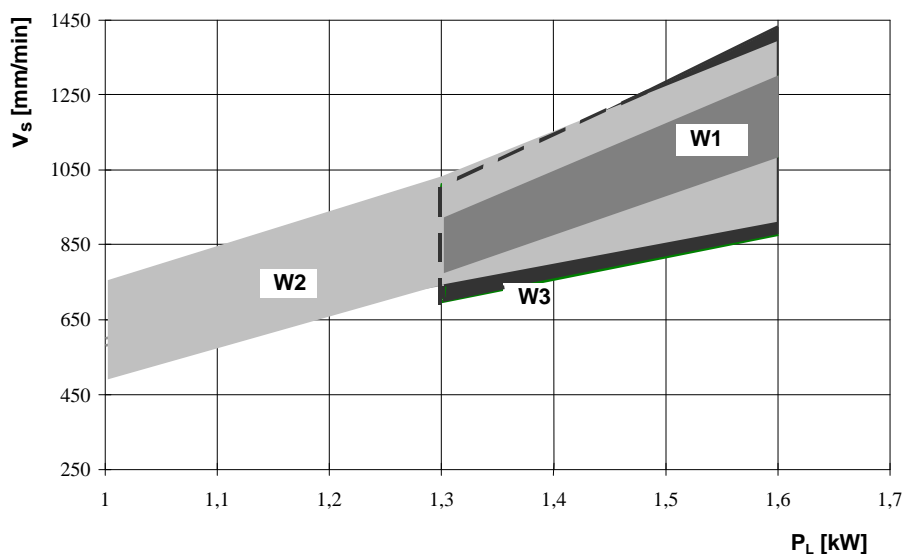


Bild 3. Prozessfenster für die Werkstoffkombinationen W1, W2 und W3

2.4 Zugversuche

In Zugversuchen wurde die mechanische Belastbarkeit der gefügten Proben der Werkstoffkombinationen W3 und W4 untersucht. In Tabelle 2 ist jeweils die mittlere und höchste erreichte statische Zugfestigkeit angegeben.

Tabelle 2. Statische Zugfestigkeit der mit Zusatzwerkstoff gefügten Proben

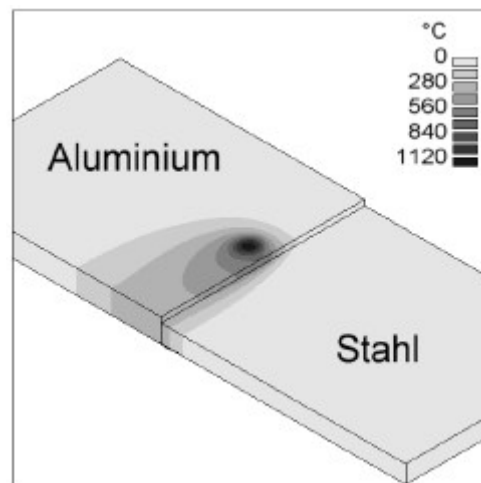
	Überlapp-Anordnung (W3)	I-Stoß-Anordnung (W4)
mittlere Zugfestigkeit [N/mm ²]	180	166
max. Zugfestigkeit [N/mm ²]	192	188
Probenanzahl	5	5

3 Bestimmung der Temperaturfelder

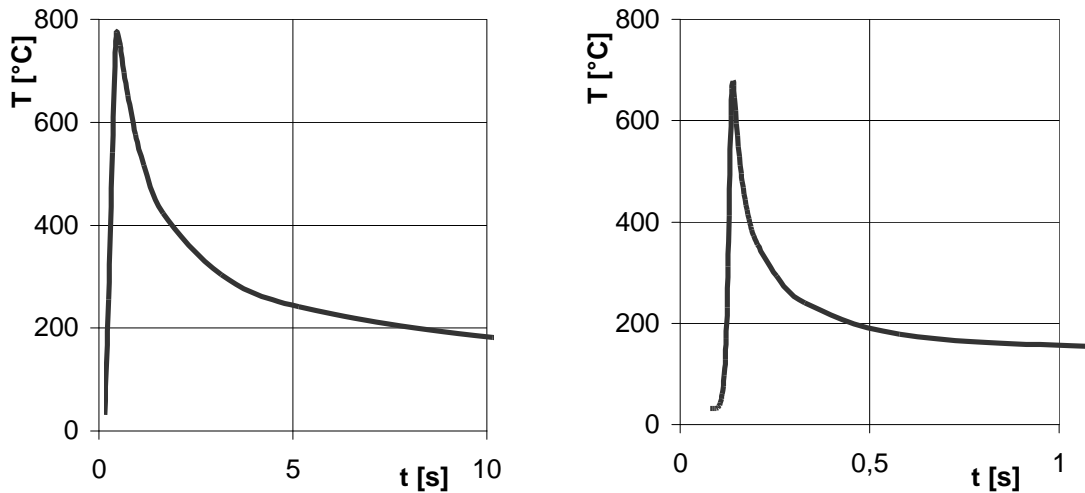
Die Ermittlung der Temperaturfelder die sich beim Fügen der Mischverbindungen einstellen, stellt eine notwendige Voraussetzung für weiter führende Berechnungen und Überlegungen zum Verständnis des Phasensaumwachstums dar. Sie wurden durch Finite-Element-Berechnungen (FEM) simuliert und die Ergebnisse mit Thermoelement-Messungen überprüft.

3.1 FEM-Simulationen

In Bild 4 ist das Ergebnis einer FEM-Simulation für das Fügen in I-Stoß-Anordnung zu sehen.

**Bild 4.** Berechneter Temperaturverlauf (FEM) beim Fügen einer I-Stoß-Verbindung

Die Berechnungen lassen die Betrachtung des Temperaturverlaufs an jedem Punkt innerhalb des simulierten Bereichs zu. In den Bildern 5a) und b) ist der Temperaturverlauf an einem Punkt der Kontaktzone der beiden Bleche dargestellt. Es ist zu erkennen, dass die Schmelztemperatur von Aluminium (660 °C) in der Fügezone überschritten wird; die des Stahls (1583 °C) wird dagegen nicht erreicht. Aus diesem Grund handelt es sich bei dem Fügeverfahren um eine Mischung aus Schweiß- und Lötprozess.



a) Überlapp-Anordnung; $v_s = 1210$ mm/min b) I-Stoß-Anordnung; $v_s = 6000$ mm/min

Bild 5. Durch FEM-Berechnungen ermittelter Temperaturverlauf

3.2 Thermoelement-Messungen

Zur Überprüfung der FEM-Simulationen wurden Thermoelement-Messungen an der Fügezone durchgeführt. Dazu wurden im Fall der Überlapp-Anordnung in das oberliegende Stahlblech Thermoelemente in kleine Aussparungen eingesetzt (siehe Bild 6). Zusätzlich wurde der thermische Kontakt mit Wärmeleitpaste verbessert. Trotz dieser Maßnahmen war bei den meisten Proben der thermische Kontakt der Thermoelemente nicht ausreichend. Die Messungen ergaben Spitzentemperaturen, die deutlich unterhalb der Schmelztemperatur von Aluminium lagen. Die Temperatur musste jedoch kurzzeitig über die Aluminium-Schmelztemperatur angestiegen sein, da die Bleche gefügt wurden.

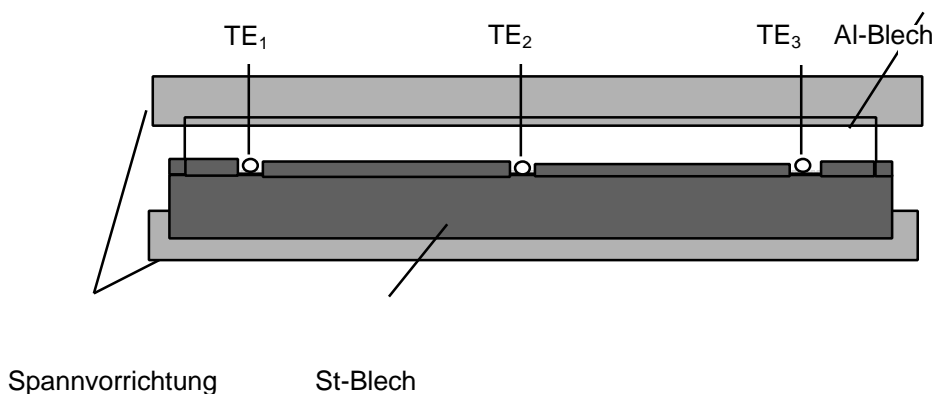
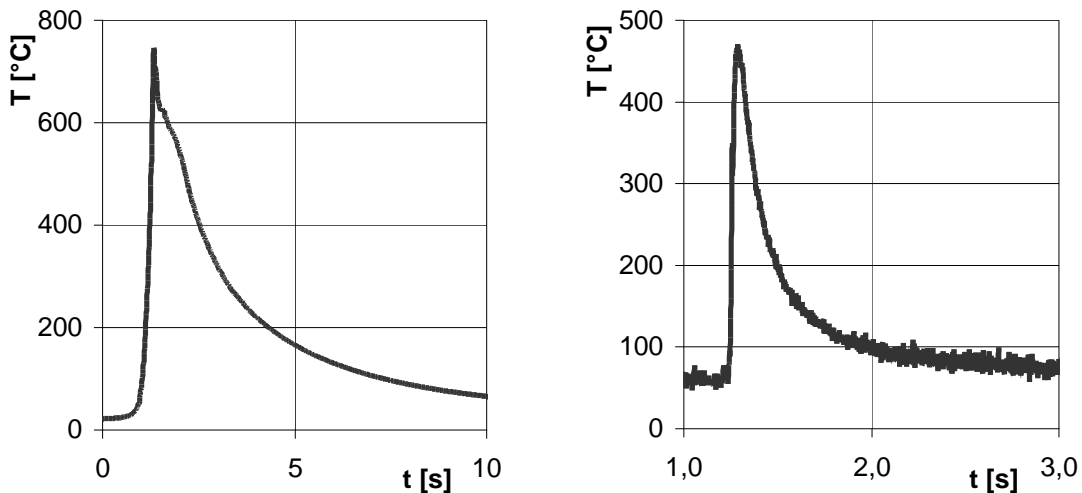


Bild 6. Position der Thermoelemente (TE) beim Fügen in Überlapp-Anordnung

Für die Messungen in I-Stoß-Anordnung wurden die Thermoelemente in kleine Löcher neben der Kontaktfläche der Bleche eingesetzt. Auch hier wurde Wärmeleitpaste verwendet, um den thermischen Kontakt zu verbessern. Die gemessenen Temperaturen lagen auch hier meist deutlich unter den erwarteten. In Bild 7 sind die Messergebnisse der Proben zu sehen, die die größten gemessenen Temperaturen enthalten. Im Fall der Überlapp-Anordnung (Bild 7a) ergibt sich ein sehr ähnlicher Temperaturverlauf wie der in den FEM-Berechnungen ermittelte (Bild 5a). Darum ist

davon auszugehen, dass die FEM-Berechnungen eine realistische Darstellung des Temperaturfeldes liefern.



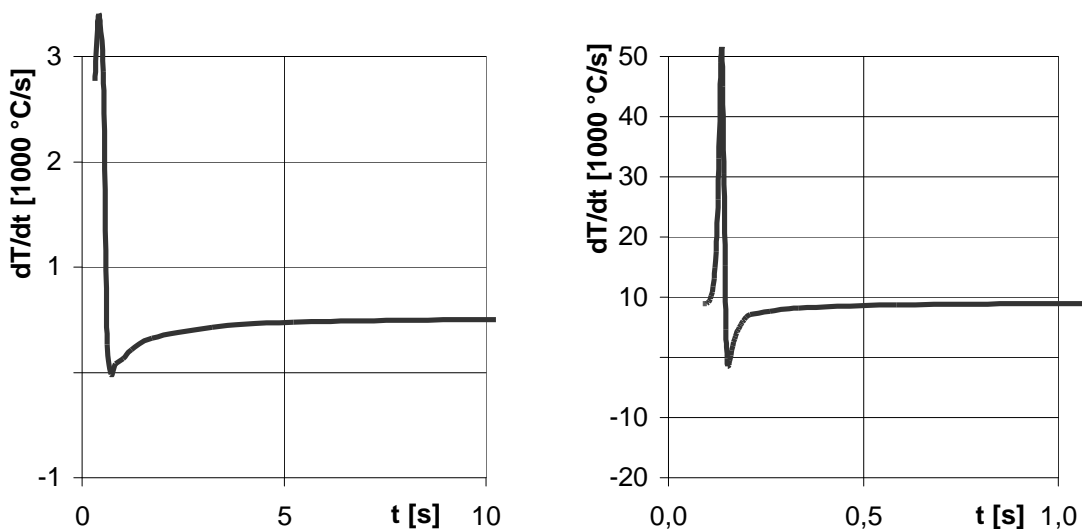
a) Überlapp-Anordnung

b) I-Stoß-Anordnung

Bild 7. Durch Thermoelement-Messungen ermittelter Temperaturverlauf

Die gemessenen Temperaturverläufe im Fall der I-Stoß-Anordnung (Bild 7b) liegen deutlich unterhalb der durch die FEM-Berechnungen ermittelten (Bild 5b). Die Spitzentemperatur liegt mit ca. 480 °C sogar deutlich unterhalb der Schmelztemperatur von Aluminium. Aus diesem Grund ist sicher, dass die Messung zu geringe Temperaturen wiedergibt. Der prinzipielle Verlauf, besonders die Breite des Temperatursignals stimmt dagegen gut mit den simulierten Werten überein.

3.3 Aufheiz- und Abkühlraten



a) Überlapp-Anordnung

b) I-Stoß-Anordnung

Bild 8. Aus den FEM-Berechnungen ermittelte Aufheiz- und Abkühlraten

Aus den Temperaturverläufen können durch Ableiten die Temperaturänderungen während des Fügens ermittelt werden. Hierzu wurden die Temperaturkurven der FEM-Berechnungen verwendet. In Bild 8 ist der entsprechende Verlauf zu sehen.

Für die Überlapp-Anordnung ergeben sich Aufheizraten größer als 2000 °C/s und Abkühlraten von bis zu 500 °C/s. Im Fall der I-Stoß-Anordnung liegen die Werte - bedingt durch die höhere Vorschubgeschwindigkeit - noch deutlich höher. Hier werden Aufheizraten größer 40000 °C/s und Abkühlraten von bis zu 1000 °C/s erreicht. Das Aufheizen der Proben ergibt sich direkt aus der Laserbestrahlung und ist somit in erster Linie von der Vorschubgeschwindigkeit abhängig. Die Abkühlung erfolgt im Wesentlichen durch Selbstabschreckung der Bleche. Aus diesem Grund ergeben sich hier deutlich geringere Werte.

4 Simulationsrechnungen zum Phasensaumwachstum

Unter Verwendung der aus den FEM-Berechnungen bekannten Temperaturverläufe wurden Simulationsrechnungen durchgeführt, um die Diffusionsvorgänge bei der Ausbildung der Phasensäume an der Kontaktzone der Bleche nachzubilden. Hierfür wurde ein eindimensionales Zellenmodell entwickelt. Als Anfangsbedingung enthalten die Zellen reines Aluminium bzw. Eisen. Unter Anwendung des 1. Fick'schen Diffusionsgesetzes verändert sich die Konzentration innerhalb der Zellen an der Kontaktzone der Bleche. Bei Erreichen einer vorgegebenen Grenzkonzentration innerhalb einer Zelle wird diese dem Phasensaum zugeordnet. Zur Lösung der Diffusionsgleichung ist die genaue Kenntnis der temperaturabhängigen Diffusionskoeffizienten für alle auftretenden Phasen notwendig. Diese sind der Literatur nur bedingt zu entnehmen. Aus diesem Grund wurden die Diffusionskoeffizienten als Parameter verwendet und soweit angepasst, bis sich die aus den Experimenten ermittelten Phasensaumdicken ergaben. Die Abweichung der so ermittelten Diffusionskoeffizienten von den aus der Literatur entnommenen, erweist sich allerdings als groß [5]. Aus diesem Grund ist eine Erweiterung des Modells notwendig, die allerdings einen erheblich vergrößerten Rechenaufwand beinhaltet und darum in weiter führenden Arbeiten zu diesem Thema bearbeitet werden soll.

5 Phasenanalytik mittels REM, TEM und EDX

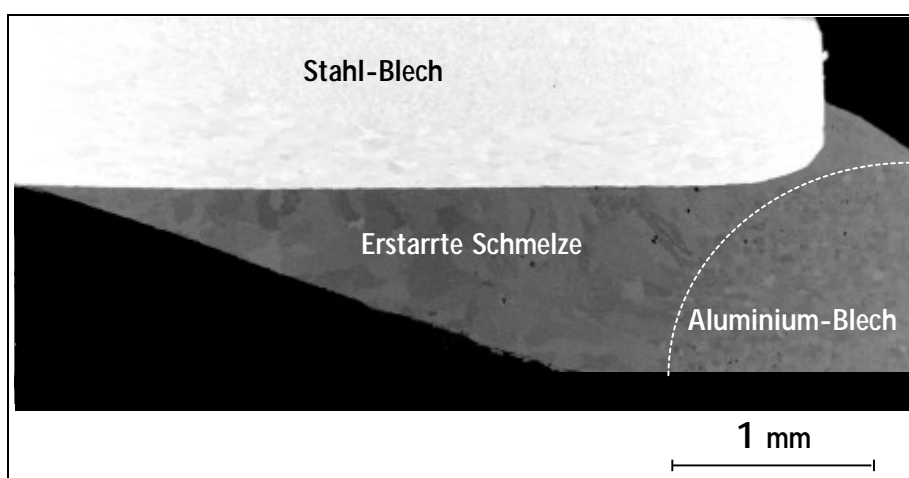


Bild 9. REM-Übersichtsaufnahme einer Überlapp-Verbindung; Werkstoffkombination W3

An Proben der Werkstoffkombinationen W1 und W3 (siehe Tabelle 1), die in Überlapp-Anordnung gefügt wurden, wurden am Fraunhofer-Institut Werkstoff- und Strahltechnik in Dresden REM, TEM und EDX-Analysen durchgeführt.

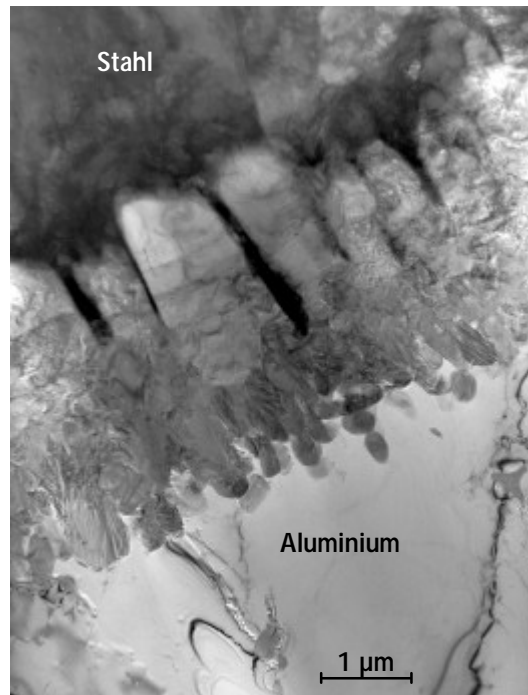


Bild 10. TEM-Aufnahme des intermetallischen Phasensaums an der Fügeverbindung; Werkstoffkombination W1

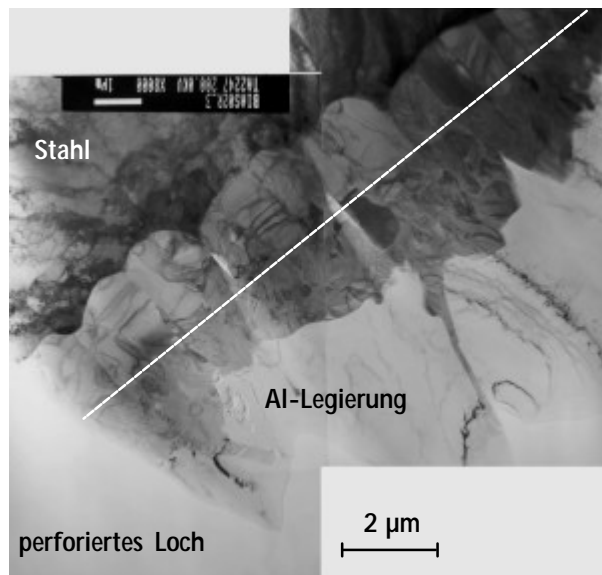


Bild 11. TEM-Aufnahme des intermetallischen Phasensaums an der Fügeverbindung; Werkstoffkombination W3

In Bild 9 ist eine REM-Übersichtsaufnahme der Fügeverbindung der Werkstoffkombination W3 zu sehen. Deutlich zu erkennen ist, dass das Stahlblech noch in seiner ursprünglichen Form vorliegt, während das Aluminium in der Fügezone aufgeschmolzen ist und das Stahlblech benetzt hat. Die

erstarrte Aluminium-Schmelze weist ein deutlich grobkörnigeres Gefüge auf als der Aluminium Grundwerkstoff, der in der rechten, unteren Ecke des Bildes zu sehen ist.

Die Bilder 10 (W1) und 11 (W3) enthalten TEM-Detailaufnahmen des an der Fügezone entstehenden Phasensaums. In beiden Fällen ist deutlich eine Zweiteilung des Saums zu erkennen. In Bild 11 ist die Grenze zwischen den beiden Teilen durch eine gestrichelte Linie gekennzeichnet. Die auf der Stahl-Seite gewachsenen Körner des Saums haben in beiden Fällen eine zahnartige Form. Auf der Aluminium-Seite bildet sich abhängig von der verwendeten Werkstoffkombination eine unterschiedliche Struktur: Im Fall von W1 (Bild 10) sind einzelne, im wesentlichen runde Körner zu erkennen. Bei Vorhandensein von Silizium (W3, Bild 11) ist dagegen eine durchgängige Wachstumsfront des Phasensaumteils auf der Aluminium-Seite zu erkennen.

EDX-Untersuchungen im REM ergaben auf der Stahl-Seite des Phasensaums Konzentrationen von 67,4 at% Al und 32,6 at% Fe (W1) bzw. 67,0 at% Al, 31,5 at% Fe und 1,5 at% Si (W3). Diese Konzentrationen liegen im Existenzbereich der Phase FeAl_2 . Auf der Aluminium-Seite des Phasensaums ergeben sich Konzentrationen von 74,9 at% Al und 24,9 at% Fe (W1) bzw. 72,4 at% Al; 26,1 at% Fe und 1,5 at% Si (W3). Für die Werkstoffkombination W1 lässt sich hieraus auf die Phase FeAl_3 schließen. Im Fall der Werkstoffkombination W3 kann anhand der ermittelten Konzentrationen nicht entschieden werden, ob es sich um die Phase FeAl_3 oder um Fe_2Al_5 handelt. Mittels Feinbereichs-Elektronenbeugung konnte nach Kippexperimenten im TEM jedoch nachgewiesen werden, dass es sich auch bei der Werkstoffkombination W3 um eine Phase vom Typ FeAl_3 handelt.

6 Literatur

- [1] Radscheit, C. R.: Laserstrahlfügen von Aluminium mit Stahl. Dissertation, Strahltechnik Bd. 4 Bremen, BIAS Verlag (1997), Hrsg. G. Sepold, W. Jüptner
- [2] Hansen, M.: Constitution of Binary Alloys. Mc-Graw-Hill Book Company, New York (1958)
- [3] Kreimeyer, M.; Wagner, F.; Zerner, I.; Sepold, G: Laserstrahlfügen von Aluminium mit Titan unter Verwendung eines optimierten Arbeitskopfs. Löt 01, Aachen, DVS-Berichte Band 212, DVS-Verlag, Düsseldorf (2001) S. 317-321.
- [4] Kreimeyer, M.; Wagner, F.; Sepold, G.: Combined Welding-Brazing Process for Joining Aluminum-Steel-Tailored Blanks with High Power Sources, IBEC (2002), Paris, Proceedings of the 2002 IBEC and ATT Conferences, ISBN: 0-7680-1066-7.
- [5] Zerner, I.: Prozessstabilisierung und Ergebnisse für das Laserstrahlfügen von Aluminium-Stahl-Verbindungen. Dissertation, Strahltechnik Bd. 16 Bremen, BIAS Verlag (2002), Hrsg. G. Sepold, W. Jüptner