



Forschungsvorhaben zur Beeinflussung der Schmelzbaderstarrung erfolgreich abgeschlossen

Das Teilprojekt A1 "Einsatz geregelt gepulster Lichtbögen zur Beeinflussung der Schmelzbaderstarrung bei Lichtbogenfügeprozessen" (IGF-Nr. 15870 BG) aus dem DFG/AiF-Cluster «Lichtbogenschweißen – Physik und Werkzeug» haben die Forschungsstellen Füge und Beschichtungstechnik der TU-Berlin (Forschungsstelle 1) und Institut für Inverse Modellierung (IIM) der Hochschule Lausitz (Forschungsstelle 2) erfolgreich abgeschlossen.

Lichtbogenschweißverfahren sind auf Grund der Variantenvielfalt, „einfachen“ Handhabbarkeit sowie geringen Investitions- und Unterhaltskosten weit verbreitet. Trotz vielfältiger metallurgischer und prozesstechnischer Forschungs- und Entwicklungsarbeiten ist das Entstehen von Heißrissen, Mittenrippendefekten etc. bei vielen Werkstoffen häufig unvermeidbar. Darüber hinaus lassen sich z.B. Werkstoffkombinationen wie Stahl-Aluminium nicht prozesssicher Schmelzschweißen, da sich spröde intermetallische Phasen bilden.

Die Füge und Beschichtungstechnik der TU-Berlin (Forschungsstelle 1) zeichnete verantwortlich für den Versuchsaufbau und die Versuchsdurchführung. In Bezug auf die Analyse der Prozesse lag der Schwerpunkt unter der Schmelzbadoberfläche:

- Analyse der Schlibbilder zur Bewertung des Erstarrungsverhaltens.
- CFD-Modellierung der Schmelzbadströmungsmuster in Hinblick auf die Ergründung möglicher Einflüsse des Strömungsverhaltens auf die Erstarrungsprozesse der Schmelze.
- Aufbau der Versuchsanlage – einschließlich der Stromimpuls-steuerung (MATLAB- Simulink) und der Entwicklung der Prozessdiagnostik (elektrische Signale, HGA-Kameraaufnahmen und spektralselektive Photodioden).

Im Fokus der Anforderungen stehen zunächst sicherlich einerseits Eigenschaften wie Festigkeit, Steifigkeit, Elastizität und je nach Einsatzgebiet Restfestigkeit und Crashverhalten. Hinzu kommen Aspekte der Korrosions- und Langzeitbeständigkeit. Andererseits muss hinsichtlich des Fertigungsablaufes die Zugänglichkeit der Fügestelle und Integrierbarkeit in übergeordnete Fertigungsprozessketten sichergestellt sein. Aussehen und Optik mögen zwar zunächst von untergeordneter Bedeutung erscheinen, sind jedoch in der Großserienfertigung von Bedeutung, wenn die Fügezone vor dem Lackieren nicht mehr nachgearbeitet werden soll oder sogar als optisch prägnantes Merkmal dient.

Die Wahl der Fügetechnologie wird neben diesen Fragestellungen vor allem dominiert von den entstehenden Kosten, die durch die Globalisierung entscheidend für den Produktionsstandort sind. Darüber hinaus müssen Fügetechnologien auch den veränderten Anforderungen moderner Produkte, deren Lebenszyklus, Energieverbrauch usw. gerecht werden. Gegenwärtig bedingen die Konstruktionsprinzipien des Leichtbaus sowie moderne Werkstoffe und Werkstoffkombinationen das Schweißen im Grenzbereich. Die gleichzeitige Verkürzung des Produktlebenszyklus erfordert eine Verkürzung der Entwicklungszeiten und verlangt nach der Vorhersagbarkeit von Verfahrensparametern sowie neuen Regelungskonzepten, die die Prozesssicherheit gewährleisten. Besondere Bedeutung kommt heute auch der Ökobilanz des Fügeprozesses zu.

Die Vorteile des Lichtbogenschweißens liegen in der robusten Anlagentechnik und einfachen Anwendung. Weiterhin zeichnet sich die Technologie durch geringe Anschaffungs- und Unterhaltskosten aus, das Problem der Schweißfehler (Heißrisse etc.) schränkt die Anwendung dieser kostengünstigen Verfahren ein.

Das A1-Projekt nahm im Schweißlichtbogen-Cluster – neben dem A4-Projekt (Regelungsaspekte) – als Output-Projekt eine zentrale Stellung ein. Letztendlich sind es die metallurgischen Aspekte der Schweißnaht, die als Endergebnis des Schweißprozesses im Mittelpunkt aller Optimierungsprozesse der Schweißlichtbogentechnologie stehen.

Zum anderen kam dem Institut für inverse Modellierung der Hochschule Lausitz (IIM) im Verbund des Clusters auch die Aufgabenstellung zu, einerseits analytische und numerische Signalauswertungsmethoden zu entwickeln, die von den beteiligten Forschungsstellen und den Geräteherstellern in ihrer täglichen Arbeit verwendet werden konnten und andererseits musste über das IIM ein Gesamtvorstellungssystem über den Schweißlichtbogen zusammengetragen werden, dass sich wiederum als Ausgangsdenkmuster für die experimentellen Arbeiten der Forschungsstellen und für die Anwender als Anregung für neue technologische Ansätze als tauglich erweisen konnte.

Das Institut für Inverse Modellierung (IIM) der Hochschule Lausitz (Forschungsstelle 2) zeichnete verantwortlich für die Analyse der Prozesse über der Schmelzbadoberfläche:

- Schweißlichtbogendynamik
- Tropfenabwurfverhalten
- Schmelzbadschwingungsverhalten, das durch die Tropfenablösedynamik beeinflusst wird

Im Mittelpunkt des A1-Projektes standen Untersuchungen, Möglichkeiten der Übertragbarkeit eines aus dem Laser-Schweißen bekannten Effekts, auf das MIG-MAG Impulslichtbogenschweißen zu überprüfen (pulsmodulierter Wärmeeintrag).

Aufgrund der clusterübergreifenden zentralen Aufgabenstellung – durch gezielte Beeinflussung des Lichtbogenverhaltens die Schweißnahtqualität zu verbessern – gestalteten sich die Arbeiten am A1-Projekt in sehr hohem Maße vernetzt mit den anderen Forschungsstellen des Clusters.

Es erwies sich aber auch – bedingt durch die Spezifik der Aufgabenstellung – eine breite und intensive Zusammenarbeit mit den Stromquellenherstellern des PbA sowohl als notwendig als auch vom Resultat her als sehr erfolgreich:

- Die Schweißstromquellenhersteller des PbA standen die ganze Bearbeitungszeit über mit Anregungen, Empfehlungen und kritischen Bewertungen den beiden Forschungsstellen hilfreich zur Seite.
- Um die vielen Aspekte der Schweißlichtbogendynamik systematisch und relativ umfassend zu erforschen, erwiesen sich die im Rahmen dieses Projektes geplanten Ressourcen als nicht ausreichend. Mit einer Vielzahl sehr qualifizierter und aufwendiger Messungen brachten sich die Schweißstromquellenhersteller direkt in den Projektbearbeitungsprozess ein, wodurch insbesondere das IIM in seiner Arbeit unterstützt wurde.
- Im Rahmen der Projektbearbeitung konnte eine Reihe neuer Effekte entdeckt, Neuinterpretationen bekannter quantitativer Verhältnisse vorgenommen werden und eine Reihe von Anregungen den Quellenherstellern gegeben werden – sowohl für verbesserte Regelungsansätze als auch für die technologisch relevante Prozessführung. Dieser Erkenntnis- und Entwicklungsprozess war nur durch eine ständige enge Kommunikation mit den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Schweißgerätehersteller möglich, die ihrerseits den beiden Forschungsstellen auch mit spezifizierten Aufgabenstellungen und Problembeschreibungen die notwendigen Grundorientierungen und Korrekturanregungen für beide Forschungsstellen gaben.

Die Arbeiten des IIM für das A1-Projekt entwickelten sich (wie auch für das A4-Projekt) – bedingt durch eine Reihe objektiver Umstände – in einem relativ selbständigen Rahmen:

- 1) Die Methoden der Datenanalyse und inversen Modellierung mussten –

entsprechend der Planung – eigenständig durch das IIM entwickelt werden.

2) Der Lichtbogenprozess realisiert sich in engem Wechselspiel dreier System-Komponenten:

- a. Plasmaphysikalische Gesetzmäßigkeiten des Lichtbogenzustands
- b. Besonderheiten der Stromquelle insbesondere die U(I)-Charakteristik
- c. Besonderheiten der Prozessführung, bedingt durch die unterschiedlichen technologischen Zielstellungen

Vordergründig ging es für das IIM im A1-Projekt darum, die grundlegenden Gesetzmäßigkeiten des Lichtbogenverhaltens auf der Basis einer qualifizierten Datenanalyse zu erkennen. Da sich jedoch in jeder konkreten Messung eine Wechselwirkung der drei System-Komponenten widerspiegelt und diese Widerspiegelung für jede Schweißstromquelle mit einer anderen Wichtung erfolgt, entstand für das IIM eine unvorhergesehene komplizierte Ausgangssituation, die noch Untersuchungen zum Einsatz dadurch verschärft wurde, dass die Messungen der Forschungsstelle 1 auf der Basis einer selbst definierten Prozessführung (frei programmierbare Simulink-Steuerung) erfolgten, die sich gegenüber kommerziellen Stromquellen, durch eine Reihe von erheblichen Besonderheiten auszeichnete. Diese Situation konnte durch das IIM – in Ergänzung zu den in der Antragstellung entwickelten Vorstellungen – nur durch drei neue Arbeitsansätze bewältigt werden:

- (1) Über den Vergleich der Messungen mit verschiedensten Maschinenmodellen und Parametereinstellungen (Messungen aller Forschungsstellen des Clusters und der Stromquellenhersteller des PbA) war es möglich, die „maschinenunabhängigen“ Lichtbogeneigenschaften zu erkennen und mit einer entsprechenden Systematik zu strukturieren.
- (2) Im Rahmen des ständigen Kontakts mit den Forschungs- und Entwicklungsabteilungen der Stromquellenhersteller gelang auch die selektive Zuordnung verschiedenster Signalstrukturen zur Lichtbogenphysik bzw. der Maschinenregelung zuzuordnen.
- (3) Mit gezielten Messungen der Forschungsstelle 1 gelang es dann wiederum in Bezug auf die Aufteilung der Effekte im Sinne von (2) die notwendige letzte Bestätigung zu erlangen.
- 3) In der ursprünglich geplanten Vorgehensweise war gemäß Antragstellung beabsichtigt, die aus den Messungen gewonnenen Modellgleichungen mit den etablierten theoretischen Vorstellungen zum Schweißlichtbogen abzugleichen, um dann die entsprechenden Schlussfolgerungen für die Aufgabenstellung des A1-Projektes zu ziehen. Bereits in der Anfangsphase der Projektbearbeitung eröffneten sich zwei Problembereiche in einer Schärfe, mit der in der Antragsbearbeitungsphase nicht zu rechnen war:

- a. Die differenzierten Auswertungen der Messergebnisse am IIM zeigten, dass im Lichtbogensystem eine Reihe neuer Effekte identifiziert werden konnte, für die es im Rahmen der etablierten Schweißlichtbogentheorie keine Erklärungen gab.
- b. Eine tiefgreifende Analyse verschiedenster theoretischer Denkansätze der Schweißlichtbogentheorie – mit der das IIM seine Arbeiten über den ganzen Bearbeitungszeitraum begleiten musste – zeigte zu unserer Überraschung, dass sich die Schweißlichtbogenforschung noch weit entfernt von einem in sich geschlossenen und widerspruchsfreien System von Gesamtvorstellungen befindet.
- c. Zum Verständnis der neu aufgefundenen Effekte und ihrer entsprechenden Einordnung in das Gesamtgefüge des plasmaphysikalischen Wissens, der Theorie der Kathodenoberflächenphysik und der Vorstellungen zum Schweißlichtbogen, erwiesen sich auch regelmäßige Kontakte mit entsprechenden physikalischen Forschungseinrichtungen als notwendig.

4) Entsprechend der in 3) skizzierten Problemlage erwuchs während des Bearbeitungszeitraums seitens der experimentell tätigen Forschungsstellen aber insbesondere auch seitens der Stromquellenhersteller des PbA an das IIM eine Erwartungshaltung in Bezug auf die Erarbeitung einer relativ geschlossenen, widerspruchsfreien Gesamtsicht auf den Schweißlichtbogenprozess, die als Richtschnur für die zukünftige Praxis dienen könnte.

Entsprechend der in 4) beschriebenen Erwartungshaltung entschloss sich das IIM, die Berichterstattung für die 3 bearbeiteten Schweißlichtbogen-clusterprojekte in einer Form anzustreben, die sich durch Ergebnisorientiertheit

auszeichnet und darauf gerichtet ist, eine im Rahmen der Arbeiten des Forschungsclusters erarbeitete Schweißlichtbogen-Gesamtvorstellung zu präsentieren, an der sich sowohl der Stromquellenentwickler als auch der Schweißingenieur in seiner täglichen Arbeit orientieren kann:

- Die Ergebnisse der Schmelzbadbeeinflussung mit ihren metallurgischen Implikationen wurden im Arbeitsbericht der Forschungsstelle 1 umfassend dargestellt.
- Die Arbeitsschritte, Methodik, mathematische Rahmenstrukturen und die Anwendungsergebnisse des IIM im Rahmen der explorativen Datenanalyse und inversen Modellbildung wurden bereits in Veröffentlichungen ausführlich beschrieben:

- a) Zwei gedruckte Zwischenberichte Lichtbogenschweißen – „Physik und Werkzeug“ (als Dateien auch als Download verfügbar, teilL2_a1.iim.pdf, a1.datenanalyse_5-10-2009.pdf)
- b) Vortragsfolien des Workshops „Workshop Datenanalyse schweißtechnischer Signale“
- c) DVS Berichte 275 (Hamburger Tagung 2011) (alle Berichte sind über die Internetseite des IIM erhältlich, die für die Arbeit dieses Forschungsclusters eingerichtet wurde: www.inverse-modellierung.de)

- Der erste Teil dieser vom IIM angestrebten Schweißlichtbogen-Gesamtvorstellung wurde im Rahmen des A4-Berichtes (Vorhaben IGF 15.872 BG) vorgestellt. Dieser erste Teil bildet auch das Fundament für diesen Bericht und enthält die systematischen Darstellungen der folgenden Punkte:
 - Physikalisch und prozesstechnisch anschauliche Darstellungen der Auswertungen der Messergebnisse.
 - Physikalische und regeltechnische Bedeutung der Messgrößen und aus ihnen abgeleitete Prozess-Zustandsgrößen
 - Modellbildung und Bedeutung der Modellparameter
 - Abstandsregelungskonzept (äußere Regelung)
 - Erweitertes Stabilitätskonzept (innere Regelung)

Der A1-Bericht des IIM (IGF 15.870 BG) konzentriert sich – der Aufgabenstellung entsprechend – auf die Analyse der energetischen Aspekte des Schweißlichtbogens. Vordergründig wird ein neues Konzept für die Energieverteilungsverhältnisse der eingespeisten Leistung auf Lichtbogensäule, Werkstück (Kathode) und Zusatzwerkstoff (Anode) vorgestellt. Dieser Bericht kann somit auch als Teil 2 der vom IIM angestrebten Schweißlichtbogen-Gesamtvorstellung angesehen werden.

Aufgrund der bereits thematisierten Vielfältigkeit und Widersprüchlichkeit der existierenden Vorstellungen zum Schweißlichtbogen, kam das IIM nicht umhin, die systematische Darstellung der im Schweißlichtbogen gewonnenen neuen Erkenntnisse mit entsprechender Würdigung und kritischer Auseinandersetzung mit alternativen Vorstellungen zu begleiten.

Das Ziel des Forschungsvorhabens IGF 15.870 BG bestand darin, in Zusammenarbeit zwischen der Füge und Beschichtungstechnik der TU Berlin und dem IIM – in Ergänzung zu den existierenden, klassischen Regelungskonzepten der Impulslichtbogenprozesse – Prozessführungen zu untersuchen, die das Potential haben, die Erstarrungsbedingungen der Schmelze positiv zu beeinflussen:

- Modulierter Wärmeeintrag
- Starke räumliche Konzentration des Lichtbogenansatzes an der Schmelze (Kathodenspot) und die Ausnutzung der durch die hohen Temperaturgradienten bedingten starken Marangonikonvektion zur Intensivierung der Durchmischung des Schmelzbades
- Durchmischung des Schmelzbades durch resonanzbedingte Intensivierung der Schmelzbadoberflächenwellenbewegung
- Räumliche Variation des Lichtbogen-Brenngebietes auf dem Schmelzbad und der dadurch bedingten Richtungsänderung der Strömungen im Schmelzbad

Hinsichtlich der Ergebnisse des IIM im A1-Projekt kann eine Zweiteilung vorgenommen werden:

- Theoretische plasmaphysikalische und datenanalytische Vorarbeiten
- Technologische relevante Untersuchungsergebnisse

In Bezug auf die datenanalytischen und physikalisch theoretischen Aufgabenstellungen des A1-Projektes sind die folgenden Ergebnisse hervorzuheben:

1. Etablierung eines Auswertungsstandards für schweißtechnische Signale.
 - Zusammenführung der Zeitreiheninformation der elektrischen Signale mit den Bildinformationen der HGA-Kameraaufnahmen.
 - Entwicklung geeigneter Entfaltungstechniken für die Messsignale.
 - Selektion der Darstellungsform, die am prägnantesten die physikalisch-technologischen Verhältnisse widerspiegeln.
 - Entwicklung verschiedener Methoden der Ereignisdetektion.

2. Entwicklung robuster und praxistauglicher Modellansätze mit den physikalisch relevanten Systemparametern mit regeltechnischer und energetischer Relevanz.
3. Entwicklung eines neuen Energieverteilungsmodells, dass die realen Verhältnisse – wie sie über die Messungen widerspiegelt werden – praxisnäher darstellt und eine enge Beziehung zu den regelungsrelevanten Aspekten herstellt.

In Bezug auf die technologische Aufgabenstellung des A1-Projektes, die darin bestand, herauszufinden, welche Beeinflussungen des Schweißlichtbogensystems geeignet sein könnten, metallurgisch relevante Effekte hervorzurufen, kam das IIM summarisch zu folgenden Ergebnissen:

1. Ein pulsmodulierter Wärmeeintrag in das Schmelzbad lässt sich über entsprechende modulierte elektrische Signale realisieren, wobei der Lichtbogen praktisch trägheitslos die eingespeiste Stromform als entsprechende Leistungseinspeisung (die sich als direkt proportional zum Strom erweist) ohne Phasenverschiebung und Signaldeformation in das Schmelzbad überführt.
2. Da der Hauptenergieeintrag in die Werkstück-Kathode über die verschwindend dünne Kathodenrandschicht erfolgt, spielen die Besonderheiten der Lichtbogensäulenstruktur nur eine sekundäre Rolle, so dass sogar die Störung der Lichtbogensäule durch den fallenden Tropfen – auch im Fall einer pulsmodulierten Prozessführung – nur einen verschwindend geringen Einfluss auf die Energieeinspeisung in das Schmelzbad hat.
3. Im Rahmen einer allgemeinen Energieverteilungsanalyse konnte gezeigt werden:
 - Für besonders kurze Lichtbögen, ist der Wirkungsgrad des Schweißlichtbogenprozesses am höchsten. Für die Lösung des sich in diesem Fall verschärfenden Abstandsregelungsproblems wurde ein Lösungsansatz vorgestellt.
 - Die Energieverteilungsverhältnisse auf Kathode (Werkstück) und Anode (Zusatzwerkstoffelektrode) können über relativ einfache Beziehungen bestimmt werden.
 - Der Energieeintrag in die Werkstück-Kathode hängt nicht nur vom Stromstärkewert sondern auch von den Schutzgaseigenschaften (effektives Ionisationspotenzial) und vom Werkstückmaterial (Austrittsarbeit) ab.
4. Speziell mit aufgeweiteten Lichtbögen (Molekülgaszusätze) lässt sich eine spezifische Form des Energieeintrags in das Schmelzbad realisieren (zwei Einspeisungsgebiete: punktförmiges Zentrum und konzentrischer Kreis), die ein besonderes Strömungsmuster im Schmelzbad erzwingt und damit auch die damit verbundenen Erstarrungsverhältnisse beeinflussen kann.
5. Eine starke Durchmischung des Schmelzbades lässt sich für Impulslichtbogenprozesse weniger durch eine Pulsmodulation über den Lichtbogen erzielen, als vielmehr durch Herstellung einer Resonanz zwischen Tropfenabwurf (Strom-Impulsperiode) und der Eigenschwingung des Schmelzbades. Unter dieser Resonanzbedingung kann sich die Amplitude der Schmelzbadschwingungen sehr stark aufschwingen, und damit die Strömungen im Schmelzbad erheblich

beeinflussen. Über die elektrischen Signale kann der Schwingungszustand des Schmelzbades sehr gut erkannt werden, woraus sich die Möglichkeit für die Schweißmaschinenregelung ableitet, durch gezielte Herbeiführung dieser Resonanz die Erstarrungsverhältnisse zu beeinflussen, in dem die Regelung ein vorgegebenes Schmelzbad-Schwingungsniveau gezielt aufrechterhält.

6. Es konnte gezeigt werden, dass eine zusätzliche Pulsmodulation des klassischen Impulslichtbogenschweißprozesses eine Reihe von neuen Effekten in der Wechselwirkung des fallenden Metalltropfens mit dem Metaldampfkern des Lichtbogens hervorruft und sich somit Möglichkeiten für eine differenzierte Beeinflussung des Schmelzbades eröffnen – sowohl hinsichtlich des Energieeintrages durch den Lichtbogen, als auch durch die Tropfenfallrichtung und die Position des Tropfeneinschlaggebietes im Schmelzbad (teil2_a1_iim.pdf, www.inverse-modellierung.de).

7. Es konnten die Zusammenhänge aufgeklärt werden, die es ermöglichen, aus der Analyse der elektrischen Signale heraus zu erkennen, ob sich der Lichtbogenansatz im Spot- oder Diffusmodus befindet. Gleichzeitig konnten erste energetische Schlussfolgerungen in Bezug auf den Lichtbogenansatz-Modus gewonnen werden.

Das IGF-Vorhaben 15780 BG (P 798) "Einsatz geregelt gepulster Lichtbögen zur Beeinflussung der Schmelzbaderstarrung bei Lichtbogenfügeprozessen" der FOSTA - Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V., Sohnstr. 65, 40237 Düsseldorf wurde über die Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen Otto von Guericke e.V. (AiF) im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung und -entwicklung (IGF) vom Bundesministeriums Wirtschaft und Technologie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Mitglieder der FOSTA sind führende Stahlhersteller, Stahl verarbeitende Unternehmen und Forschungsinstitute. Zu den Mitgliedern gehören Arcelor Mittal Bremen GmbH, Arcelor Mittal Eisenhüttenstadt GmbH, ArcelorMittal Steel Germany GmbH, Deutsche Edelstahlwerke GmbH, Edelstahl Vereinigung, Georgsmarienhütte GmbH, Salzgitter AG Stahl und Technologie, Saarstahl AG, Stahlwerk Thüringen GmbH, ThyssenKrupp Nirosta GmbH, ThyssenKrupp Steel Europe AG, V & M DEUTSCHLAND GmbH, voestalpine Stahl GmbH, Benteler AG, Daimler AG, Volkswagen AG u.a.

URL for press release: <http://www.inverse-modellierung.de>