# MÖGLICHKEITEN UND GRENZEN DER DETEKTION VON BINDEFEHLERN DURCH INPROZESS-ÜBERWACHUNG BEIM LASER-SCHWEIßEN

Michael Kuhl Fraunhofer Institut Werkzeugmaschinen und Umformtechnik, Reichenhainer Str. 88, 09126 Chemnitz, Paul-Michael Mickel Volkswagen Sachsen GmbH, Glauchauer Str. 40, 08058 Zwickau

Laserschweißen gewinnt aufgrund verschiedenster Vorteile, wie hoher Schweißgeschwindigkeit oder geringem Wärmeeintrag immer größere Bedeutung. Insbesondere im Fahrzeugbau ist dabei die Einhaltung der Anforderungen an Festigkeit und Qualität der Schweißnähte von immenser Bedeutung. Bei der Verwendung verzinkter Bleche, wie im Karosseriebau üblich, können jedoch durch die notwendigen Entgasungsspalte zwischen den Fügepartnern Probleme entstehen. So bilden sich bei zu großen Spaltmaßen Bindefehler aus, welche von außen nicht zu erkennen sind. Am Markt erhältliche Prozessüberwachungssysteme detektieren die Fehler oft nicht mit ausreichender Sicherheit. Die VW Sachsen GmbH und das Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umformtechnik untersuchten im Rahmen des Verbundforschungsprojektes MAINE X die Gründe für die Unzulänglichkeiten herkömmlicher Systeme. Die Ergebnisse und Empfehlungen für suffiziente Detektionsmethoden werden in diesem Artikel vorgestellt.

#### Problemstellung

Ein ganz offensichtliches Problem bei der Inprozess-Qualitätsüberwachung von Laserschweißnähten stellt der Fakt dar. dass obwohl verschiedene Techniken relativ "saubere" Signale liefern, sich einige Fehler nicht signifikant genug in den Signalen widerspiegeln. Trotz dessen die Signale Abhängigkeiten von verschiedenen Prozessparametern beinhalten und sich die Signal-Rausch-Abstände technisch ausreichend gut darstellen, sind Fehler wie unzureichende Anbindungen und der "Falsche Freund" nur schlecht detektierbar. Dieses Problem muss eine konkrete Ursache haben. Allgemein geht man bei der Entstehung des "Falschen Freundes" davon aus, dass das aufgeschmolzene Material aus Ober- und Unterblech sich aufgrund zu großer Spaltmaße nicht verbinden kann und separiert bleibt. Darauf basierend könnte davon ausgegangen werden, dass die reflektierte Laserleistung abrupt sinkt, sobald ein Falscher Freund auftritt, da ein Teil der Mehrfachreflexionen aus dem unteren Blech sich im nun offenen Spalt verlieren und nicht mehr dem im Schweißkopf detektierten Rückreflexsignal zur Verfügung stehen. Gleiches gilt für die Beobachtung des Metalldampfes über Koaxial installierte Photodioden im Schweißkopf. Findet ein abrupter Übergang von einer hinreichend guten Schweißung mit beidseitiger Anbindung zum Falschen Freund statt, so sollte der im unteren Keyhole-Bereich entstehende Metalldampf einen kleineren Anteil zur Dampffackel über der Schweißnaht und damit zur Ausbildung des Signals hinsichtlich elektromagnetischer Emissionen sowohl im sichtbaren wie auch infraroten Bereich bieten. Das Signal müsste also ebenso abrupt fallen. Aufgrund dessen sollte sich der Vorgang in den Inprozess-Signalen hinreichend gut detektieren lassen. Tendenziell ist dieses Verhalten sichtbar, jedoch nicht in der erwarteten Ausprägung in Korrelation mit dem Schweißergebnis. Vielmehr findet eine deutliche Signaländerung noch in einem Technologiefenster statt, in welchem i.d.R. gute Schweißergebnisse zu erhalten sind. Wichtig erscheint hier also die Betrachtung der Ausbildung der Inprozess-Signale über eine Änderung das Entgasungsspaltmaßes als wichtigste Einflussgröße für die Entstehung des Fehlers (siehe Abbildung 1). Deutliche Signalveränderungen sind hier bereits im Bereich ab 0,25mm zu erkennen, einem Bereich, in welchem in der Regel noch iO-Schweißungen vorherrschen.



Abbildung 1: Mittelwert der Inprozess-Signale versus Spaltmaß

#### Vorgehen und Prozessbetrachtung

Da die meisten Inprozess-Sensoren auf den direkten Bereich um das Keyhole fokussieren und nur kamerabasierte Systeme auch das Schmelzbad in weiterer Entfernung vom Keyhole beobachten, liegt die Annahme nah, dass im Bereich des Keyhole Vorgänge stattfinden, welche das Signal negativ beeinträchtigen. Eine zweite Möglichkeit besteht darin, dass die Lokalisierung der Überwachungsverfahren auf das Keyhole selbst das Problem beinhaltet.

Allgemein wird davon ausgegangen, dass das Keyhole bei einer regulären Durchschweißung eine vom Oberblech zum Unterblech durchgehende, von Schmelze umgebene Dampfkapillare mit einer mehr oder weniger starken Krümmung darstellt [1].

Da die bestimmenden Geometrien wie Schmelzenausdehnung, Spaltmaß oder Keyhole-Abmessungen als groß gegenüber den Verhältnissen in möglichen Schmelzen- und Gasverwirbelungen sein müssten, ist anzunehmen, dass diese keine dominante Rolle spielen. In koaxial zum Laser aufgenommenen Videosequenzen sind entsprechend die erwarteten relativ ruhigen, "makroskopischen" Verhältnisse des Keyholes und der umgebenden Schmelze zu beobachten.

Nimmt man daher an, dass diese Vorgänge direkt am Keyhole das Ergebnis von Messungen bezüglich einer Detektion von Bindefehler nicht wesentlich beeinflussen, bleibt die Hypothese, dass die lokale Einengung der Betrachtung das Problem nach sich zieht. Diese These unterstützend wirkt, dass allgemein in der Literatur beschriebene Untersuchungen zur Schmelzbadlänge erfolgreich bezüglich der Detektion von Fehlern erscheinen, zum Beispiel im Falle des "Coaxial Process Control" - Systems des Fraunhofer ILT [2, 3].

Die These lässt sich physikalisch-logisch entsprechend leicht nachvollziehen. Die Bildung des Falschen Freundes oder im Umkehrschluss die Verbindung der Ober- und Unterschmelze findet nicht lokal begrenzt am Keyhole statt.

Legt man die in Abbildung 2 dargestellt wirkenden Kräfte als ersten Ansatz zur Schmelzenformung zugrunde und berücksichtigt weiterhin, dass die Schmelze trotz hoher Dynamiken im unmittelbaren Keyhole-Bereich träge reagieren muss, dann kann man davon ausgehen, dass die Schmelze eine endliche Zeit benötigt, um aus dem Blechbereich in den Spaltbereich zu fließen (Abbildung 3).

Die notwendige Zeitdauer bis zum Zusammenfluss muss zumindest eine Funktion der Viskosität, der Oberflächenspannung, der Kapillar- und Kohäsionskräfte, der wirkenden Gewichtskräfte sowie der Strömungsverhältnisse in der Schmelze und weiteren Randbedingungen wie Blechdicke, Spaltmaß und Schweißgeschwindigkeit sein.

Bei entsprechenden Größenordnungen der genannten Einflussgrößen und dem Wissen, dass weder der Laser noch weitere äußere Kräfte, wie z.B. der Crossjet, einen wesentlichen aktiven Beitrag zum "Schmelzenausblasen" bilden können, ist anzunehmen, dass die Ober- und Unterschmelze erst an einer prozessabhängigen Position

 $x_{confluence} = x_{Laserfocus} - \Delta x (f Param_{Process})$  hinter dem Keyhole zusammenfließen werden.

Ab einem gewissen Spaltmaß, welches noch unter dem liegt, welches zu einem finalen, nicht reversiblen "Falschen Freund" führt, herrscht bereits der Zustand "Falscher Freund" in diesem Gebiet vor. Die Detektion des Falschen Freundes in unmittelbarer Nähe des Keyholes ist in diesem Sinne nicht möglich, solange die Position des Schmelzenzusammenflusses außerhalb des Erfassungsbereiches der Sensorik liegt. Es wird entsprechend bei einer Signalaufnahme am Keyhole das Signal "Falscher Freund" detektiert, obwohl die Schmelzen erst später zusammenfließen.

Obwohl Simulationsrechnungen noch ausstehen, war ein experimenteller Nachweis des Phänomens möglich. Dazu wurden Schweißungen mit kontinuierlich größer werdenden Spaltmaß im Randbereich von Probeblechen vorgenommen und diese seitlich unter Verwendung von Zusatzbeleuchtungen mit Hilfe einer CMOS-Kamera aufgezeichnet. Den verwendeten Versuchsaufbau zeigt Abbildung 4. Die zusätzliche Beleuchtung wurde zum einen seitlich mit der Kamera und zum anderen in weiteren Versuchen von unten nach oben geführt.



Abbildung 2: Als dominierend einzuschätzende Kräfte im Bereich des Keyholes und der Schmelze



**Abbildung 3:** Prinzipielle gemittelte Bewegung eines Volumenelementes in der Schmelze über der Zeit ohne Berücksichtigung von Turbulenzen



**Abbildung 4:** Experimentalaufbau zur Beobachtung der Vorgänge im Entgasungsspalt während des Schweißvorganges;

A = Kamerasystem, B = Beleuchtungslaser, C = Crossjet, D = Probenbleche,

E = Spanner, F = Laserschweißkopf

(ZStE 340 Z100 1,5mm auf ZStE 340 Z100 1,5mm,  $V_{schwei\beta}$  = 40 mm/s,  $P_{Laser}$  = 4kW,

Entgasungsspalt: 0mm ... 1mm in Schweißrichtung steigend bzw. fallend



Abbildung 5: Interpretation der seitlich aufgenommenen Videos, von unten beleuchtet A = Oberes Blech, B = Schmelze, C = Unteres Blech, D = "Poren" in der noch flüssigen Schmelze, E = Schmelzenzusammenfluss, F = Keyhole-Eintritt und Austritt, G = Metalldampf

Der Beleuchtungslaser hat dabei eine Wellenlänge von  $\lambda = 808$ nm, der Kamera wurde ein Passfilter mit einer adäquater Mittenfrequenz vorgeschaltet. Der Spalt zwischen den Blechen vergrößerte sich in den Versuchen von a = 0 mm auf rund 1 mm, der Schweißvorgang wurde sowohl mit steigender, wie auch fallender Spaltrichtung gefahren. Die Schweißung erfolgte ca. 5mm vom Probenrand entfernt an einer Zweiblechverbindung ZStE 340 Z100MB -Stahl in Überlapp-I-Naht.

In den Videosequenzen ist deutlich zu erkennen, dass sich die Schmelzen mit zunehmendem Spalt immer später und damit örtlich immer weiter hinter dem Keyhole vereinen. Auszüge aus den Sequenzen mit entsprechenden Markierungen zeigt Abbildung 6, die Interpretation der Gebiete ist in Abbildung 5 dargestellt.

Während in Abbildung 6a) mit rd. 0,2mm Spalt noch keine Trennung der Schmelze aus Ober- und Unterblech zu erkennen ist, ist in Abbildung 6b) bei einem Spalt von rd. 0,4mm deutlich der Zusammenfluss der Schmelzen rd. 1,3mm hinter dem Keyhole zu erkennen. In Abbildung 6c) treten sporadische Einbrüche der Schmelze auf, was zu Poren bzw. Löchern in beiden Blechen führt. In Abbildung 6d) sind dann letztendlich die Schmelzen der beiden Fügepartner vollständig getrennt, ein "Falscher Freund" ist entstanden. Eine Gegenüberstellung der Inprozess-Signale zum Spaltmaß und dem Fehlerbild ist in Abbildung 7 gegeben. Ähnliche Aufnahmen wurden auch bei abnehmendem Spalt aufgezeichnet. Hier sind die Zuordnungen zwischen Spaltmaß und Länge des "Falschen Freundes" insofern verändert, als dass der Fehler bereits bei 1mm Spaltmaß auftritt und erst verschwindet, wenn die Schmelzen nahe genug aneinander kommen, um durch Schmelzenbewegung (i.e. Auswürfe, Spritzer, Wellenbewegungen) eine Verbindung über die Kohäsionskräfte aufzubauen.

Inprozess-Diagnosesysteme, welche sich ausschließlich auf den unmittelbaren Bereich um das



**Abbildung 6:** Auszüge aus den Videosequenzen der Probe 2844 mit steigendem Spalt geschweißt, von unten beleuchtet

a) a = 0,2mm, das Keyhole ist noch von Schmelze umschlossen

b) a = 0,4mm, der Schmelzenzusammenfluss liegt rd. 1,3mm hinter dem Keyhole

c) a = 0,6mm, die Schmelze bricht zusammen, Poren bzw. Löcher entstehen im Ober- und Unterblech d) a = 0,8mm, die Schmelze aus Ober- und Unterblech sind getrennt, ein "Falscher Freund" ist entstanden

(Probe 2844; ZStE340-Z100 1,5mm;  $P_{Laser}$ =4kW;  $v_{Schwei\beta}$ =40mm/s)

Keyhole beschränken, können mithin kaum allein in der Lage sein, Fehler wie den "Falschen Freund" zu detektieren. Auf das Keyhole ausgerichtete koaxiale Photodioden und Kamerasysteme, welche ausschließlich die Keyhole-Geometrie vermessen, sind für diese Fehler ohne Unterstützung durch weitere Sensorik blind.

### Ableitungen und Handlungsempfehlungen

Um Bindefehler, wie den "Falschen Freund", sicher im Prozess zu detektieren, ist es notwendig die Bereiche hinter dem Keyhole zu beobachten. Am aussichtsreichsten stellt sich dabei die Beobachtung der Schmelzbadschleppe dar. Der Bereich hinter dem Keyhole kann durch koaxiale Kameras, wie sie heute bereits üblich sind in einem ausreichenden Maße mit beobachtet werden. Ist man in der Lage, durch entsprechende Video- und Bildverarbeitungsalgorithmen die flüssige Schmelze von den bereits erstarrten Zonen zu trennen, dann kann über die Korrelation der Länge der Schmelzbadschleppe mit der stattfindenden Wärmeableitung eine Vorhersage über Bindefehler getroffen werden.

Adäquat ließe sich ersatzweise die Temperatur bzw. Temperaturverteilung hinter dem Keyhole auswerten, jedoch erscheinen die geräte- und softwaretechnischen Anforderungen gegenüber einer kamerabasierten Variante erheblich größer.

Da die Länge ganz wesentlich auch von weiteren Parametern, wie Blechdicken oder eingebrachte Laserleistung ist, ist eine vergleichende Klassifizierung angebracht. Verfahren zur Vermessung der Schmelzbadschleppe werden bereits von verschiedenen Herstellern angeboten [4-9]. Zusammen mit universellen Klassifikations-Verfahren zur multivariaten Datenanalyse, wie beispielsweise der Fuzzy-Pattern-Recognition oder Diskriminanzanalyse, erscheinen wesentliche Verbesserungen der Fehlerdetektion in Laserschweißnähten gegenüber herkömmlichen Verfahren möglich.

Die in enger Zusammenarbeit zwischen dem Fraunhofer Institut für Werkzeugmaschinen und Umform-

technik und der Volkswagen Sachsen GmbH entwickelten Methoden bilden dabei – aufbauend auf handelüblichen Basissystemen der Prozessüberwachung – beispielhaft die Grundlage für weitergehende Entwicklungen und industrielle Umsetzungen.

# Danksagung

Die Autoren bedanken sich für die finanzielle Unterstützung durch die Sächsische Aufbaubank.

# Literatur

[1] Bey95: Beyer, E.: "Schweißen mit Laser: Grundlagen"; Springer Verlag Berlin Heidelberg 1995; 3-540-52674-9

[2] Abe07: Abels, P;. Kaierle, S.; Poprawe, R.: "Der Falsche Freund", Fraunhofer ILT Jahresbericht 2007, Fraunhofer Institut für Lasertechnik, Aachen 2007

[3] Kog08: Kogel-Hollacher, M.: "Experience with remote laser welding using detectors directly located at the processing head - how reliable is the quality information", Proceedings of the European Automotive Laser Application Conference 2008

[4] Bec06: M.Becker (Prometec) "Camerabased Process Monitoring", *Workshop In-line Qualitätssicherung beim Laserstrahlfügen,* Handout pp. 40-54, March 2006

[5] Die06 R.Dierken et.al.(ERLAS) " ERWIN sieht fast alles", Workshop In-line Qualitätssicherung beim Laserstrahlfügen, Handout pp. 55-68, March 2006
[6] PROMETEC PD2000 "Kontinuierliche messendes Überwachungssystem zur Qualitätskontrolle und Prozesssicherheit bei Laserbearbeitungsprozessen Prozessüberwachungssystem Welding Monitor PD 2000"; http://www.prometec.com/

[7] Precitec "Laser Welding Monitor LWM", www.precitec.de

[8] Soudronic Automotive AG, "Souvis 5000", www.soudronic.com

[9] Plasmo Industrietechnik GmbH, "Process Observer", www.plasmo.eu



**Abbildung 7:** Gegenüberstellung Spaltverlauf [mm], In-Prozesssignale [AU] und Nachlauf der Schmelzenverbindung hinter dem Keyhole [mm] bei einer Probe mit <u>steigendem</u> Entgasungsspalt R-F = Emissionen Laserrückreflex ( $\lambda$ =1064nm), Schmelzennachlauf in [mm], Spalt = Entgasungsspalt in [mm]

(Probe 2838; ZStE340-Z100 1,5mm; P<sub>Laser</sub>=4kW; v<sub>Schweiß</sub>=40mm/s)