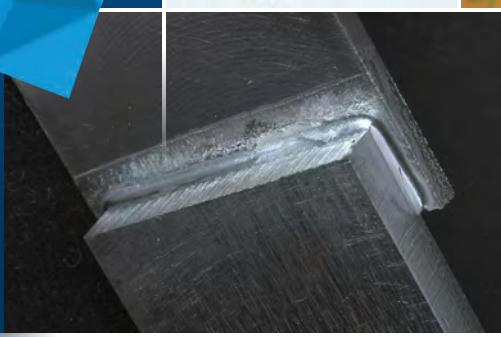
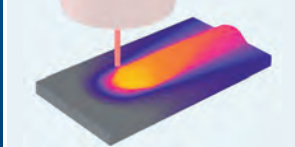
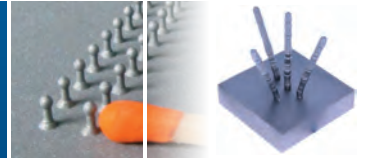
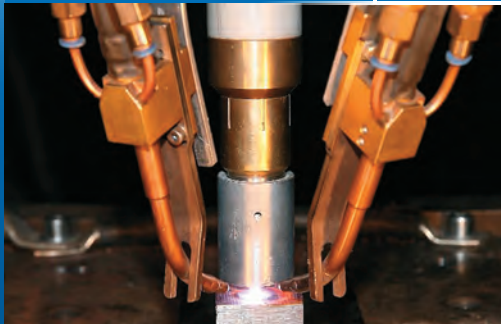


I M B L I C K P U N K T

ISSN 1614-8185



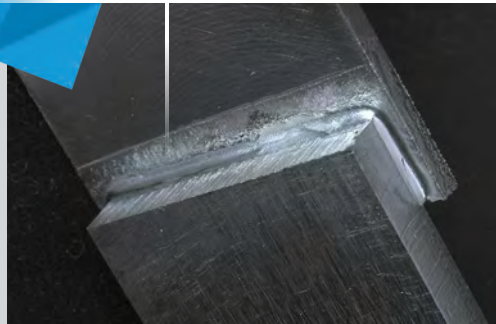
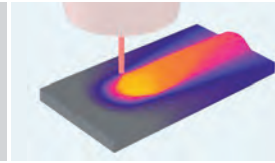
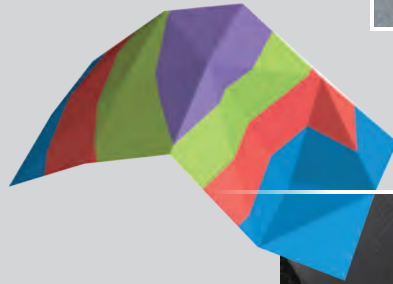
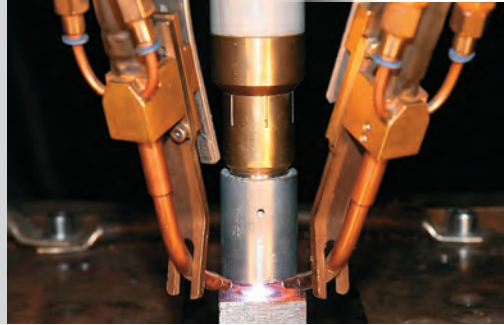
DEUTSCHLANDS elite-INSTITUTE

**ISF**  
WELDING AND JOINING INSTITUTE

**RWTHAACHEN**  
UNIVERSITY

HERAUSGEGEBEN VOM INSTITUT FÜR WISSENSCHAFTLICHE VERÖFFENTLICHUNGEN UND DER ALPHA INFORMATIONSGESELLSCHAFT MBH





**ISF**  
WELDING AND JOINING INSTITUTE

**RWTHAACHEN**  
UNIVERSITY

**„ES KOMMT NICHT DARAUFG AN,  
MIT DEM KOPF  
DURCH DIE WAND ZU RENNEN,  
SONDERN  
MIT DEN AUGEN  
DIE TÜR ZU FINDEN.“**

Werner von Siemens

## IMPRESSUM

**ISSN:** 1614-8185

**Schutzgebühr:** 5.00 Euro

**Herausgeber:**



Institut für Wissenschaftliche  
Veröffentlichungen

in Zusammenarbeit mit  
ALPHA Informationsgesellschaft mbH

**Redaktionelle Zusammenarbeit:**



Institut für Schweißtechnik  
und Fügetechnik (ISF)  
an der RWTH Aachen University  
ISF – Welding and Joining,  
RWTH Aachen University  
Pontstraße 49  
52062 Aachen

Tel.: +49(0)241 80-96253  
Fax: +49(0)241 80-92170  
E-Mail: [olschok@isf.rwth-aachen.de](mailto:olschok@isf.rwth-aachen.de)  
[www.isf.rwth-aachen.de](http://www.isf.rwth-aachen.de)

**Bildnachweis:**

Quelle durch ISF Aachen

Lampertheim, März 2018

© ALPHA Informationsgesellschaft mbH und die Autoren für Ihre Beiträge

**Anzeigenverwaltung/Gesamtherstellung:**

ALPHA Informationsgesellschaft mbH  
Finkenstraße 10, 68623 Lampertheim  
Tel.: +49(0)6206 939-0  
Fax: +49(0)6206 939-232  
[info@alphapublic.de](mailto:info@alphapublic.de)  
[www.alphapublic.de](http://www.alphapublic.de)

**Vertriebs- und Marketingleitung:**

Arjeta Krasnici

Die Informationen in diesem Magazin sind sorgfältig geprüft worden, dennoch kann keine Garantie übernommen werden. Eine Haftung für Personen-, Sach- und Vermögensschäden ist ausgeschlossen.

Dieses Werk ist urheberrechtlich geschützt. Die dadurch begründeten Rechte, insbesondere die des Nachdrucks, des Vortrags, der Mikroverfilmung oder der Vervielfältigung auf anderen Wegen und der Speicherung in Datenverarbeitungsanlagen, bleiben, auch bei nur auszugsweiser Verwendung, vorbehalten. Eine Vervielfältigung des Werkes oder von Teilen des Werkes ist auch im Einzelfall nur in den Grenzen der gesetzlichen Bestimmungen des Urheberrechts der Bundesrepublik Deutschland vom 9. September 1965 in der jeweils gültigen Fassung zulässig. Sie ist grundsätzlich vergütungspflichtig. Zuwiderhandlungen unterliegen den Strafbestimmungen des Urheberrechts.

Bildrechte beim Verlag erfragen.

Projekt-Nr. 76-052

# VORWORT



*Univ.-Prof. Dr.-Ing. U. Reisgen, Institutsleiter*

## Seit mehr als 60 Jahren wird an der RWTH Aachen University auf dem Gebiet der Schweißtechnik und Fügetechnik gelehrt und geforscht.

Diese lange Tradition und das erfolgreiche Wirken über sechs Jahrzehnte, machen das ISF heute zu einem der renommiertesten fügetechnischen Institute in der Welt.

Es freut uns, die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ISF, deshalb auch besonders ihnen in der Schriftenreihe „Deutschlands Eliteinstitute“ aktuelle Themen und Forschungsergebnisse präsentieren zu dürfen.

Das ISF ist heute fest verankert in der Welt der Wissenschaft und ein wichtiger Partner für Industrie und Handwerk. Über die vergangenen 60 Jahre wurde durch die Professoren Krekeler und Henning (bis 1965) sowie Herrn Professor Eichhorn bis 1989 ein solides Fundament geschaffen und die weltweite Anerkennung des Institutes aufgebaut. Die Position des ISF in der Schweißtechnik wurde durch Professor Dilthey

bis zum Jahr 2007 weiter gefestigt und die Arbeitsgebiete um neue Technologien wie das Laserstrahlschweißen und die numerische Simulation von Schweißverfahren erweitert, so dass das ISF heute zu den größten und erfolgreichsten Instituten der RWTH Aachen University zählt.

Seit nunmehr 10 Jahren arbeiten die Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des ISF unter meiner Leitung. Wir sind sehr

stolz, diesen erfolgreichen Weg fortsetzen zu dürfen und haben in dieser Zeit durch eine ganze Reihe von fügetechnischen Innovationen gezeigt, dass wir dem hohen Anspruch eines Eliteinstitutes gerecht werden können. Stolz dürfen auch all diejenigen sein, die zu den über 200 Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern gehören, die bisher am ISF ihre Promotion absolviert haben und heute in Wissenschaft und Wirtschaft aktiv sind, denn Sie haben den Grundstein für das hohe Ansehen des ISF gelegt.

Das ISF steht heute nicht nur im Fokus des Interesses der Industrie, sondern auch der Studierenden, auf die wir hier in Aachen ein besonderes Augenmerk haben. Denn die vielbesagte Exzellenz kommt nicht von allein. Es ist unser aller Aufgabe, junge Menschen zu hervorragenden Ingenieurinnen und Ingenieuren

und ausgezeichneten Wissenschaftlerinnen und Wissenschaftlern heranzuziehen, die den exzellenten Ruf unserer Hochschule in der Welt rechtfertigen.

Das durch die ehemaligen Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter, die Absolventen der Hochschule und unsere Freunde in Industrie und Wissenschaft geschaffene Netzwerk der Fügetechnik, das sich im Freundeskreis des ISF mit seinen 140 Mitgliedern widerspiegelt, ist für ein Hochschulinstitut von unschätzbarem Wert. Dies zeigen auch die zahlreichen durch unsere Freunde und Partner finanzierten Werbeseiten in diesem Heft, die diese Broschüre möglich gemacht haben.

Die hier veröffentlichten Artikel stellen jedoch nur einen Auszug der Arbeitsgebiete des ISF dar. Das ISF erhebt heute, gestützt durch seine engen

Kooperationen mit nationalen und internationalen Institutionen, den Anspruch, das größte unabhängige fügetechnische Institut in Europa zu sein und dabei fast die gesamte Palette der Schweiß-, Kleb- und Löttechnik fachlich kompetent abdecken zu können.

Mit anderen Worten gesprochen, versuchen wir unserem selbstgesetzten Motto „wir fügen alles“ gerecht zu werden. Es würde mich sehr freuen, wenn diese Broschüre Ihr Interesse an den Forschungsarbeiten im ISF wecken kann und wir auch Sie irgendwann davon überzeugen dürfen, auf welchem hohem Niveau hier in Aachen gearbeitet wird. Gerne lassen wir uns von Ihnen zu weiteren Spitzenleistungen anspornen.

Herzlichst  
Ihr Uwe Reisgen

# Global Beam Technologies AG

## Die Spezialisten für Anwendungen mit dem Elektronenstrahl (EB = Electron Beam)

Innerhalb der **Global Beam Technologies AG** haben sich 2005 die EB-Spezialisten von **Steigerwald Strahltechnik** und der PTR-Gruppe verbunden und stehen nun gemeinsam für hochwertige, sichere und langlebige Schweißverbindungen.

Die **PTR Strahltechnik GmbH** ist ein mittelständisches Unternehmen mit Sitz in Langenselbold bei Frankfurt/Main. Das Schwesterunternehmen **PTR-Precision Technologies Inc.** ist in Enfield, Ct. in den USA beheimatet. Die Steigerwald Strahltechnik hat ihren Sitz in Maisach im Westen von München.

PTR in Langenselbold hat ihren Ursprung in der Elektronenstrahl-Schweißabteilung des ehemaligen Hanauer Unternehmens Leybold-Heraeus, später Leybold AG. PTR/Enfield war früher die Elektronenstrahl-Abteilung der US-Firma Hamilton Standard, Ct., während Steigerwald Strahltechnik von einem Pionier der EB-Bearbeitung, Dr. h.c. Karl-Heinz Steigerwald, gegründet wurde.

Firmen aus aller Welt profitieren von dem Know-how, der zuverlässigen Technik und der über 50-jährigen Erfahrung unserer EB-Technologie-

Spezialisten. Auf fünf Kontinenten in 28 Ländern sprechen nahezu 2.000 ausgelieferte Maschinen und Systeme zum Schweißen, Perforieren und Bearbeiten von metallischen Oberflächen (z. B. Härten) für sich.

So sorgen die modernen, genau auf die Anforderungen der Kunden zugeschnittenen Maschinen und Anlagen der Gruppe u.a. dafür, dass die Flugzeugtriebwerke oder Satellitenantriebe ihren Schub bekommen, Autos leichter werden sowie Getriebe und Turbolader weltweit Fahrzeuge beschleunigen. Ständig weiterentwickelte und neuartige Maschinen und

Anlagenkonzepte ermöglichen dies. Fragen Sie unsere Ingenieure.

Und wenn sie nicht selbst schweißen, bohren oder härten möchten oder Engpässe in der eigenen Fertigung haben – unser Job-Shop-Center übernimmt das gerne.

Wir – die GBT - kümmern uns um Ihre Verbindungen – weltweit.

[www.gbt-ag.com](http://www.gbt-ag.com)

THE INNOVATORS OF  
THE ELECTRON BEAM



Höchste Präzision in engsten Toleranzen,  
zuverlässige Reproduzierbarkeit der  
Schweißergebnisse und kaum messbare Verzüge  
durch geringste Wärmeeinbringung

**SST**  
STEIGERWALD STRAHLTECHNIK



LÖSUNGEN FÜR DIE LUFT-  
UND RAUMFAHRTINDUSTRIE

[www.sst-ebeam.com](http://www.sst-ebeam.com)

**PTR**  
STRAHLTECHNIK



LÖSUNGEN FÜR DIE  
AUTOMOBILINDUSTRIE

[www.ptr-ebeam.com](http://www.ptr-ebeam.com)

Über 50 Jahre Tradition in  
Schweißen und Bohren mit dem Elektronenstrahl

MEMBER OF  
GLOBAL BEAM TECHNOLOGIES AG

# Hundert Jahre Präwema – ein Jahrhundert Know-how



**Josef Preis,**  
Geschäftsführer

Die Präzisionswerkzeugmaschinen Antriebstechnik GmbH (Präwema) ist ein Unternehmen der DVS-Gruppe. Am heutigen Standort in Eschwege beschäftigt Präwema rund 180 Mitarbeiter. Das Kerngeschäft des 1908 in Berlin gegründeten Unternehmens liegt in der Verzahnung sowie beim Drehen und Schleifen. Auf modernsten CNC-Fräs- und Drehmaschinen fertigt Präwema komplizierte Einzelteile, Großserien bis hin zu Baugruppen und Komplettgeräten. Als führender Hersteller von Werkzeugmaschinen hat sich Präwema als zuverlässiger Partner der Industrie etabliert. Seit 1996 konzentriert sich Präwema auf das Geschäft im Verzahnungsbereich. Das Unternehmen ist Weltmarkt- und Technologieführer in der Hartbearbeitung von Zahnrädern. Das Unternehmen ist ISO 9001 zertifiziert. [Mehr unter www.praewema.de](http://www.praewema.de)





# DAS FÜHRUNGSTEAM DES INSTITUTS für Schweißtechnik und Fügetechnik



Die leitenden Mitarbeiter des ISF, von links: Christoph Geffers, Alexander Schiebahn, Uwe Reisinger, Konrad Willms, Ralf Löhrl, Simon Olschok (nicht im Bild Rahul Sharma)

Jedes Wirtschaftsunternehmen, und selbstverständlich auch eine Einrichtung der RWTH Aachen University, benötigt ein kompetentes Führungsteam, um möglichst viele menschliche und fachliche Synergien nutzen zu können. So setzt sich das Team des ISF sowohl aus erfahrenen Mitarbeitern als auch aus jungen Führungskräften zusammen.

Herr Dipl.-Ing. Konrad Willms ist schon seit 40 Jahren an der RWTH beschäftigt. Er betreut als Oberingenieur die Abteilung Lichtbogenverfahren (Abteilung A „Arc“), ferner ist er verantwortlich für Metallografie und Werkstoffprüfung. Darüber hinaus sind ihm die EDV und die E-Werkstatt zugeordnet. Herr Willms wird am 30.04.2018 in den Ruhestand gehen. Seine Aufgaben wird zukünftig Herr Rahul Sharma M.Sc. übernehmen. Herr Sharma arbeitet schon seit über 10 Jahren im Bereich Lichtbogenschweißen.

Dr. Simon Olschok ist Oberingenieur für den Bereich Strahlverfahren (Abteilung B „Beam“). Zusätzlich ist er ver-

antwortlich für die Mechanische Werkstatt, die Chemie und koordiniert die Zusammenarbeit mit dem Arbeitsmedizinischen Institut des Universitätsklinikums Aachen.

Dr. Alexander Schiebahn führt die Abteilung C „Cold Technologies“. Hierin sind die Arbeitsgebiete Widerstands- und Ultraschallschweißen, Rührschweißen und Klebtechnik sowie die Modellierung und Simulation von Fügeprozessen eingeordnet.

Da die Anforderungen und der Umfang bilateraler Industrieprojekte in den letzten Jahren stetig gewachsen ist, leitet Herr Dipl.-Ing. Christoph Geffers seit einigen Jahren das

Geschäftsfeld „Industrial Services and Solutions“.

Herr Dipl.-Kfm. (FH) Ralf Löhrl ist als Leiter der Institutsverwaltung verantwortlich für Finanzen und Organisation.

Prof. Uwe Reisinger ist seit August 2007 der Institutsleiter des ISF und geschäftsführender Direktor des Fügetechnischen Exzellenzzentrums (FEZ) im Rahmen der Jülich Aachen Research Alliance (JARA).

# INHALTSVERZEICHNIS



## VORWORT ... 3

---

<b>Vorwort von Univ.-Prof. Dr.-Ing. Uwe Reisgen</b>	<b>3</b>
<b>Das Führungsteam des Instituts für Schweißtechnik und Fügetechnik</b>	<b>7</b>



## EINSATZ DES SCHWEISSENS ... 12

---

<b>Alternative Fügeverfahren zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoff-/Metallhybridstrukturen mittels kleinskaliger Formschlusselemente</b>	<b>12</b>
<b>3D-Druckverfahren für große Bauteile: Additive Fertigung mit dem Lichtbogen</b>	<b>21</b>
<b>Innovatives thermisches Fügen von Stahl und Aluminium</b>	<b>27</b>
<b>Potentiale des Laserstrahlschweißens unter stationärem und mobilem Vakuum</b>	<b>33</b>
<b>Rührreibschweißen – Ein Sonderverfahren vor dem Durchbruch</b>	<b>42</b>



## NEUE ENTWICKLUNGEN ... 47

---

<b>Laserstrahl-Unterpulver Hybridschweißen – Ein modernes Fügeverfahren für Konstruktionsstahl im Bereich großer Blechdicken</b>	<b>47</b>
<b>Klebtechnik am ISF: Aktuelle Ergebnisse und Ausblick in die Zukunft</b>	<b>53</b>
<b>Schweißprozesssimulation – Simulationsgestützte Erforschung der physikalischen Prozesse verschiedener Schweißverfahren</b>	<b>60</b>
<b>Optische Erfassung von Schweißprozessen – Überwachung beim automatisierten Metallschutzgasschweißen</b>	<b>66</b>

Attila Könyves, Technischer Direktor,  
Dinox-H Kft.



## Ich bin Dreifachsparer.

Mit den Dreistoffgemischen von Messer – Ferroline, Inoxidline und Aluline – sparen wir Schweißzeit, Nachbearbeitung und Kosten.

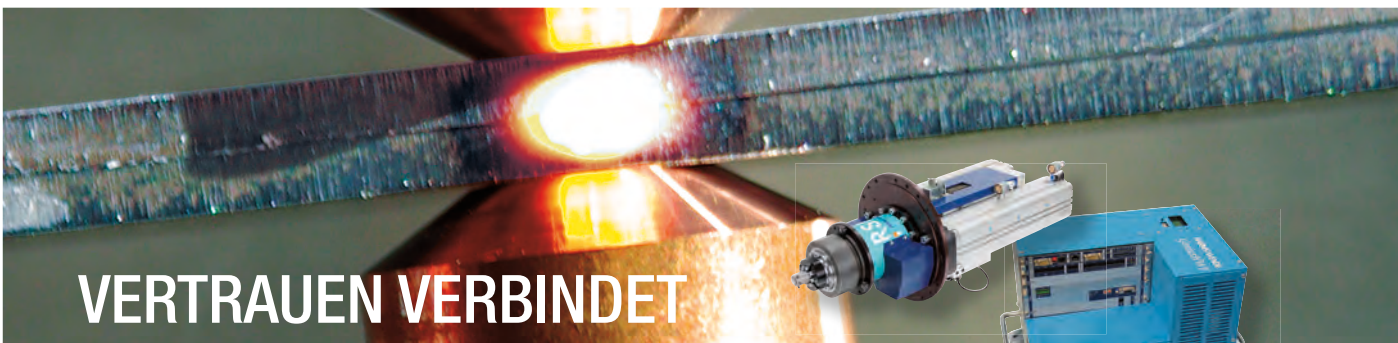
**Kostenoptimierung fängt mit Kostentransparenz an. Vergleichen ist dabei wichtig: aber nicht Äpfel mit Birnen. Die Ersparnis zählt!**

**MESSER**   
Gases for Life

**Messer Industriegase GmbH**

Messer-Platz 1  
65812 Bad Soden  
Tel. +49 6196 7760 200  
info.de@messergroup.com  
www.messer.de  
www.dreifachsparer.de

 [gasesforlife.de](http://gasesforlife.de)  [gase.de](http://gase.de)  [facebook.com](http://facebook.com)  [plus.google.com](http://plus.google.com)  [twitter.com](http://twitter.com)  [xing.com](http://xing.com)



## VERTRAUEN VERBINDET

**WIDERSTANDSSCHWEISSEN**  
**REIBSCHWEISSEN**

Automotive



Micro Welding



Industrial Solution



Reibschweißen



**HARMS+WENDE GROUP** 

Harms & Wende GmbH & Co. KG · [www.harms-wende.de](http://www.harms-wende.de)  
Grossmohrkehre 9 · 21079 Hamburg · Tel. +49 40 766 904-0 · Fax +49 40 766 904-88 · [info@harms-wende.de](mailto:info@harms-wende.de)

**HARMS+WENDE** **HWH**

**HARMS+WENDE** **HWH**

# INHALTSVERZEICHNIS



Systemnutzbare Analyse und Evaluation von MSG-Schweißprozessen	71
Vermessung des Elektronenstrahls für wissenschaftliche und industrielle Anwendungen	77
Cool gefügt: Fügen für elektrotechnische Anwendungen	82
Nasses Unterswasserschweißen an hochfesten Feinkornbaustählen	86
Fügen von Titanaluminiden mit dem Elektronenstrahl	88



<b>STUDIEN</b>	<b>... 92</b>
Die Aachener Arbeitsplatzsimulationsanlage – Studien zur Wirkung von Gefahrstoffen am Arbeitsplatz	92
Lagerungsbedingungen von Aluminium-Drahtelektroden für das MSG-Schweißen	95

<b>FORSCHUNGSAKTIVITÄTEN</b>	<b>... 98</b>
Erhöhung der Zähigkeit beim EB-Schweißen: ein wichtiger Schritt für das Schweißen von Gründungsstrukturen für Windenergieanlagen	98

<b>IMPRESSUM</b>	<b>... 2</b>
------------------	--------------



Sonosystems®

ultra fast. ultra strong.  
ultrasonic.



ultrasonic welding for



Wire Harness



Battery



IGBT



Cooling



# Alternative Fügeverfahren zur Herstellung von faserverstärkten Kunststoff-/Metallhybridstrukturen

## MITTELS KLEINSKALIGER FORMSCHLUSSELEMENTE

Jens Lotte



Abbildung 1: Buckelschweißung auf Pinstruktur (© ISF)

Das ISF beschäftigt sich mit innovativen Fügeverfahren zur Herstellung von (endlos-) faserverstärkten Kunststoff-/Metallhybridstrukturen. Die neuartigen Ansätze basieren auf kleinskaligen Formschlusselemente. Am ISF wird hierzu vor allem der Einsatz sogenannter Cold-Metal-Transfer-Pins (CMT-Pins) untersucht.

Bei der Fertigung von Leichtbaustrukturen kann in einer zunehmenden Anzahl von Industriezweigen (Automotive, Luft- und Raumfahrt, Windenergie, Maschinen- und Anlagenbau) vermehrt der Einsatz von Hybridstrukturen auf Basis von faserverstärkten Kunststoffen (FVK) und Metallen beobachtet werden. Das Leichtbaupotenzial derartiger Multimaterialstrukturen ist in zahlreichen Studien belegt worden [LEM12, LEN10, SBL+10].

Endlosfaserverstärkte Kunststoffe bieten aufgrund exzel-

lenter gewichtsspezifischer Steifigkeiten und Festigkeiten ein enorm hohes Leichtbau- und Energieeinsparungspotenzial und werden zunehmend in Branchen wie der Transport- und Automobilindustrie, der Luft- und Raumfahrt, dem Bausektor, oder im Bereich der regenerativen Energiegewinnung für Leichtbaukomponenten wie z.B. Karosseriestrukturelemente, Verkleidungsteile oder Rotorblätter von Windkraftanlagen eingesetzt. So stieg z.B. die Produktionsmenge für glasfaserverstärkte Kunststoffe (GFK) im europäischen Ge-

samtmarkt in 2014 um mehr als 2% auf ca. 1,04 Mt. im Vergleich zum Vorjahr [WKK14]. Für die Herstellung von CFK wird aufgrund nochmals höherer Leichtbaueigenschaften weltweit bis zum Jahr 2020 sogar ein Wachstum von jährlich ca. 10% prognostiziert. Mit anteilig 76% am CFK-Gesamtumsatz von ca. 9,4 Mrd. US \$ (2013) stellen Duroplaste dabei nach wie vor die gebräuchlichste Polymermatrix dar [WKK14].

Insbesondere die fortschreitende Entwicklung von modernen höher- und höchstfesten

Stählen ermöglicht die Herstellung von Bauteilen in deutlich geringeren Wanddicken und stellt somit eine wirtschaftliche Möglichkeit dar, Leichtbaustrukturen zu realisieren. Die Kombination aus Stahl und FVK eröffnet dabei neue Möglichkeiten hochspezialisierte Bauteile für definierte Einsatzbedingungen herzustellen.

Trotz der Tendenz in vielen Bereichen metallische Bauteile durch solche aus faserverstärktem Kunststoff zu ersetzen ist es oftmals unumgänglich Verbindungen zwischen Bauteilen aus faserverstärkten Kunststoffen und Metallbauteilen zu schaffen. Ein Anwendungsbereich ist z.B. die Anbindung eines Türscharniers an eine Karosserie aus faserverstärktem Kunststoff. Die Fügetechnik stellt dabei eine Schlüsseltechnologie dar und ist Gegenstand zahlreicher Untersuchungen.

Das Fügen von FVK-Bauteilen mit Strukturen aus Stahl kann grundsätzlich durch kraftschlüssige (z.B. Klemmen), formschlüssige (z.B. Schlaufenschluss, Bolzen, Umpressen) und stoffschlüssige (Kleben) Verbindungen realisiert werden [Sch03, MW89]. Krafteinleitungselemente, meist form- oder kraftschlüssige Verbindungselemente aus Stahl, Aluminium oder Titan,

dienen zur Bauteilbefestigung und somit Einleitung der Last in das FVK-Bauteil [Sch03, Mue91]. Die derzeit etablierten Fügeverfahren sind jedoch aufwendige und nicht fasergerichte Prozesse wie z.B. Kleben, Bohren, Stanzen und Nieten [Dil02, Wit10].

Sehr häufig werden Verbunde aus duroplastischen FVK und Stahl geklebt. Durch Klebstoffe lassen sich Kräfte homogen und flächig übertragen – es treten im Gegensatz zu mechanischen Verbunden keine Querschnittsminderungen oder Kerbwirkungen auf [BKF+15]. Allerdings weisen auch Klebverbindungen eine Reihe von Nachteilen auf [Hab09]: Klebprozesse erfordern im Allgemeinen sehr aufwendige Oberflächenvorbehandlungsmaßnahmen und Fixierkonzepte, was zu weiteren Prozessschritten und längerer Prozessdauer führt. Problematisch sind hier zudem die oft sehr langen Aushärtezeiten vieler Klebstoffe. Strukturelle Klebungen sind nur sehr beschränkt duktil, d.h. sie versagen meist spröde und ohne vorhergehende erkennbare Anzeichen. Weiterhin werden die Fügepartner nur oberflächlich miteinander verbunden, wodurch eine Kräfteinleitung in tiefer liegende Faserlagen nur unzureichend über die Matrix stattfindet. Oft kommt es daher gerade

bei strukturellen Klebungen zu Zwischenfaserbrüchen und Delaminationen (**Abb. 2**).

Im Vergleich zu bspw. mechanischen Verbindungen bieten Klebungen nur niedrige thermische Beständigkeit, neigen zum Kriechen und altern aufgrund von Umwelteinflüssen. Zudem sind Qualitäts- und Prozesskontrollen schwierig, da bislang keine serientauglichen fertigungsbegleitenden, zerstörungsfreien Prüfungen der geklebten Fügestellen möglich sind [Hab09]. Abgesehen von der Klebtechnik selbst können andere adhäsive Fügeverfahren nur unter der Verwendung von thermoplastischen Kunststoffen realisiert werden, da hier ein Aufschmelzen der Kunststoffoberfläche vorausgesetzt wird [RSS14].

Mechanische Fügeverfahren sind eine weitere Möglichkeit Stahl mit FVK zu verbinden. Üblicherweise wird hierbei ein Fügeelement (bspw. Schraube, Niet oder Bolzen) nach der Durchführung von Vorlochoperationen durch das FVK-Bauteil gesetzt, um das Metall kraft- und/oder formschlüssig an das FVK im Überlappstoß anzubinden. Durch die notwendigen Vorlochoperationen kommt es prozessbedingt zu Schäden an jenen Fasern, welche für die hohen Zugfestigkeiten der Kunststoffbauteile verantwortlich sind (**Abb. 3**).

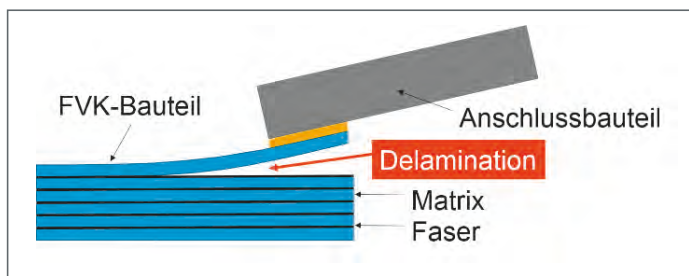


Abbildung 2: Versagen von geklebten FVK-/Metall-Strukturverbunden (© ISF)

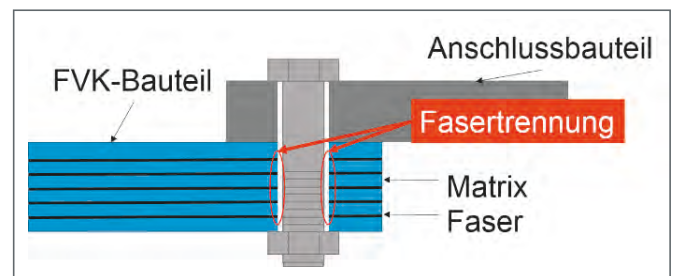


Abbildung 3: Fasertrennung von mechanisch gefügten FVK-/Metall-Strukturverbunden (© ISF)

Dies führt zu einer stark abträglichen Beeinflussung der erzielbaren anisotropen Werkstoffeigenschaften [MHS13].

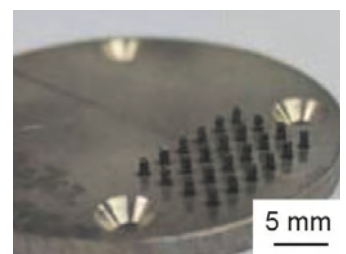
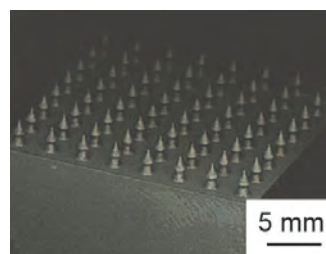
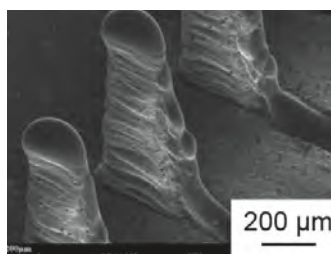
Diese Faserschädigungen wirken als Kerben, welche zur Festigkeitsminderung aufgrund der Querschnittsschwächung der Bauteile führen. Spannungsüberhöhungen an diesen Kerben führen zu dem zu Ermüdungsrissen und es entsteht so eine ungewollte Sollbruchstelle. Bei hybriden mechanischen Verbindungen mit Klebstoff kann die strukturelle Schwächung durch Bohrungen so signifikant sein, dass die zu erzielenden Festigkeiten mit mechanischen Elementen und Klebstoff schlechter sind als die des Klebstoffes allein [SG98]. Als Folge müssen Bauteile aus FVK in der Füge Stelle häufig überdimensioniert werden. Vor dem Hintergrund der hohen Rohstoffpreise von etwa 30 bis 100 €/kg [EK14] und auch bzgl. des ursprünglichen Leichtbaugedankens ist ein solches Vorgehen wenig zielführend. Weitere Probleme ergeben sich durch die Freilegung der Kohlenstofffasern bei CFK-Bauteilen, so dass unter Feuchtigkeitseintritt galvanische Korrosion (Kontaktkorrosion) ausgelöst werden kann. Scherbrüche können aus Kerbspannungen oder Lochleibung um das erzeugte Loch entstehen [TS12]. Fügeelemente, die nicht flächig mit der Bauteiloberfläche abschlie-

ßen, können nur bedingt beschichtet oder lackiert werden und sind designtechnisch weniger ansprechend. Zudem treten vermehrt Probleme beim Durchstanzen/-bohren hochfester Stahlgüten auf, da das Bohr- oder Stanzwerkzeug beschädigt wird. Aus diesem Grund ist das Fügen von pressharten Stählen wie 22MnB5 und FVK mit mechanischen Verfahren grundsätzlich nicht möglich [MMO+14].

Neben dem Problem der Faserschädigung im FVK treten unter anderem auch Probleme beim Fügen von ultrahochfesten Stählen auf. Diese Stähle können mit herkömmlichen Stanz- und Bohrwerkzeugen kaum bearbeitet werden. Daher wird an thermischen Fügeverfahren geforscht, wie beispielsweise dem Widerstands-Element-Schweißen (WES), bei dem ein (faserverstärktes) Kunststoffbauteil angebohrt und ein metallischer Niet durchgeführt wird, welches dann mit einer Mittelfrequenzgleichstrom (MFDC)-Widerstandsschweißmaschine stoffschlüssig an die unter dem FVK liegenden Metallstrukturen geschweißt wird. Es entsteht ein Form- und Kraftschluss zwischen Metallblech und Kunststoffbauteil. Ein Stoffschluss besteht nur indirekt zwischen außen liegendem Niet und Metallbauteil [FM15, MHJ+13, MHJ+14, RJ09].

Kombinierte Fügeverfahren nutzen mehrere Verbindungsmechanismen gleichzeitig. Beispielsweise handelt es sich bei „Onserts“ um mechanische Fügeelemente (bspw. metrische Gewindebuchsen) die adhäsiv auf die Oberfläche der FVK Bauteile gefügt werden [Ehr06]. Diese Elemente übernehmen anschließend die eigentliche Fügeaufgabe. Die Krafteinleitung in den FVK erfolgt jedoch wie beim Kleben nur über die Oberfläche. Eine prozesstechnisch effektive Variante speziell für das Fügen von FVK im Fall von duroplastischen Matrices ist das „intrinsische Fügen“, also das Auf- bzw. Einlaminiert von z.B. metallischen Anschlusselementen, wodurch eine Kombination einer adhäsiven Verbindung und einem Formschluss durch ein „Fügen durch Urformen“ nach DIN 8593 erzeugt wird [DIN03]. Mechanische „Inserts“ (bspw. Gewindebuchsen) werden in das FVK einlaminiert und können angreifende Kräfte direkt an die Matrix weiterleiten. Der beim „Insert“ herausragende Gewindekopf befindet sich dabei für gewöhnlich an der Werkstückoberfläche und kann für die eigentliche Fügeverbindung weiter genutzt werden. Großskalige Formschluss-elemente, wie sie bei herkömmlich eingesetzten Inserts auftreten, erfordern in den meisten Fällen zudem eine Fasertrennung, um das metallische Anschlusselement aus dem

Abbildung 4:  
Pinstrukturen, welche mittels unterschiedlicher Verfahren erzeugt wurden (von links nach rechts: CMT-Pins, Surf-Sculp Strukturen aus Titan [BH11], HYPER-Pins aus Titan [PBM+14], HYPER-Pins aus Aluminium [PSG+14])





Laminat führen zu können [KT13, ZK05].

Kleinskalige Formschlusselemente (auch z-Pins) gehören auch in den Bereich der kombinierten Fügeverfahren. Zur Erzeugung dieser Elemente gibt es eine Reihe von Ansätzen (**Abb. 4**): Zum einen können solche Pins mittels geregelter Kurzlichtbogen­schweißprozess aufgeschweißt werden. Diese Pins werden beispielsweise durch die Firma Teufelsberger unter dem Namen T-Igel® auf rotations­symmetrische Bauteile aufgebracht [KE09]. Auch auf ebenen Füge­teilen kamen sie bereits mehrfach zum Einsatz [UP10, USZ+10, UK11]. Unter dem Namen Hyperpins bekannt, werden komplexere Pinstrukturen auch mittels Selective-Laser-Melting (SLM) gefertigt [OSC+13]. Durch den Einsatz des Elektronenstrahls können metallische Oberflächen strukturiert werden. Aufgrund des Kapillareffektes fließt aufgeschmolzenes Metall entgegen der Bewegungsrichtung des Elektro­nenstrahls um diesen herum. Auf diese Weise können kleinskalige Strukturen erzeugt werden. Unter dem Namen Comeld™ werden diese auch zum Fügen von Hybridbauteilen aus FVK und Stahl verwendet [BH11, TWH+11]. Weiterhin gibt es den Ansatz, diese Strukturen zu stanzen [Bra14].

Abschließend kann festgestellt werden, dass die vorliegenden Füge­konzepte, mit ihren jeweils unterschiedlichen Verbindungsmechanismen, trotz ihrer zahlreicher Vorteile auch eine Reihe von entscheidenden Nachteilen mit sich bringen (Oberflächenanbindung, Loch­leibung, Delamination, Korrosion, prozesstechnische

Probleme). Obgleich unterschiedliche Ansätze für die Herstellung von Kunststoff-/ Metallhybriden untersucht werden, besteht nach wie vor Bedarf an einem Füge­verfahren, welches den technischen und wirtschaftlichen Herausforderungen der Verbindung von Metall und FVK hinreichend begegnet.

In vorangegangenen Forschungsaktivitäten [LRS15a, LRS15b, Qua12, Rei12, Rei14, RSS15] wurde am Institut für Schweißtechnik und Füge­technik der RWTH Aachen (ISF) Fachkompetenz sowie Anlagentechnik hinsichtlich der Fertigung von Pins (**Abb. 4**) durch den Cold Metal Transfer (CMT)-Prozess aufgebaut.

Hierbei handelt es sich um ein Metall-Schutzgasschweiß­verfahren (MSG) auf Basis des Kurzlichtbogenprozesses, welcher u. a. durch geringe Abschmelzleistung charakterisiert ist. Die Pins können direkt aus dem zugeführten Schweißdraht erzeugt werden. Durch einen ersten Stromimpuls und eine entsprechende Drahtführung wird der Schweißdraht auf dem Grundmaterial angeschweißt. Durch die Stromführung während eines abgestimmten

Drahrückzugs wird dann der Draht aufgetrennt.

Das Fasermaterial lässt sich in trockenem Zustand um diese Pins herum führen, der Verbund entsteht nach der Infusion des Matrixharzes und dessen Aushärtung, (**Abb. 5**). Kunststoffseitig wurde eine quasiisotrope Lagenarchitektur aus kohlenstoffaserverstärktem Kunststoff verwendet. Dabei kamen sechs Lagen biaxiales Fasergelege mit einem Flächengewicht von jeweils 320g/m<sup>2</sup> (Aufbau [(0/90)/(45/-45)/(0/90)/(0/90)/(45/-45)/(0/90)]) zum Einsatz. Als Matrixpolymer wurde ungefülltes Bisphenol-A-Epichlorhydrin Laminierharz mit einem aminischem Härter benutzt. Die Tränkung beziehungsweise Konsolidierung wurde im Handlaminierverfahren durchgeführt. Metallseitig wurde ein nichtrostender austenischer Stahl (1.4301) in Kombination mit Pins, die aus einer Massivdrahtelektrode (1.4316) geformt wurden, verwendet.

Die sich ergebende Verbindung zeichnet sich gegenüber den bisher bekannten Verfahren durch fasergerechte Kraftübertragung und ein vergleichsweise duktiles Versagensverhalten aus. Zusätzlich

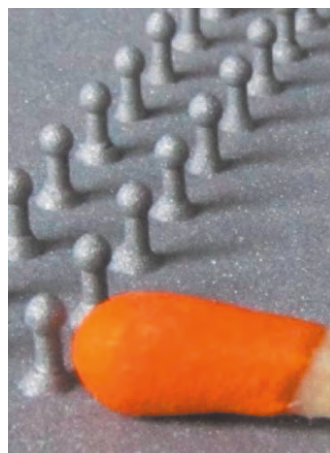


Abbildung 5:  
CMT-Pinstrukturen (links), Hybridverbund aus CFK und Stahl (rechts) (© ISF)

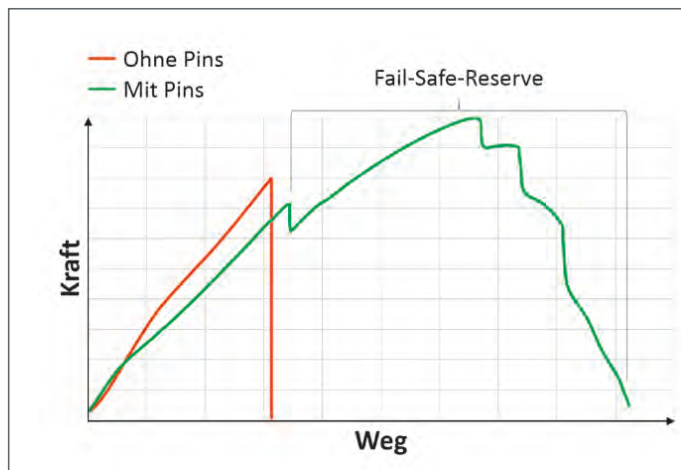


Abbildung 6:  
Mehrstufiges Versagensverhalten von FVK-/Metall-Hybridstrukturen durch cMT-Pinstrukturen verglichen mit Versagensverhalten struktureller Klebungen

wird in der Fügestelle ein Sensorfaden integriert, der die Fügestelle im laufenden Betrieb überwacht und damit eine Schädigung sicher anzeigt, um das gefügte Bauteil austauschen zu können, bevor es zu einem Totalversagen der Fügestelle kommt.

Wie bei einer konventionellen Verklebung werden die Kräfte durch die adhäsive Anbindung der Epoxidmatrix flächig zwischen Stahl und FVK übertragen. Durch die Pinstrukturen können angreifende Kräfte in tiefere Faserlagen eingeleitet werden, wodurch die Verstärkungsfasern die Lasten gleichmäßiger aufnehmen und der Verbundwerkstoff optimal ausgenutzt wird. Hierdurch kann die Fügestelle gewichtssparend ausgelegt werden.

Durch den zusätzlichen Formschluss aufgrund der Pinstrukturierung versagt die Fügestelle anders als bei reinen, strukturellen Klebungen jedoch nicht abrupt, sondern zeigt ein duktiler Nachbruchverhalten (**Abb. 6**). Die sich ergebende mehrstufige Versagenscharakteristik ermöglicht die Überwachung der Fügestelle. Dadurch können vor dem endgültigen Versagen

der Anschlussstelle Sicherheitsmaßnahmen eingeleitet werden. Die eingesetzte Sensorik basiert auf einer durchgängigen elektrischen Verbindung im Bauteil, die im Schadensfall abreißt. Im Gegensatz zur Klebeverbindung ohne Pins kann hier nach dem ersten Rückgang der aufgenommenen Kräfte, der das Versagen der adhäsiven Verbindung kennzeichnet ein erneuter Anstieg der Kraft bis zur endgültigen Bruchkraft beobachtet werden. Der integrierte Sensor spricht beim adhäsiven Versagen und damit vor der vollständigen Trennung der Fügepartner an.

Die sich ergebenden Haftkräfte aufgrund des Stoffschlusses werden im betrachteten Fall ausschließlich durch Beeinflussung der Eigenschaften der Metalloberfläche erreicht. Hierbei wurden Kombinationen unterschiedlicher Oberflächenbehandlungsverfahren der Klebflächen untersucht. Je nachdem, welche Kombination dieser Vorbehandlungsverfahren gewählt wird, können unterschiedliche Verbundfestigkeiten erzeugt werden. In Untersuchungen, bei denen die Fügeflächen mit Trennmittel behandelt wurden,

konnte gezeigt werden, dass die Kräfte, die durch die Pinstrukturen im Zugscherversuch aufgenommen werden können, linear von deren Anzahl abhängen. Die Steigung der sich ergebenden Geraden ist abhängig vom Pindurchmesser.

Die Untersuchungen geschehen mit dem Ziel, einen mehrstufig versagenden Verbund aus Stahl und CFK herzustellen, der über ein integriertes Monitoringsystem überwacht werden kann. Zu diesem Zweck ist es notwendig, dass die Verbindung nach Erreichen der ersten Versagensstufe noch einmal mindestens ein ähnlich hohes Kraftniveau wie zum Zeitpunkt des primären Versagensereignisses erreichen kann.

Die Kraftaufnahme der Pinstrukturen in Abhängigkeit mit deren Anzahl und deren Durchmesser stimmt auch im Hybridverbund weitgehend mit der zuletzt beschriebenen linearen Beziehung überein. Der formschlüssige Anteil der Verbindung muss jedoch an den stoffschlüssigen Anteil angepasst werden.

Durch Oberflächenbehandlung kann der stoffschlüssige Anteil der Verbindung verbessert werden. Wenn höhere Verbundfestigkeiten in der primären Versagensstufe vorliegen, müssen auch höhere formschlüssige Anteile der Verbundfestigkeit erreicht werden, da die erhöhten dynamischen Kräfte andernfalls nicht mehr durch die Pins aufgefangen werden können, sodass diese sofort abscheren und das mehrstufige Versagensverhalten der Verbindung verloren geht. Bei gleichbleibender Oberflächenbehandlung

muss daher der Pindurchmesser vergrößert oder die Anzahl der Pins innerhalb der Fügezone erhöht werden, um ein sekundäres Versagensereignis sicherzustellen.

Der Einfluss unterschiedlicher Oberflächenvorbehandlungen in Kombination mit unterschiedlichen Pinanzahlen und Pindurchmessern innerhalb der Fügefläche ist in **Abb. 7** dargestellt.

Die hohen Kräfte, die durch die geklebte Verbindung erzielt werden können, führen zu hohen dynamischen Kräften im ersten Versagensmoment. Diese Kräfte können durch den formschlüssigen Kraftanteil von Pins mit einem Durchmesser von nur 0,8mm kaum aufgefangen werden. Erst bei einer Pinanzahl von 13 Pins innerhalb der Fügefläche kann hier ein mehrstufiges Versagen beobachtet werden. Die übertragbaren Kräfte, die allein aufgrund der Klebung übertragen werden können, bleiben unabhängig von der Pinanzahl weitgehend konstant. Bei allen Proben, die sich auf den hier betrachteten Kraftniveaus befinden, kann durch Integration von 1,2mm dicken Pins ein mehrstufiges Versagen erreicht werden. Auch hier bleiben die übertragbaren Kräfte, die allein aufgrund der Klebung übertragen werden können, unabhängig von der Pinanzahl weitgehend konstant.

Dieser Ansatz vereint die positiven Eigenschaften von mechanischen und geklebten Verbindungen. Er löst dabei nicht die sich ergebenden fertigungstechnischen Herausforderungen, welche mit der Integration derartiger Strukturen in FVK entstehen. Er setzt langwierige manuelle

Fertigungsprozesse voraus und ermöglicht keine automatisierbaren Prozesse. Durch die manuelle Fertigung steht zudem keine hinreichende Prozesskontrolle zur Verfügung.

In einem derzeit laufenden Forschungsprojekt, wird aufbauend zu den Erkenntnissen des beschriebenen Forschungsprojektes ein Insert, auf dem kleinskalige Formschlusselemente (Pinstrukturen) aufgebracht sind, in ein trockenes textiles Faserhalbzeug integriert, ohne dabei dessen Fasern zu beschädigen. Anschließend wird der Matrixwerkstoff injiziert und das Halbzeug zu einem FVK-Bauteil konsolidiert, die Kunststoffmatrix bildet dabei eine Diffusionsbarriere gegenüber einem von außen eindringenden Elektrolyten. Für die FVK-Bauteilherstellung wird z. B. das Vakkuminfusionsverfahren oder das RTM-Verfahren verwendet. Das metallische Insert besteht aus einem Trägerblech und darauf ein- oder beidseitig senkrecht stehenden Pins, welche als Schweißbuckel aus dem Laminat heraus ragen (**Abb. 8**). Über diese Anschlussstelle kann das FVK-Bauteil an ein metallisches Anschlussbauteil mittels konventioneller Widerstandsschweißverfahren angeschweißt werden. Insbesondere das Kondensatorent-

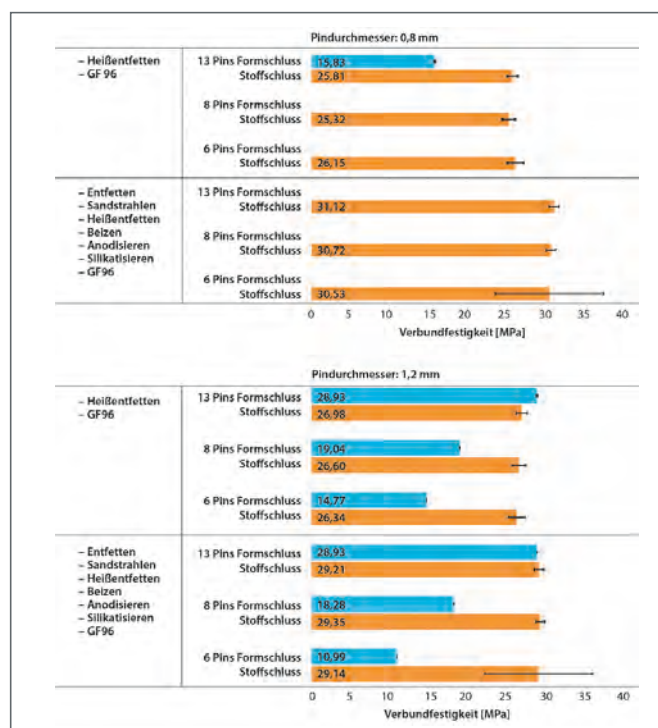


Abbildung 7: Einfluss unterschiedlicher Oberflächenvorbehandlungen in Kombination mit unterschiedlichen Pinanzahlen und Pindurchmessern (@ ISF)

ladungsschweißen (KES), welches aufgrund der kurzen Prozesszeit (~20ms) eine nur sehr geringe Erwärmung des Metalls und damit des Kunststoffes hervorruft, eignet sich hier besonders.

Das Ziel des Forschungsvorhabens ist es, mittels eines etablierten Schweißverfahrens, wirtschaftlich, schnell und prozesssicher duroplastische FVK-/Metallhybridstrukturen mit hohen mechanischen Eigenschaften und guter Verbundfestigkeit zwischen den Fügepartnern herzustellen, ohne dass dabei die mecha-

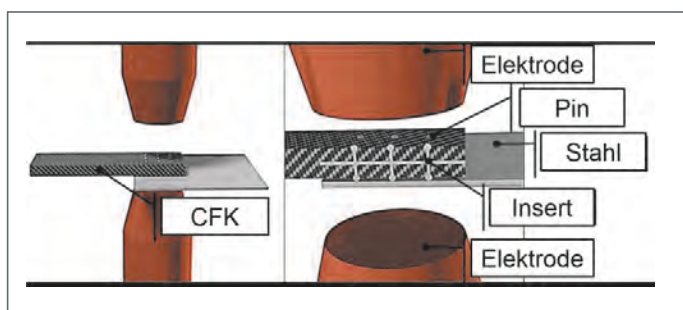


Abbildung 8: Prinzipskizze zum Widerstandsschweißen von CFK und Stahl [RSE15]

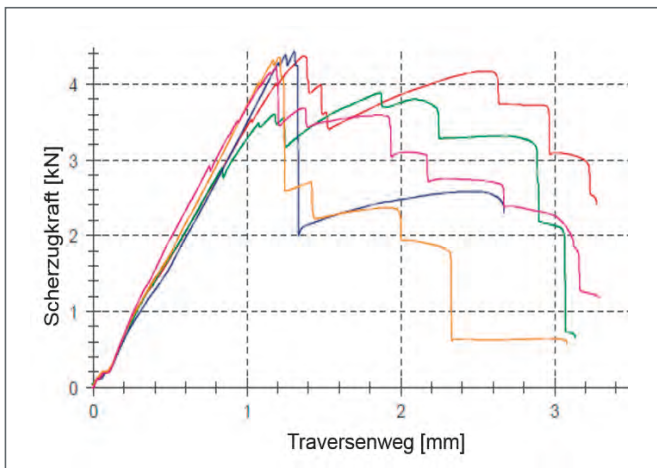


Abbildung 9:  
Einfluss unterschiedlicher Oberflächen-  
vorbehandlungen in Kombination mit  
unterschiedlichen Pinanzahlen und  
Pindurchmessern (© ISF)

nischtechnologischen Eigen-  
schaften der FVK-Bauteile nega-  
tiv beeinträchtigt werden.

Der Bindemechanismus zwi-  
schen Insert und FVK ist im  
Wesentlichen ein Formschluss  
mit Anteilen von Adhäsion  
durch die Kunststoffmatrix. In  
Scherzugprobekörpern auf  
denen 21 Pins an ein Ansch-  
lussblech geschweißt wur-  
den, kann auch hier ein mehr-  
stufiges Versagensverhalten  
beobachtet werden (**Abb. 9**).  
Verwendet wurden DC01-  
Trägerbleche (1.0330), auf die  
Pins der Werkstoffnummer  
1.5125 aufgebracht wurden.

Durch Höhenunterschiede der  
Pinstrukturen kommt es zu un-  
terschiedlichen Übergangs-  
widerständen zwischen Pins  
und Anschlussblech. Hierdurch

Das IGF-Vorhaben „Entwicklung eines alternativen Fügeverfahrens zur wirtschaftlichen und prozesssicheren Herstellung von faserverstärkten Kunststoff-/Metallhybridstrukturen auf Basis des Widerstandsschweißverfahrens mittels integrierter metallischer Inserts“; IGF-Projekt Nr. 19.466 N, der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

resultieren unterschiedliche  
Schweißtemperaturen und  
somit unterschiedliche Verbundfestigkeiten der Einzel-  
pins. Nach dem primären  
Versagen einer Pingruppe,  
kann der Verbund durch Pins  
unterschiedlicher Resttrag-  
fähigkeiten weiterhin Kräfte  
aufnehmen.

Die wenige Millimeter hohen  
Pins können als formschlüssi-  
ge Elemente für elastisch oder  
flüssig umschließende Werk-  
stoffe genutzt werden. Im  
Verbund von FVK und Metall  
lassen sich Spannungsspitzen  
im Bereich des Werkstoffüber-  
gangs gezielt minimieren.  
Durch die Kombination von  
stoff- und formschlüssigen  
Fügeanteilen, bzw. durch un-  
terschiedliche Tragfähigkeiten  
verschweißter Einzelpins  
konnte eine mehrstufige Ver-  
sagenscharakteristik erzeugt  
werden. Dies ermöglicht die  
Überwachung der Fugestelle  
mittels integrierter Sensorik.  
Nach dem primären Versagen  
der Verbindung bietet die  
Verbindung über die Pins eine  
ausreichende Restfestigkeit.

**Literatur**

[BH11] Blackburn, J., Hilton, P.: Producing Surface Features with a 200 W Yb-fibre Laser and the Surf Sculpt<sup>®</sup> Process  
[BKF+15] Blass, D., Kreling, S., Fischer, F., Dilger, K.: Klebvorbehandlung von Faserverbundwerkstoffen, DVS Congress, Große Schweiß-technische Tagung, 2015  
[Bra14] Brand, M.: HyTensile – Die Klammerstruktur für mehr Hybridperformance, In: Portal, Ausgabe 31, Technische Universität Braunschweig, 2014  
[Dil02] Dilger, K.: Kleben faserverstärkter Verbundwerkstoffe im Fahrzeugleichtbau. DWI Reports Band 125. Aachen, 2002

[DIN03] DIN 8593, Fertigungsverfahren Fügen, 2003  
[Ehr06] Ehrenstein, G. W.: Faserverbundkunststoffe: Werkstoffe, Verarbeitung, Eigenschaften. München: Hanser, 2006, ISBN 978-3-446-22716-3  
[EK14] Eickenbusch, H., Krauss, O.: Kohlenstofffaserverstärkte Kunststoffe im Fahrzeugbau – Ressourceneffizienz und Technologien, 2. Überarbeitete Auflage, VDI ZRE Publikationen: Kurzanalyse Nr. 3, 2014  
[FM15] Franz, T., Meyer, C.: Entwicklung und Umsetzung des Widerstandselementschweißens in der Serie am Beispiel der Hutablage des Volkswagen Passat B8, Join in car body engineering 2015, Bau Nauheim, 2015  
[Hab09] Habenicht, G.: Kleben: Grundlagen, Technologien, Anwendungen, 6. Aufl. Berlin: Springer, 2009, ISBN: 978-3-540-85266-7  
[KE09] Kirth, R., Ebel, C.: Anordnung zum Verbinden eines Länglichen Elementes mit einer weiteren Komponente, Patent WO 2009/003207 (A1), 27.06.2012.  
[KT13] Konstantinos, N., Tsovalis, N. G.: Loading and fracture response of CFRP-to-steel adhesively bonded joints with thick adherents, Part I: Experiments. Composite Structures, 96, pp. 850–857, 2013  
[LEM12] Lässig, R., Eisenhut, M., Mathias, A. et. al.: Serienproduktion von hochfesten Faserverbundbauteilen – Perspektiven für den deutschen Maschinen- und Anlagenbau, Studie der Roland Berger Strategy Consultants, 2012 URL: [http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland\\_Berger\\_Serienproduktion\\_hochfester\\_Faserverbundbauteile\\_20120926.pdf](http://www.rolandberger.de/media/pdf/Roland_Berger_Serienproduktion_hochfester_Faserverbundbauteile_20120926.pdf)  
[LEN10] Lotus Engineering: International council on clean transportation, an assessment of mass reduction opportunities for 2017–2020, Model year vehicle program, 03/2010  
[LRS15a] Reisgen, U., Schiebahn, A., Lotte, J.: Materialkombination aus faserverstärkten Kunststoffen und

- Metall mit integrierter Sensorüberwachung „Smart Multi Material Joint“, Tagungsband der IKV-Fachtagung zur Kunststoffverarbeitung, IKV, Aachen, 2015
- [LRS15b] Reisgen, U., Schiebahn, A., Lotte, J. „Smart Multi Material Joint“ – hybrid joint of steel and FRP 20th Symposium on Composites, July 1–3, 2015, Vienna, Austria, Part 1, zugl.: Materials Science Forum, Vols. 825–826, 2015, TransTech Publications, Staefa, Switzerland, 2015
- [MHJ+13] Meschut, G., Hahn, O., Janzen, V.: Untersuchungen zum Fügen artverschiedener Werkstoffkombinationen durch das Widerstandselementschweißen (WES). DVS-Sondertagung Widerstandsschweißen, 22 \* (2013) Seite 151–159
- [MHJ+14] Meschut, G., Hahn, O., Janzen, V., Olfemann, T.: Innovative joining technologies for multimaterial structures. *Welding in the World* \* Band 58 (2014) Heft 1, Seite 65–75
- [MHS13] Meschut, G., Hahn, O., Sülentrop, S.: Fügen von Leichtbaustrukturen in der FVK/Metall-Mischbauweise, Arbeitskreis Leichtbau NRW „Intelligente Verbindungstechnik“, Düsseldorf, 2013
- [MMO+14] Meschut, G., Matzke, M., Olfemann, T., Maier, H.J., Mroz, G., Drossel, W.: Lokale Konditionierung von presshartem Vergütungsstahl für das Hybridfügen von Mischbaustrukturen, Europäische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V. (EFB), 2014
- [Mue91] Müller, W.: Krafteinleitung in Faserverbundwerkstoffe. RWTH Aachen, Dissertation, 1991
- [OSC+13] Oluleke, R., Strong, D., Ciuca, O., Meyer, J., Oliveira, A., Prangnell, P.: Mechanical and microstructural characterization of percussive arc welded HYPER-Pins for Titanium to Composite Metal Joining, *Materials Science Forum* Vol. 765, PP 771–775, 2013
- [PBM+14] Parkes, P.N., Butler, R., Meyer, J., Oliveira, A.: Static Strength of Metal-Composite Joints with Penetrative Reinforcement Composite Structures, Volume 118, 2014
- [PSG+14] Plettke, R., Schaub, A., Gröschel, C. et al.: A new process chain for joining sheet metal to fibre composite sheets, *Key Engineering Materials*, Vol 611–612 (2014)
- [Qua12] Quadflieg, T., et. al.: Shear connectors for hybrid joints of metal and FRP, *Diversity in Composites*, 2012 Conference, Rikard Benton Heslehurst, Hawthorne, Australia, 2012
- [Rei12] Reisgen, U., et. al.: Investigation on bond mechanisms of innovative small-scale shear connectors between steel and concrete Bond in Concrete 2012 – Bond in New Materials and under Severe Conditions, 2012
- [Rei14] Reisgen, U., et. al.: Innovative Fügeverfahren für hybride Verbunde aus Metall und Kunststoff, *Lightweight-design*, 7, 3, Springer Fachmedien, Wiesbaden, 2014
- [RJ09] Rudolf, H., Jüttner, S.: Verfahren zum Fügen mittels mechanischen Eintreibens und Verschweißens eines Fügeelementes, sowie derartige Fügeelement, Patentschrift: DE 102004025492 (A1) DE, 06.08 2009.
- [RSS14] Reisgen, U., Schiebahn, A., Schönberger, J.: Innovative Fügeverfahren für hybride Verbunde aus Metall und Kunststoff, *Lightweight-design*, Springer Vieweg, Wiesbaden, 2014
- [RSS15] Reisgen, U., Schiebahn, A., Schoene, J.: „Smart Multi Material Joint“ – Hybrider Verbund zwischen Stahl und FVK, 4. Doktorandenseminar Klebtechnik, Bremen, DVS-Berichte, Band 309, 2015
- [SBL+10] Sahr, C., Berger, L., Leseemann, M. et. al.: Systematische Werkstoffauswahl für die Karosserie des Superlight-Car „ATZ 112“, Springer Fachmedien GmbH, Wiesbaden, 2010
- [Sch03] Schievenbusch, F.: Beitrag zu hochbelasteten Krafteinleitungselementen für Faserverbundbauteile. Technische Universität Chemnitz, Dissertation, 2003
- [SG98] Silverman, E.M., Griese, R.A.: *Joining Methods for Graphite/PEEK Thermoplastic Composites*. *SAMPLE Journal* 25 (5), 34–38, 1989
- [TS12] Talreja, R., Singh, C.V.: *Damage and Failure of Composite Materials*. Cambridge: Cambridge University Press. 2012
- [TWH+11] Tu, W., Wen, P.H., Hogg, P.J., Guild, F.J.: Optimisation of the protrusion geometry in Comeld (TM) joints, *Compos Sci Technol*. 2011; 71 (6): 868–876.
- [UK11] Ucsnik, S., Kirov, G.: New possibility for the connection of metal sheets and fiber reinforced plastics, *Materials Science Forum* Vol. 690, PP 465–468, 2011
- [UP10] Ucsnik, S., Pahr, D.H.: Experimental and numerical studies of a hybrid Metal-Composite Joint, *Composites Part A: Applied Science and manufacturing* 09 (2010)
- [USZ+10] Ucsnik, S., Scheerer, M., Zaremba, S., Pahr, D.H.: Experimental investigation of a novel hybrid Metal-Composite Joining Technology, *Composites Part A: Applied Science and manufacturing* (2010) 41, P.369–374
- [Wit10] Witten, E.: *Handbuch Faserverbundwerkstoffe: Grundlagen, Verarbeitung, Anwendungen* Leichtbau. Wiesbaden: Vieweg+Teubner GWV Fachverlage GmbH, 2010
- [WKK14] Witten, E.; Kraus, T.; Kühnel, N.: *Composites – Marktbericht 2014*, 2014
- [ZK05] Zhou, A., Keller, T.: Joining techniques for fiber reinforced polymer composite bridge deck systems, *Composite Structures*, 69, pp. 336–345, 2005

**Kontakt:**

Dr.-Ing. Alexander Schiebahn  
 Tel.: 0241 8097233  
 E-Mail: schiebahn@isf.rwth-aachen.de

# Weil die Zukunft zählt: Nachwuchsförderung durch den DVS

*Der DVS – Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e. V. unterstützt junge, engagierte Nachwuchskräfte auf ihrem Weg in die Füge-, Trenn- und Beschichtungsbranche mit verschiedenen Fördermaßnahmen. Viele davon sind für Studierende maßgeschneidert.*

Der alljährliche DVS-Studentenkongress beispielsweise gibt den Jungakademikern die Möglichkeit, ihre wissenschaftlichen Arbeiten vor Fachpublikum zu präsentieren. Wer diese Aufgabe besonders gut meistert, wird schlussendlich mit dem DVS-Studentenaward ausgezeichnet.

Für einen ordentlichen Schuss Praxiserfahrung bei den Nachwuchswissenschaftlern sorgen zudem Praxisworkshops, die der DVS regelmäßig anbietet. Bei diesen Veranstaltungen haben Studierende die Möglichkeit, gemeinsam namhafte

Firmen der Branche zu besuchen, Einblicke in deren Technologien zu gewinnen und oft selber auszuprobieren.

Neue Einblicke ermöglicht im Übrigen auch die Förderung der sogenannten IIW-Young Professionals. Organisiert vom DVS und mit Unterstützung von Firmenmitgliedern des Verbandes bekommen die Nachwuchswissenschaftler die einmalige Chance, an der Jahresversammlung des International Institute of Welding (IIW) teilzunehmen. Die Reise in ein fernes Land und die großartige Gelegenheit, internationale Kontakte zu knüpfen,

eröffnen dem Nachwuchs völlig neue Perspektiven.

Gute Zukunftsperspektiven entstehen auch aus dem SFI-Darlehen, das der Verband anbietet. Vorausgesetzt, der angehende SFI ist beitragszahlendes DVS-Mitglied und erfüllt auch die anderen Vorgaben, an die das Darlehen geknüpft ist.

Apropos Beitrag: Auszubildenden und Studierenden bietet der DVS kostenlose Basismitgliedschaften an. Komfortmitgliedschaften sind ebenfalls möglich. Diese sind an einen

Mitgliedsbeitrag geknüpft, beinhalten dabei jedoch auch den kostenlosen Bezug einer DVS-Fachzeitschrift.

Gute Einblicke in die Verbandsaktivitäten vermitteln übrigens die insgesamt 14 DVS-Studentengruppen an diversen Hochschulen in Deutschland. Eine davon besteht an der RWTH Aachen University ... Es lohnt sich, dort mitzumachen!

**Weitere Infos zur DVS-Nachwuchsförderung auf [www.die-verbindungs-spezialisten.de/nachwuchs](http://www.die-verbindungs-spezialisten.de/nachwuchs).**




**UNSER NETZWERK, DEINE ZUKUNFT  
WERDE MITGLIED IM DVS**

## 3D-Druckverfahren für große Bauteile

# ADDITIVE FERTIGUNG MIT DEM LICHTBOGEN

Konrad Willms, Rahul Sharma, Lukas Oster



Abbildung 1:  
MSG-Mehrdraht-Brenner und Heißdrahtstromquellen für bis zu drei Zusatzdrähte für die additive Fertigung mit erhöhten Abschmelzleistungen

Lichtbogen- und drahtbasierte additive Fertigungsverfahren gewinnen auf Grund ihrer Leistungsfähigkeit und Effizienz zunehmend an wirtschaftlicher Bedeutung. Metallschutzgas(MSG)-Mehrdrahtverfahren bieten hierbei hohe Abschmelzleistung bei gleichzeitig hoher Flexibilität. Demgegenüber lassen sich mit dem Wolframinertgas(WIG)- und dem Plasmaschweißverfahren insbesondere schwer zu verarbeitende Werkstoffe wie Titan- oder Nickelbasislegierungen additiv mit vergleichsweise hohen Abschmelzleistungen verarbeiten. Dieser Artikel gibt einen kurzen Überblick über den Stand der Technik sowie derzeitige Arbeiten am ISF.

### 1. EINLEITUNG

Additive Fertigungsverfahren zur Verarbeitung von metallischen Werkstoffen gewinnen im Zuge ressourcenschonender Produktion und erweiterter Leichtbaustrategien zunehmend an Bedeutung und liegen weltweit im Fokus aktueller Forschung und Entwicklung.

Dabei wird für die Verarbeitung metallischer Werkstoffe derzeit hauptsächlich auf pulverbasierte Verfahren gesetzt. Diese lassen sich je nach Art der Pulverzuführung in pulverbettbasierte- und tränergasbasierte Verfahren unterteilen. Populärste Vertreter dieser beiden Verfahrensansätze sind das Selective-Laser-Melting

(SLM), sowie das Laser-Pulver-Auftragschweißen (LC) [1, 2]. Beide Technologien finden bereits Anwendung in der konventionellen Fertigung [3]. Den geringen Abschmelzleistungen beider Verfahren und damit hohen Fertigungszeiten steht eine hohe Bauteilauflösung gegenüber [3]. Zur Herstellung kleinerer Bauteile wie Implan-

taten aus Titan oder kleinere Turbinenschaufeln aus Nickelbasislegierungen, haben sich die oben genannten Verfahren bereits weitreichend etabliert. Dennoch lassen sich Bestrebungen erkennen, auch strukturelle Großbauteile ressourcenschonend generativ zu fertigen. Insbesondere dann, wenn sie aus Legierungen bestehen, deren Herstellung und Bearbeitung sehr energie- und damit kostenintensiv ist [5, 6]. Hierzu zählen beispielsweise Titan- oder Nickelbasissuperlegierungen deren Verbreitung als Hochleistungswerkstoffe stark zunimmt [7].

Verfahren, welche ein hohes Potential für die Fertigung großer Bauteile mit gleichzeitig hohen Abschmelzleistungen aufweisen, sind Lichtbogen-schweißprozesse. In Deutschland als formgebendes Schweißen (Englisch: WAAM – Wire and arc manufacturing) bekannt, wird bei diesen Verfahren der Zusatzwerkstoff meist in Form von Draht mittels eines elektrischen Lichtbogens aufgeschmolzen und schichtweise aufgebracht. Potentiell anwendbare Schweißverfahren sind hierbei das WIG-Kaltdraht-Verfahren, MSG-Schweißen sowie das Unterpulver- und Plasmapulverauftragschweißen, wobei die beiden erstgenannten Verfahren derzeit im Fokus aktueller Forschungen liegen. Lichtbogenbasierte Verfahren weisen kaum Bauraumbeschränkungen auf, die Abschmelzleistung liegt mit 0,5–15 kg/h deutlich über den Pulverbasierten Verfahren [8–10]. Zusätzlich sind die Anlagen- und Betriebskosten verfahrensbedingt deutlich geringer als bei Laser- und Pulverbasierten Verfahren [1].

Bei Verwendung des MSG-Verfahrens entfällt darüber hinaus die Beschränkung auf Schweißposition PA, wodurch sich eine deutliche Steigerung der Flexibilität, sowie völlig neue Pfadplanungs- und Fertigungsansätze ergeben.

Ein Beispiel für die erfolgreiche Anwendung von Lichtbogen-schweißverfahren zur additiven Fertigung ist in der Luftfahrt zu finden. Die Umsetzung moderner Leichtbaustrategien in diesem Anwendungsbereich erfordert zunehmend eine Verbundbauweise mit kohlefaser-verstärkten Kunststoffen. Hier werden hochfeste Aluminiumlegierungen verstärkt durch Titanlegierungen substituiert [1, 11]. Um den Materialnutzungsgrad zu erhöhen wird dabei auf eine endkonturnahe Fertigung durch formgebendes Schweißen gesetzt, wodurch eine erhebliche Senkung des Buy-to-Fly-Ratios erzielt werden kann [12]. Neben der Nutzung lichtbogenbasierter, additiver Fertigungsverfahren für erweiterte Leichtbaustrategien sind zunehmend Bestrebungen zur Fertigung von komplexen Schwerkomponenten zu erkennen. Hierzu zählen beispielsweise die Fertigung von Schiffsschrauben aus Nickel-Aluminium-Bronze(NAB)-Legierungen oder die Herstellung von Turbinenschaufeln mit dem MSG-Verfahren [13]

## 2. MSG-HEISSDRAHT-SCHWEISSEN FÜR ERHÖHTE ABSCHMELZLEISTUNGEN

Hinsichtlich der additiven Fertigung mit dem Lichtbogen ist im besonderen Maße auf eine reduzierte Wärmeeinbringung zu achten, da die konduktive Wärmeabfuhr aus der Prozesszone bei zunehmendem

Lagenaufbau mitunter deutlich schlechter ist, als bei Verbindungsschweißungen. Eine Erhöhung der Drahtfördergeschwindigkeit des MSG-Verfahrens führt insbesondere beim Betrieb im Sprühlichtbogen zu Wärmestau und unkontrolliertem Aufschmelzen des Werkstücks. Um die Abschmelzleistung des MSG-Verfahrens dennoch zu erhöhen, können dem Prozess extern Zusatzdrähte zugeführt werden. Hierdurch wird dem Schmelzbad Wärme entzogen, der Einbrand verringert und gleichzeitig die Abschmelzleistung gesteigert. Der am ISF verwendete Versuchsaufbau besteht aus einem MSG-Maschinenbrenner, kombiniert mit drei Heißdrahtzuführungen der Firma EWM (**Abbildung 1**).

Wesentliche Einflussgröße auf die Prozessstabilität ist die Ausrichtung der Heißdrähte relativ zum Lichtbogen und der Schweißrichtung. Kleine Abweichungen können hierbei einen massiven Einfluss auf die Schmelzbadformung haben. Durch den Einsatz von Zusatzdrähten ist es möglich, den Prozess auch im Sprühlichtbogenbereich zu betreiben, ohne unkontrolliertes und großvolumiges Wiederaufschmelzen des Bauteiles in der Fertigung zu riskieren. Untersucht wird der Prozess hinsichtlich seiner maximal erreichbaren Abschmelzleistung unter Einhaltung der vorgegebenen Zielgeometrie. Zusätzlich werden die Strukturen hinsichtlich ihrer mechanisch-technologischen Eigenschaften charakterisiert.

## 3. PLASMA-MEHRDRAHTSCHWEISSEN

Schweißverfahren mit nicht abschmelzender Elektrode bie-



ten den besonderen Vorteil, dass Wärmeeinbringung und Abschmelzen von Schweißzusatz voneinander unabhängige Prozessparameter sind. Werden mehrere Drähte unterschiedlicher Legierungen in die Prozesszone eingebracht, besteht die Möglichkeit des in situ-Legierens. Hierbei wird die gewünschte chemische Zusammensetzung des Schmelzbades erst im Prozess selber eingestellt. Der kinetische Gasstrom des Plasmaprozesses, zusammen mit der erhöhten Energiedichte soll hierbei im Vergleich zum WIG-Prozess für eine bessere Schmelzbad-durchmischung sorgen. Als Versuchsaufbau wird ein Plasmaschweißbrenner um bis zu drei Heißdrahtzuführungen der Firma EWM AG erweitert, **Abbildung 2**.

Neben den Fördergeschwindigkeiten der zugeführten Drähte muss auch der Aufmischungsgrad als zusätzliche Komponente der Legierungsbildung berücksichtigt werden. Für Strukturen, die additiv auf einer Substratplatte hergestellt werden, muss ein Bereich von mehreren Pufferlagen vorgesehen werden, um die Einflüsse des Grundwerkstoffes auf das Legierungskonzept der Auftragschicht auszugleichen. Mögliche Einsatzgebiete des in situ-Legierens können die additive Verarbeitung von Titan- oder Eisenaluminiden, Bronzelegierungen und ähnlichen Werkstoffen sein.

Durch Variation der Drahtfördergeschwindigkeiten im laufenden Prozess besteht zusätzlich die Möglichkeit, Strukturen mit gradiertem chemischer Zusammensetzung herzustellen. Dabei folgt einer Erhöhung der Drahtförderge-

windigkeit eines Drahtes gleichermaßen eine Verringerung der Fördergeschwindigkeit des/der jeweils anderen Drahtes/Drähte um die summierte Abschmelzleistung konstant zu halten. Hierdurch ist es möglich, gezielt eine Vielzahl unterschiedlicher schweißtechnischer Legierungskonzepte und deren Verhalten in Bezug auf Mischverbindungen unter deutlich verringertem Fertigungs- und Versuchsaufwand zu untersuchen.

Neben der vereinfachten Generierung von gradierten Schweißgütern für werkstofftechnische Untersuchungen, können auch Bauteile mit gradierten mechanisch-technologischen Eigenschaften hergestellt werden. Denkbar ist beispielsweise eine Kombination von Werkstoffen mit stark variierenden thermischen Ausdehnungskoeffizienten, um die delta-alpha-Problematik unter thermischer Wechsellast zu umgehen.

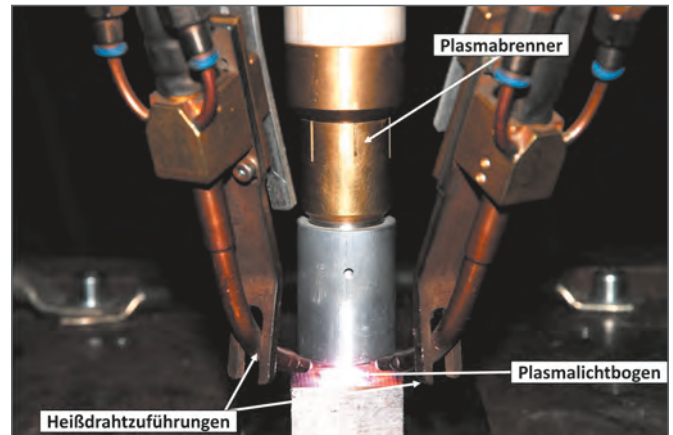


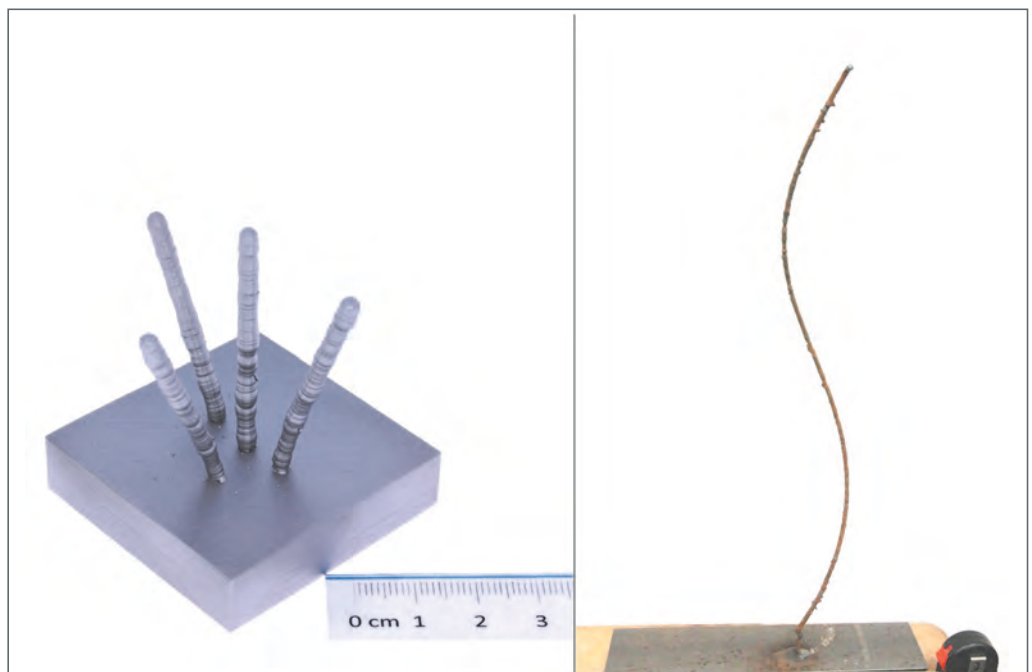
Abbildung 2: Plasma-Mehrdraht-Brenner zur additiven Fertigung von Strukturen mit gradiertem chemischer Zusammensetzung

#### 4. KOMPLEXE PFADPLANUNG FÜR ROBOTERGEFÜHRTE ADDITIVE FERTIGUNG

Robotergeführtes MSG-Punktschweißen bietet die Möglichkeit, hochkomplexe metallische Großstrukturen zu fertigen, **Abbildung 3**. Insbesondere hinsichtlich der Pfadplanung ergeben sich hierbei völlig neuartige Ansätze der Pfadplanung (Slicing) und der Fertigungsplanung.

Größte Herausforderung bei vollautomatisierter Fertigung

Abbildung 3: Inkrementelles Punktschweißen als 3D-Druckverfahren mit komplexer dreidimensionaler Bahnplanung



ist, eine adaptive Prozessführung zu implementieren, welche insbesondere für einen konstanten Stromkontaktrohrabstand zwischen einzelnen Schweißungen sorgt und gleichzeitig Bauteilverzug ausgleicht. In Zusammenarbeit mit dem Institut für individualisierte Bauproduktion (IP) der RWTH Aachen werden neuartige Konzepte zur komplexen Pfad- und Fertigungsplanung untersucht. Ziel ist es, herkömmliche Slicing-Methoden, welche auf 2,5D Ansätzen aus dem Bereich der Werkzeugmaschinenprogrammierung basieren, durch eine 3D-Pfadplanungsstrategie zu ersetzen. Eine umfängliche Fertigungsplanung umfasst hierbei neben der eigentlichen Pfadgenerierung auch die Wärmeleitung sowie den erwarteten Verzug zu berücksichtigen. Daneben muss eine Routine für den Umgang mit Prozessfehlern wie beispielsweise Fehlzündungen entwickelt werden. Die Prozessüberwachung erfolgt hierbei neben der transienten Messung von Strom- und Spannungsverläufen, durch optische Messtechnik.

Durch eine ganzheitliche Betrachtung von Lichtbogenschweißverfahren für die additive Fertigung hinsichtlich Pfadplanung, Prozessverständnis und neuartigen, innovativen Anwendungsfeldern soll ein Beitrag für die langfristige Implementierung dieser Fertigungstechnologie in moderne Produktionsprozesse geleistet werden.

Besonderer Dank geht an dieser Stelle an die EWM AG für die großzügige Unterstützung der Forschungsarbeiten durch Bereitstellung von Anlagentechnik.

#### Literatur

- [1] Ding, D., Z. Pan, D. Cuiuri und H. Li, 2015. Wire-feed additive manufacturing of metal components [online]. Technologies, developments and future interests. In: The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81 (1–4), 465-481. ISSN 0268-3768. Verfügbar unter: doi:10.1007/s00170-015-7077-3
- [2] Santos, E. C., M. Shiomi, K. Osakada und T. Laoui, 2006. Rapid manufacturing of metal components by laser forming [online]. In: International Journal of Machine Tools and Manufacture, 46 (12–13), 1459-1468. ISSN 08906955. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.ijmactools.2005.09.005
- [3] Gebhardt, A., 2013. Generative Fertigungsverfahren. München: Carl Hanser Verlag GmbH & Co. KG. ISBN 978-3-446-43651-0.
- [4] T. Töppel, 2016. Eigenspannungen und Verzug bei der additiven Fertigung durch Laserstrahlschmelzen. In: Schweißen und Schneiden 68, (4), 176–186.
- [5] Million, K., R. Datta und H. Zimmermann, 2005. Effects of heat input on the microstructure and toughness of the 8 MnMoNi 5 5 shape-welded nuclear steel [online]. In: Journal of Nuclear Materials, 340(1), 25-32. ISSN 00223115. Verfügbar unter: doi:10.1016/j.jnucmat.2004.10.093
- [6] Williams, S.W., 2017. The "LASIMM" project: development of novel hybrid approaches for additive and subtractive manufacturing machines. In: Welding and Cutting 16 (2017) No. 1, (16).
- [7] Eggert, P., A. Haid, E. Wettig, M. Dahlheimer, M. Kruszona und H. Wagner, 2015. Auswirkungen der weltweiten Konzentration in der Bergbauproduktion auf die Rohstoffversorgung der deutschen Wirtschaft: Duncker & Humblot GmbH. ISBN 9783428502738.
- [8] Piehl, K.H., 1989. Formgebendes Schweißen von Schwerkomponenten. In: Thyssen, Technische Berichte, (21, 1), 53–71.
- [9] Hartke, M., K. Günther und J.P. Bergmann, 2014. Untersuchung zur geregelten, energiereduzierten Kurzlichtbogentechnik als generatives Fertigungsverfahren. Düsseldorf: DVS Media. DVS-Berichte. 306. ISBN 3-945023-03-3.
- [10] DVS – DEUTSCHER VERBAND FÜR SCHWEISSEN UND VERWANDTE VERFAHREN E.V. 0964, Merkblatt DVS 0964 – Unterpulver-Doppeldrahtschweißen. Düsseldorf: Verlag für Schweißen und verwandte Verfahren DVS-Verlag.
- [11] Harald Schreckenberger, 2013. Risiko der Kontaktkorrosion bei CFK-Bauteilen. In: WOMag, (04).
- [12] S. W. Williams, F. Martina. Wire + Arc Additive Manufacturing.
- [13] Ding, D., Z. Pan, S. van Duin, H. Li und C. Shen, 2016. Fabricating Superior NiAl Bronze Components through Wire Arc Additive Manufacturing [online]. In: Materials, 9(8), 652. ISSN 1996-1944. Verfügbar unter: doi:10.3390/ma9080652
- [14] Frazier, W.E., 2014. Metal Additive Manufacturing [online]. A Review. In: Journal of Manufacturing Science and Engineering, 23(6), 1917–1928. ISSN 1087-1357. Verfügbar unter: doi:10.1007/s11665-014-0958-z

#### Kontakt:

Rahul Sharma, M. Sc.  
Tel.: 0241 80-96267  
E-Mail: sharma@  
isf.rwth-aachen.de

# Mit OTC spritzerfrei schweißen – auch in 3D

*OTC DAIHEN EUROPE GmbH ist einer der weltweit führenden Hersteller für Automatisierungslösungen der Schweißtechnik und des Materialhandlings. Dank neuester Technologien hat sich das japanische Unternehmen eine besondere Vorreiterrolle beim automatisierten MIG/MAG-Schweißen erarbeitet.*

Das aus der Eigenentwicklung stammende SynchroFeed-Verfahren erfüllt die gestiegenen Ansprüche der Industrie, mittlere bzw. dünne Bleche verformungsfrei zu schweißen, Spalttoleranzen stärker zu berücksichtigen und vor allem Schweißspritzer drastisch zu reduzieren. Nur über die erhöhte Präzision des Drahtvorschubs ist das spritzerfreie Schweißen überhaupt erst möglich. Die daran beteiligten Komponenten bestehen aus OTC Roboter (FD-B6), Schweißstromquelle (OTC Welbee P500L), Push Feeder Einheit, Drahtpuffer, Hochleistungswechselhalsbrenner und Robotersteuerung. Sämtliche Einheiten kommunizieren in exakt synchronisierter Geschwindigkeit miteinander.

Im Zuge der Qualitätssteigerung beim automatisierten Lichtbogenschweißen hat sich das gepulste MIG Wechselstromschweißverfahren von OTC (kurz: AC/MIG) durchgesetzt. Dabei wird die Steuerung des Schweißstroms mit der Drahtvorschubgeschwindigkeit präzise synchronisiert, um das Schmelzbad zu optimieren. AC/MIG ermöglicht bei geringem Schweißstrom, konstanter Schweiß-

geschwindigkeit und unverminderter Förderrate eine weitaus größere Spaltüberbrückbarkeit.

Zu den weiteren schweißtechnischen Pionierleistungen bei OTC zählt das 3D-Metallschweißen: Auch hier kommt das robotergestützte SynchroFeed-Schweißverfahren zum Einsatz, um bei einer Geschwindigkeit von 80 cm/Min. Prototypen oder Kleinserien zu fertigen. Das Geheimnis liegt in der präzisen Steuerung des Lichtbogens, um eine optimale Abschmelzung des Materials zu erzielen. Bei allen 3D-Schweißkonstruktionen kommt es auf die materialspezifische Wärmeeinbringung an. Für einzelne Industriebereiche wie die Luftfahrtindustrie, die sich auf kleine Auflagen beschränken, ist das 3D-Metallschweißen von Vorteil. Das gilt auch für mittelständische Betriebe, die Einzelstücke oder Kleinserien produzieren.

Nähere Informationen erhalten Sie von: Katharina Klötergens, Marketing

**OTC DAIHEN EUROPE GmbH**

**Tel.: +49 (0)2161 6949714**

[Katharina.Kloetergens@otc-daihen.de](mailto:Katharina.Kloetergens@otc-daihen.de)



Abb. 1: SynchroFeed Schweißrobotersystem mit OTC Roboter (FD-B6), Schweißstromquelle (OTC Welbee P500L), Push Feeder Einheit, Drahtpuffer, Hochleistungswechselhalsbrenner und Robotersteuerung.

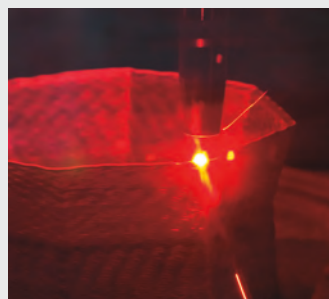


Abb. 2: 3D-Metalldruck mit SynchroFeed von OTC (eingehaust)



## DIE NEWCOMER IM PROFILAGER.

**Welbee W 400**



**Das High-Light für hochwertiges AC/MIG Schweißen**

- Optimale Steuerung des Energieeintrages durch AC-Pulseschweißen
- Hochgeschwindigkeits AC-Pulseschweißen durch verbesserte Charakteristiken für das jeweilige Material
- Nahtaussehen wie WIG geschweißt durch AC Wave Pulse Technologie
- Hohe Abschmelzrate, Einbrandkontrolle
- Erweiterter Anwendungsbereich durch 400 A bei 40% Einschaltdauer

**Welbee T 500 P**

**Präzise Einstellung und Lichtbogenstabilität auch im unteren Schweißstrombereich**

- Hohe Dynamik bis 500 A
- Variable und präzise Einstellung von 2–500 A in 0,1-A-Schritten (bis max. 10 A)
- Synergie-Funktion für verschiedene Nahtgeometrien
- Durch die Welding-Control-Funktion werden Fehler früh erkannt



## ZUKUNFTSWEISENDE PROZESSE FÜR BESTE SCHWEISSERGEBNISSE:



Optimale Einbrandkontrolle und Spaltüberbrückung bei Dünnblechanwendungen.



Erweiterter Frequenzbereich (0,5–32 Hz) durch die AC&DC Wave Pulse Funktion.



Stabiler und konzentrierter Lichtbogen sowohl für Hochgeschwindigkeitsanwendungen als auch Wurzelschweißungen.

# Aluminiumschweißdraht jetzt „Made in Germany“

Die MIGAL.CO GmbH (vorher MIG WELD GmbH International) mit Sitz in Landau/Isar hat im vergangenen Jahr eine eigene Fertigung für Schweißzusätze aus Aluminiumlegierungen errichtet. Eine neu gebaute Werkshalle wurde mit modernsten Drahtproduktionsmaschinen für das Schälen, Ziehen, Spulen und Verpacken von Drahtelektroden und Stäben zum MSG- und WIG-Schweißen ausgerüstet. Durch den Einsatz von schlupffreien Ziehmaschinen der neuesten Generation, sowie permanenter Laserüberwachung der hergestellten Drähte wird eine optimale Oberfläche erzielt. Mit einem eigens dafür abgestellten

Schweißroboter und einer digitalen Röntgenanlage wird die Produktqualität überwacht. Als weltweite Neuheit werden alle Spulen von 0,5 bis 40 kg in Aluminiumverbundfolie vakuumverpackt. Dies gewährleistet einen sicheren Schutz gegen Kondensation und ermöglicht dem Anwender die Unversehrtheit der Verpackung zu kontrollieren.

Gemeinsam mit den erst kürzlich vorgestellten Rollinern der dritten Generation und den innovativen Drahtförderprodukten bietet MIGAL.CO nun komplette Systemlösungen für die Versorgung mit Aluminiumschweißdrähten an.



**MIGAL.CO GmbH**  
Wattstraße 2  
D-94405 Landau  
info@migal.co  
www.migal.co

**NEU: Aluminiumzusätze aus modernster Fertigung von MIGAL.CO**

**Ihr Schlüssel**  
zum perfekten Schweißen.



**MIGAL.CO GmbH**  
D-94405 Landau/Isar, Wattstraße 2  
Fon +49(0)9951/69059-0  
Fax +49(0)9951/69059-3900  
info@migal.co  
www.migal.co

**migal.co**  
WIR SIND AUF DRAHT!

# INNOVATIVES THERMISCHES FÜGEN VON STAHL UND ALUMINIUM

Matthias Angerhausen,

Alexandros Pipinikas und Thorsten Twiehaus

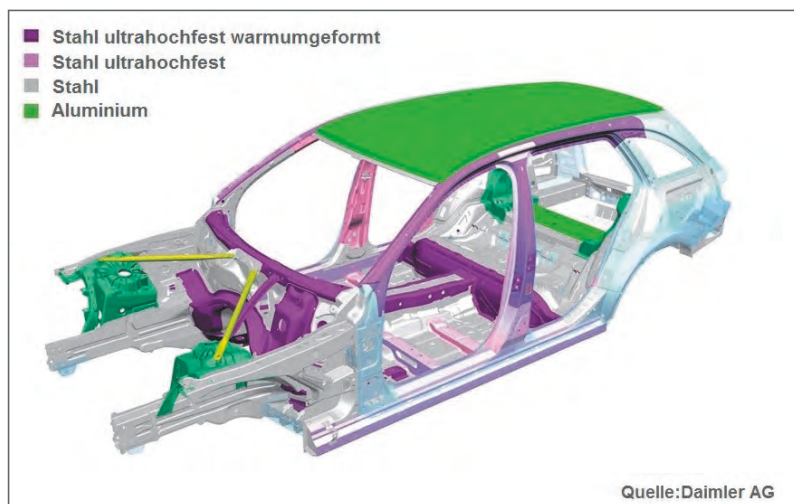


Abbildung 1: Innovative Hybridkarosserie am Beispiel der C-Klasse von Mercedes-Benz

Aufgrund steigender ökonomischer und ökologischer Anforderungen ist der moderne Automobilbau zunehmend bemüht sowohl leichte als auch crasht sichere Fahrzeuge herzustellen. Durch diese Anforderung an den modernen Leichtbau hat das thermische Fügen von Stahl und Aluminium in den letzten Jahren zunehmend an Bedeutung gewonnen. Eine Kombination dieser beiden Werkstoffe ermöglicht, die jeweiligen positiven Eigenschaften gezielt in der Gestaltung der Konstruktion auszunutzen. In diesem Zusammenhang wurden vermehrt Prozessentwicklungen im Bereich des MSG-Schweißlötens in Kombination mit einem Aluminiumzusatzwerkstoff vorangetrieben. Nachteilig bei dieser Fügestrategie ist die Bildung eines sogenannten intermetallischen Phasensaums im Bereich der Fügezone aufgrund der stark unterschiedlichen Werkstoffeigenschaften von Stahl und Aluminium. Dieser Saum ist sehr spröde und kann bei einer überkritischen Ausbildung zu einem frühzeitigen Versagen der Verbindung von Stahl und Aluminium führen.

Um diesen Herausforderungen zu begegnen, wurde im ISF der RWTH Aachen eine Fügestrategie entwickelt, welche gezielt die Bildung spröder intermetallischer Phasen im Bereich der Fügezone in Kauf nimmt, wobei deren negativer Einfluss auf die Festigkeitseigenschaften der Verbindung reduziert wird. Um dies zu ermöglichen, wurde ein niedrigerenergetischer Kurzlichtbogenprozess mit einem niedrigschmelzenden Zinkbasislot ZnAl4 verwendet.

### EINLEITUNG UND AUSGANGSSITUATION

Aktuelle Leichtbaustrategien zeigen, dass Aluminiumwerkstoffe aufgrund ihres geringen spezifischen Gewichts immer häufiger in modernen Automobilkarosserien eingesetzt werden und somit konventionelle Stähle substituieren, **Abbildung 1.**

Beim thermischen Fügen von Werkstoff-Mischverbindungen werden in verschiedenen Anwendungsfällen Zusatzwerkstoffe eingesetzt, welche möglichst artgleich mit einem der beiden Fügepartner sind. In diesem Zusammenhang wird auch beim Fügen von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen der Ansatz verfolgt, einen aluminiumbasierten Draht zu verwenden. Dabei wird der Aluminiumwerkstoff aufge-

schmolzen während der Stahlwerkstoff durch das Schmelzbad, ähnlich einer Lötung, lediglich benetzt wird. Da es bei dieser sogenannten Schweißlötung dennoch zum Anschmelzen des Stahlbleches kommen kann und die Elemente Eisen und Aluminium bei Raumtemperatur nicht in Lösung gehen, entsteht ein intermetallischer Phasensaum (IMP). Im Fall des Phasensystems Fe-Al bestehen die IMP aus chemischen Verbindungen der Elemente Eisen und Aluminium. Die IMP unterscheiden sich aufgrund ihrer Bindungsarten von gewöhnlichen Metallen in ihren physikalischen und mechanischen Eigenschaften.

Die Bildung der IMP kann nicht verhindert werden, da sie immer auftritt, sobald Fe und Al im schmelzflüssigen Zustand vorliegen, was beim Schweißlöten zu einem gewissen Anteil immer der Fall ist. Für das Phasensystem Fe-Al besitzen diese Phasen eine hohe Härte, was gleichzeitig eine geringe Zähigkeit zur Folge hat. Dies führt zu einer Verringerung der Festigkeitseigenschaften der Verbindung.

Frühere Fügeuntersuchungen haben gezeigt, dass sich die intermetallischen Phasen vorwiegend in Form eines zusammenhängenden Saums an der Oberseite des Stahlblechs bilden. Aufgrund der spröden

Eigenschaften können sich Risse schnell entlang dieses Phasensaums verbreiten, so dass Stahl-Aluminium-Mischverbindungen unter Einsatz von Aluminiumzusatzwerkstoffen bereits unter geringen mechanischen Belastungen schlagartig versagen, **Abbildung 2.**

Um eine weniger spröde Stahl-Aluminium-Mischverbindung zu erzeugen, wird in der Literatur eine Phasensaumdicke unter 10µm empfohlen. Dabei hängt der Grad der Ausbildung eines intermetallischen Phasensaums direkt von der Energieeinbringung durch das Fügeverfahren in die Prozesszone ab.

Für den konkreten Anwendungsfall bietet diese Herangehensweise den Nachteil, dass zur Sicherstellung einer Phasensaumdicke kleiner 10µm nach heutigem Stand der Technik nur zerstörende Prüfmethoden einsetzbar sind. So ist im Anschluss an das Fügen von Stahl-Aluminium-Mischverbindungen eine Vorhersage der möglichen mechanischen Belastbarkeit der Verbindung mit zerstörungsfreien Prüfmethoden nur mit einer großen Unsicherheit möglich. Diese vor allem die Qualitätssicherung betreffenden Herausforderungen erschweren einen industriellen Einsatz dieser Technologie.

### VORGEHENSWEISE UND ERGEBNISSE

Um den negativen Einfluss der entstehenden intermetallischen Phasen auf die Festigkeitseigenschaften der Fügeverbindung zu verringern oder gar zu eliminieren, wurde am ISF die Strategie verfolgt, beim thermischen Fügen von Stahl und Aluminium

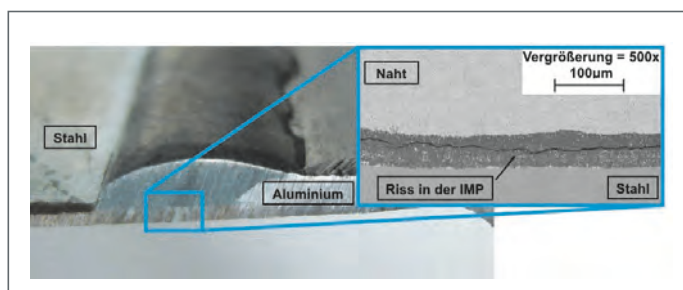


Abbildung 2:  
St-Al-Mischverbindung mit Aluminiumzusatzwerkstoff und Riss in der IMP

anstelle eines artgleichen Aluminiumzusatzwerkstoffes einen Draht auf Basis von Zink zu verwenden (ZnAl4).

Auch für den Einsatz eines zinkbasierten Zusatzwerkstoffes wird das Prinzip des Schweißlötens beibehalten. Dabei besitzt Zink allerdings einen deutlich tieferen Schmelzpunkt (ca. 420°C) als Stahl (1400°C) und Aluminium (660°C). Daraus folgt, dass für das thermische Fügen unter Verwendung von Zinkbasisloten niedrigere Prozesstemperaturen nötig sind. Niedrigere Prozesstemperaturen ergeben eine geringere Energieeinbringung in die Fügezone, so dass die Bildung von IMP reduziert wird. Zudem verbleibt der zinkbasierte Zusatzwerkstoff länger im flüssigen Zustand als die Aluminiumschmelze.

Ein weiterer Aspekt der verfolgten Strategie zur Reduzierung der Energieeinbringung in die Fügezone ist die Verwendung eines energiearmen, digital geregelten Kurzlichtbogenweißprozesses, in diesem Fall des CMT-Prozesses. Die Besonderheit des CMT-Prozesses (Cold Metal Transfer) liegt darin, dass die Stromquelle den Kurzschluss zwischen aufgeschmolzenen Zusatzwerkstoff und dem Schmelzbad erkennt und die Stromstärke entsprechend auf ein sehr niedriges Niveau reduziert. Somit entsteht ein vergleichsweise kalter Tropfen an der Drahtspitze und der Materialübergang des Zusatzwerkstoffes in das Schmelzbad erfolgt nahezu stromlos. Der Tropfenübergang wird zusätzlich von einer Rückbewegung des Drahtendes mechanisch unterstützt, welche durch einen Servomotor am Brenner ermöglicht wird.

Um die Energiezufuhr in die zu fügenden Stahl- und Aluminiumbleche zum Teil unabhängig von der Drahtvorschubgeschwindigkeit des CMT-Prozesses zu gestalten, wurde zu Untersuchungszwecken ein WIG-Brenner als zusätzliche Wärmequelle vor den CMT-Brenner geschaltet. Auf diese Weise war es möglich verschiedene Energiebereiche und somit unterschiedliche zur vollständigen Erstarrung der Naht nötige Zeitintervalle für gleiche Drahtfördergeschwindigkeiten zu untersuchen, **Abbildung 3**.

Mit dieser Vorrichtung konnte zusätzlich ein gezielt längeres Halten der Schmelze in einem gewissen Temperaturintervall zur gewünschten Ausbildung der intermetallischen Phasen realisiert werden. Der WIG-Brenner wurde ohne Zusatzwerkstoff eingesetzt und erlaubte durch gezielte Einstellung von niedrigen Stromstärken eine direkte Beeinflussung der in die Fügezone eingebrachten Energie. Basierend auf den gewonnenen Erkenntnissen unter Zuhilfenahme des WIG-Prozesses wurden im Anschluss mehrere Prozessparameter in der Programmierenebene der Stromquellenkennlinie des CMT-Prozesses modifiziert. In diesem Zusammenhang wurden die Kennlinienparameter so angepasst, dass der CMT-Prozess ausreicht, um Stahl und Aluminium unter Verwendung von Zinkbasisloten prozesssicher zu fügen.

Mit Hilfe der entwickelten Fügestrategie können Stahl-Aluminium-Mischverbindungen mit Grundwerkstofffestigkeiten unter Verwendung eines zinkbasierten Zusatzwerkstoffes hergestellt werden. Für die

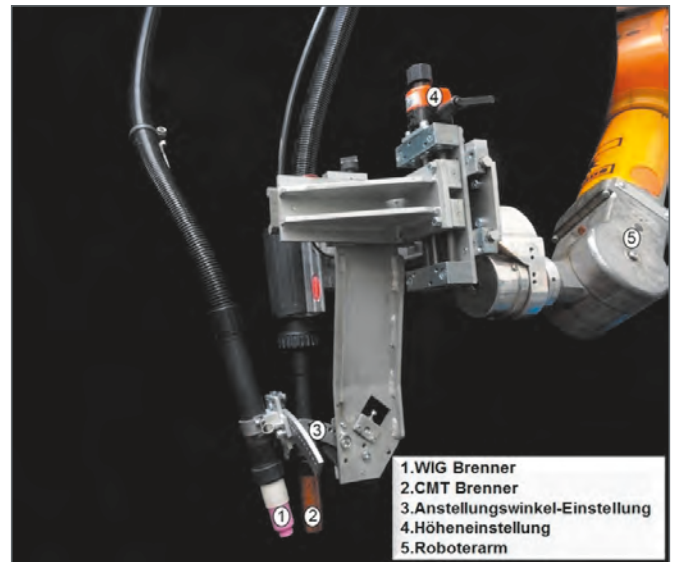
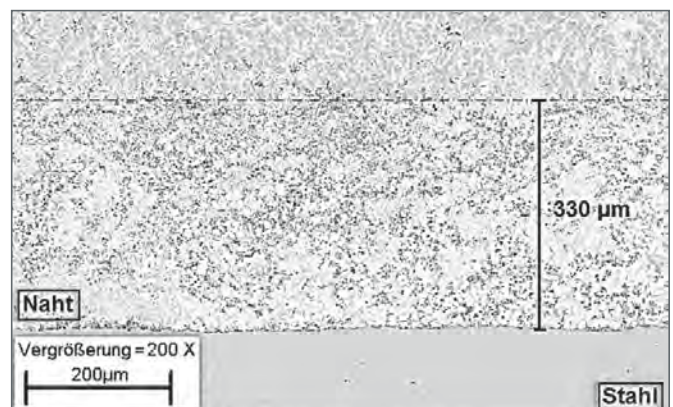


Abbildung 3:  
WIG-CMT-Brennervorrichtung

untersuchte Materialkombination ist der Einfluss der Prozessparameter auf das Fügeergebnis soweit analysiert und bewertet, dass sich die gewünschte Phasenablösung prozesssicher einstellen lässt. Die aus der Prozessführung resultierende Phasenverteilung innerhalb der Naht einer Stahl-Aluminium-Mischverbindung ist in **Abbildung 4** beispielhaft dargestellt.

Innerhalb der Naht liegt kein spröder zusammenhängender Phasensaum vor, sondern eine statistische Verteilung von Phaseinseln bis zu einem Abstand von 330µm von der Stahloberfläche entfernt.

Abbildung 4:  
Spröde Phaseninsel in duktilerer Zinklötnaht verteilt



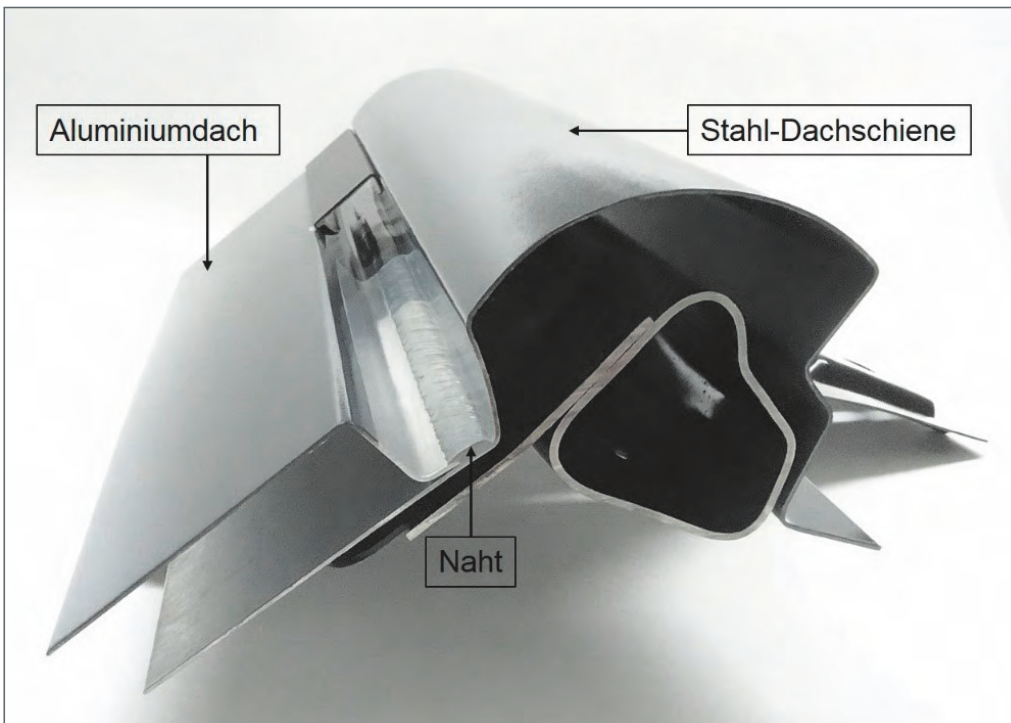


Abbildung 5:  
PKW-Dachausschnitt aus Stahl (Dach-  
schiene) und Aluminium (Dach)

Bei der sich während des Fügeprozesses ausgebildeten IMP wird ab einer kritischen Dicke eine Rissausbildung initiiert, welche zum Aufbrechen des Phasensaums führt. Wegen der höheren Dichte der Zinkschmelze und ihrer Beweglichkeit als Fluid ist es möglich, dass Teile der Zinkschmelze in die aufgerissenen Bereiche der Phase aus dem Schweißzusatzwerkstoff fließen. So kommt es zu der Besonderheit, dass bereits teilweise erstarrte Phasen von noch flüssiger Zinkschmelze durchdrungen und geteilt werden. Die Bruchfragmente werden durch die Zinkschmelze gebunden und die fortschreitende Rissausbildung kann gestoppt werden. Durch die geringere Dichte dieser Phasen erfahren die Phasen eine Auftriebskraft im noch flüssigen Schmelzbad und verteilen sich über die Höhe der Naht. Diese feine Verteilung der IMP führt dazu, dass die teilweise vorhandenen negativen Ein-

flüsse der spröden IMP durch die Einbindung in die duktilere Zink-Matrix kompensiert werden können.

Erreicht wird dieses Ziel durch eine gezielt gesteuerte Temperaturführung während des Prozesses. Die gewünschte Verteilung der IMP über den gesamten Nahtbereich wird durch eine Ausdehnung des Abkühlintervalls der Schweißnaht im Bereich von 550 °C bis 380 °C erreicht. Für dieses Temperaturfenster wurde das Ablaufen der für eine Ablösung des intermetallischen Phasensaums vom Stahlblech relevanten Phasenumwandlungen identifiziert. Prozesstechnisch wird dieses Ziel durch eine gezielte Wärmeführung und eine geänderte Wärmeabfuhr aus dem Prozessbereich erreicht.

Um die Potentiale des energiearmen Fügens von Stahl und Aluminium unter Einsatz von Zinkbasisloten zu veranschau-

lichen und auf eine reale Anwendung zu übertragen, wurde ein Demonstratorbauteil hergestellt. Als möglicher Anwendungsbereich in der Automobilindustrie wurde die Verbindung einer Dachschiene aus einem hochfesten Stahlwerkstoff an ein Dachblech aus Aluminium identifiziert und in Form des Demonstrators realisiert, **Abbildung 5**.

Die Nahtoberflächen zeigen eine ansprechende Nahtoptik, welche auch für den Einsatz im Sichtbereich geeignet ist.

#### FAZIT UND AUSBLICK

Anhand der Untersuchungen und des gefertigten Demonstratorbauteils konnte gezeigt werden, dass Stahl-Aluminium-Mischverbindungen prozesssicher thermisch gefügt werden können. Am Institut für Schweißtechnik und Füge-technik der RWTH Aachen wurde eine Fügestrategie entwickelt, welche eine statistische Verteilung von spröden intermetallischen Phaseinseln im Nahtquerschnitt ermöglicht. Auf diese Weise wird der negative Einfluss von spröden IMP unter Verwendung von Zinkbasiszusatzwerkstoffen entschärft. Weiterführende Untersuchungen sollen den Prozess für den industriellen Einsatz ertüchtigen.

#### Kontakt

Dipl.-Ing. Matthias  
Angerhausen  
Tel.: 0241 99008513  
E-Mail: angerhausen@  
isf.rwth-aachen.de



# Das Beste aus einer Hand im Bereich der Rohrtrenn-, -anfas- und Orbitalschweißtechnik

Schon über 40 Jahre setzen Anlagenbauer auf den vom Marktführer **Orbitalum Tools** geprägten Standard in der Rohrendenvorbereitung. **Orbitalum Tools GmbH** in Singen, Deutschland und **E.H. Wachs**, Lincolnshire, Illinois/USA, bilden zusammen die „**ITW Orbital Cutting & Welding**“ Gruppe (kurz: **ITW OCW**), ein Geschäftsbereich des US-amerikanischen Industriekonzerns **ITW** (Illinois Tool Works).

Orbitalum Tools ist dabei weltweit führender Anbieter für Komplettlösungen in der industriellen Vorfertigung, Installation und Instandhaltung von Rohrleitungssystemen – vom Trennen des Rohres über das Vorbereiten der Schweißnaht bis hin

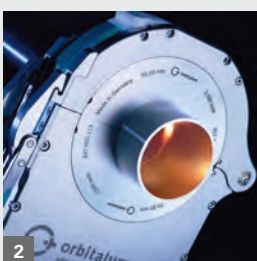
zum orbitalen Schweißen im Prozess- und Anlagenbau.

E.H. Wachs hat sich mit seinen hochwertigen, nahezu unverwundlichen, portablen und bedienerfreundlichen Rohrbearbeitungsmaschinen zum Trennen und Anfasen in vielen Branchen etabliert: in der Öl- und Gas-Industrie, Chemischen Industrie, dem Pipeline- sowie Schiffbau – in der Vorfertigung, der Wartung, der Reparatur und im Rückbau von Anlagen.

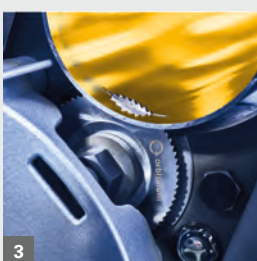
Die **ITW Orbital Cutting & Welding** Gruppe steht weltweit für beste und wirtschaftlichste Technologie rund um das orbitale Trennen und Schweißen.



**Abb. 1:** Mehr Qualität, Sicherheit und Flexibilität beim Orbitalschweißen durch Industrie 4.0-Technologie: Mit der neuen Orbitalschweißstromquelle **ORBIMAT 180 SV**.



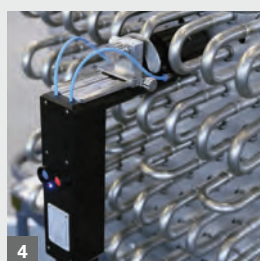
**Abb. 2:** Geschlossene WIG-Orbitalschweißköpfe **ORBIWELD** – ideal für Anwendungen unter beengten Platzverhältnissen, wie z.B. in der Pharma-, Chemie-, Halbleiter- und Lebensmittelindustrie sowie in der Luft- und Raumfahrt.



**Abb. 3:** Rohre präzise, rechtwinklig und gratfrei trennen und anfasen mit der **GF-/RA-Serie**. Seit über 40 Jahren setzen Anlagenbauer auf den von **Orbitalum** geprägten Standard in der industriellen Rohrendenvorbereitung.

**Abb. 4:** Orbitalschweißköpfe **HX** zum Verschweißen vormontierter Bögen in engen Rohrbündeln von Lamellenwärmetauschern. Für diese Anwendung gibt es weltweit keine vergleichbar effektive Lösung.

Fotos: **Orbitalum Tools GmbH**



A brand of **ITW Orbital Cutting & Welding**



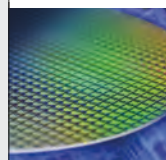
Nahrungsmittel-, Molkerei- und Getränke-industrie



Pharma-, Biotech- und Chemie-industrie



Orbitalschweißstromquellen und Orbitalschweißköpfe

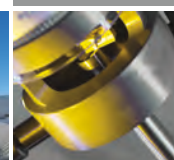


Halbleiter-industrie

Rohrtrenn- und Anfasmaschinen



Heizungs-, Klima- und Lüftungstechnik (HVAC)



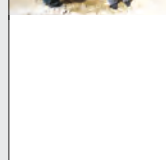
Luft- und Raumfahrt



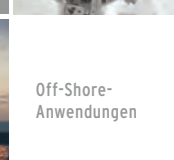
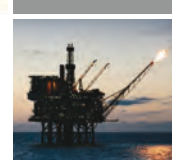
Rohrplan- und Rohrendbearbeitungsmaschinen



Mobile und teilbare Rohrtrenn- und Anfasmaschinen



Off-Shore-Anwendungen



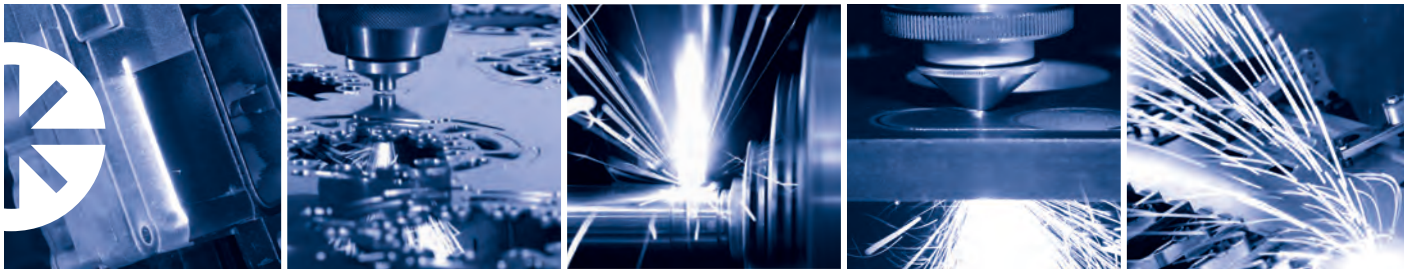
Pipeline, Öl und Gas sowie Petrochemie



*Das Beste aus einer Hand im Bereich der Rohrtrenn- und Anfas- sowie Orbitalschweißtechnik.*

**ORBITALUM TOOLS GMBH**  
D-78224 Singen  
Tel. +49 (0) 77 31 792-0  
tools@orbitalum.com  
www.orbitalum.com

**WACHS** **E.H. WACHS**  
Sales & Service Center  
Europe



# COHERENT

## LASERLÖSUNGEN FÜR IHREN ERFOLG

Die 1966 gegründete Firma Coherent, Inc. (Santa Clara, CA, USA) ist einer der weltweit führenden Anbieter von Lasern und laserbasierten Technologien für Kunden aus Forschung, Handel und Industrie. Mit der Übernahme von ROFIN im Jahr 2016 expandierte das Unternehmen auf fast 5.000 Mitarbeiter und weit über 20.000 Kunden in mehr als 60 Ländern weltweit.

Coherent genießt die Marktführerschaft in vielen Bereichen. Zu den Kunden gehören führende Unternehmen in unterschiedlichen Branchen und zahlreiche Nobelpreisträger. Die Bandbreite des Erfolgs von Coherent stammt zum Teil aus dem einzigartigen Technologieportfolio des Unternehmens: UV-Optische Systeme, Hochleistungsfaser-, Ultrakurzpuls-, Festkörper-, Excimer-, CO<sub>2</sub>-, Direkt-Diodenlaser und vieles mehr.



## WIR BRINGEN

# IHRE ANWENDUNG

## VORAN

Zusammen verfügen Coherent und ROFIN über das breiteste Produktportfolio in der industriellen Materialbearbeitung. Von Lasern bis hin zu kompletten Systemlösungen: Sie profitieren von einer höheren Effizienz und höheren Prozessgeschwindigkeiten bei gleichzeitig reduzierten Betriebskosten.

Sei es in der **Automobil-** oder **Energieindustrie**, in der **Luftfahrt**, **Medizintechnik** oder der **Verpackungsindustrie**: wir sind Ihr idealer Partner!



## Potentiale des Laserstrahlschweißens unter

# STATIONÄREM UND MOBILEM VAKUUM

Niklas Holtum, Stefan Jakobs

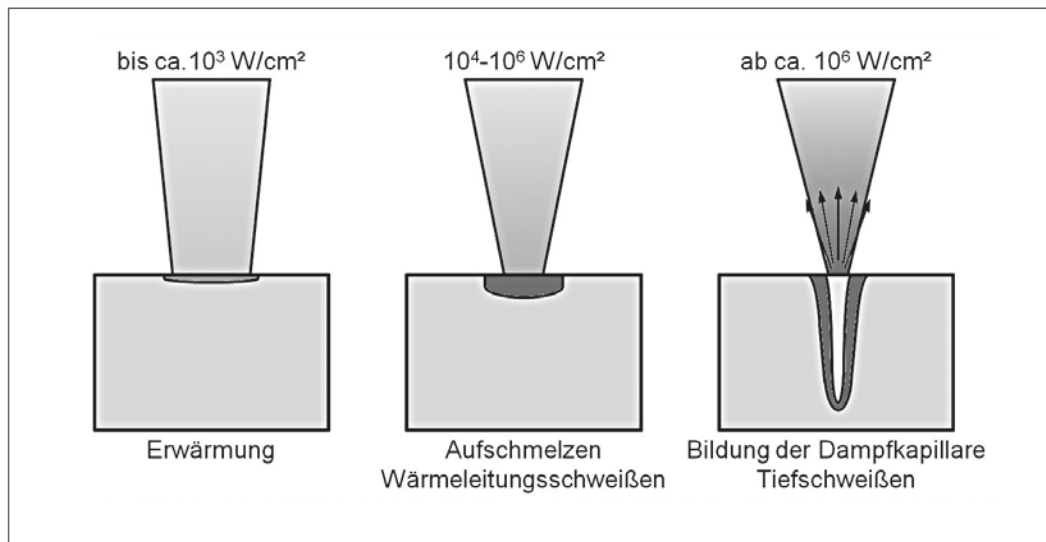


Abbildung 1: Übergang vom Wärmeleitungs- zum Tiefschweißen

Das Laserstrahlschweißen ist ein Prozess, der mittlerweile in einer Vielzahl von Ausprägungen in der industriellen Fertigung angekommen ist. In unterschiedlichen Varianten und auch als hybride Prozesse, z. B. in Kombination mit Lichtbogenverfahren, wird der Laserstrahl an einem weit gefassten Werkstoffspektrum von Kunststoffen über den typischen Einsatz an Stählen bis zu speziellen Anwendungen an Kupfer und Refraktärmetallen eingesetzt. Durch die kontinuierliche Weiterentwicklung der Strahlquellen und Optiken kann dabei ein weiterer Bereich an Einsatzmöglichkeiten von der Mikrosystemtechnik bis zum Schwermaschinenbau abgedeckt werden. Bei allen Prozessvarianten des Laserstrahlschweißens im Dickblechbereich zeigen sich jedoch Defizite in erreichbaren Einschweiß-tiefen und Nahtqualitäten gegenüber dem Elektronenstrahlschweißen. Mit dem Laserstrahlschweißen unter Vakuum (LaVa) wurde eine Prozessvariante entwickelt, mit der sich neue Anwendungsfelder für das Laserstrahlweißen erschließen. Dies schließt vor allem das Schweißen von Strukturen mit großen Wanddicken aber auch das energie- und qualitätsoptimierte Fügen bei geringen Einschweiß-tiefen ein.

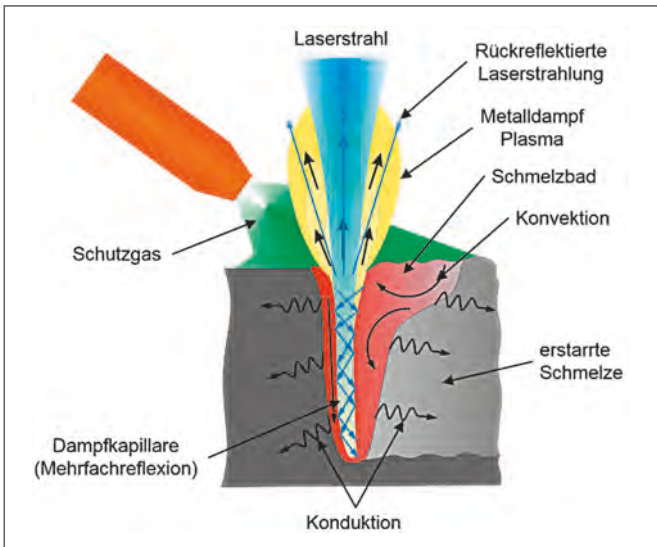


Abbildung 2:  
Fügezone beim Tiefschweißen

### LASERSTRAHLSCHWEISSEN UNTER VAKUUM IM VERGLEICH ZUM EB-SCHWEISSEN

Die Strahlschweißverfahren (Laserstrahlschweißen und Elektronenstrahlschweißen) zeichnen sich durch eine hohe Energieintensität an der Werkstückoberfläche aus, wobei sich die Mechanismen der Strahl-Stoff-Wechselwirkung deutlich voneinander unterscheiden. Beiden gemein ist der Tiefschweißeffect, d.h. die Ausbildung einer Dampfkapillare. Hierdurch können Schweißnähte mit einem sehr großen Aspektverhältnis von Nahttiefe zu Nahtbreite erreicht werden.

Der Elektronenstrahl wird im Strahlerzeuger generiert, geformt und fokussiert. Die emittierten Elektronen erreichen dabei bis zu 70 % der Lichtgeschwindigkeit und Leistungsdichten am Werkstück von bis zu  $10^7 \text{ W/cm}^2$ . Die kinetische Energie des Strahls wird in Wärmeenergie umgewandelt. Bei geringen Intensitäten betragen die Verluste bei der Einkopplung ca. 30 %. Ab einer Grenzintensität verdampft der Werkstoff und es bildet sich eine Dampfkapillare

Abbildung 3:  
Änderung der Schweißnahtgeometrie  
Umgebungsdruck (l.),  $10^1 \text{ mbar}$  (r.),  $600 \text{ W}$

und somit der Tiefschweißeffect aus, **Abbildung 1**. Mit Ausbildung der Kapillare sinken die Verluste durch gestreute Elektronen auf ca. 10 %. Daneben wird ca. 1 % der eingebrachten Energie in Röntgenstrahlung umgewandelt.

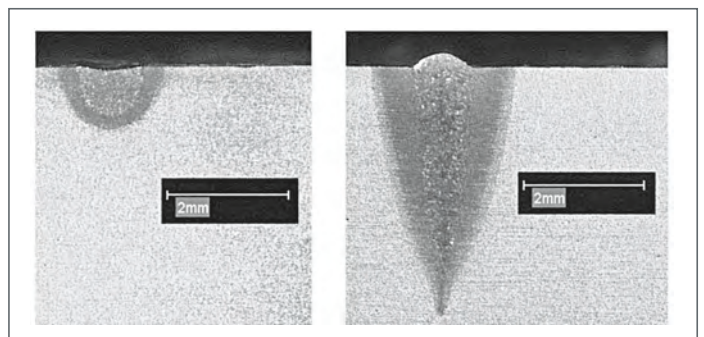
Der Laserstrahl trifft dagegen als Bündel fokussierter elektromagnetischer Wellen mit definierter Wellenlänge auf die Werkstückoberfläche. Bei geringen Intensitäten wird dabei nur ein sehr kleiner Anteil der Strahlleistung an der Oberfläche absorbiert. Je nach Werkstoff liegt der Verlust durch Reflektion bei 70 (Fe)-95 % (Al). Genau wie beim EB-Schweißen bildet sich ab einer Grenzintensität eine Dampfkapillare aus, in der die Laserstrahlung vielfach reflektiert wird. Durch die wiederholte Reflektion und Absorption sinken die Verluste mit zunehmender Tiefe der Dampfkapillare drastisch auf Werte  $< 10 \%$ .

Mit Multimode-Festkörperlasern können Fokusbereiche ab  $0,1 \text{ mm}$  erreicht werden, die entsprechenden Intensitäten liegen oberhalb  $10^7 \text{ W/cm}^2$ . Mit Singlemode-Systemen, d.h. Lasern deren Strahlprofil einer Gauß-Verteilung sehr nahe kommt, sind sogar Fokusbereiche bis  $0,03 \text{ mm}$  bei Intensitäten größer  $10^8 \text{ W/cm}^2$  möglich.

Das Laserstrahlschweißen findet für gewöhnlich bei Atmosphärendruck unter einer Schutzgasabdeckung statt. Mit steigenden Strahlleistungen und damit größer werdenden Schmelzbädern sind dazu inerte Schutzgasvolumenströme von  $10\text{--}20 \text{ l/min}$  notwendig. Dabei dient der Gasstrom nicht nur dem Schutz des Schmelzbades und der erstarrenden Naht, sondern verhindert durch Verdrängung des aus der Kapillare austretenden Metaldampfes und sonstiger Prozessemissionen auch die Beeinflussung des Laserstrahls über dem Werkstück, **Abbildung 2**.

### LASERSTRAHLSCHWEISSEN UNTER VAKUUM

Der Anstoß zur Entwicklung des Laserstrahlschweißens im Vakuum zu einem Fügeverfahren basiert auf vereinzelt Forschungsarbeiten aus den 1980er Jahren. In diesen Arbeiten wurde untersucht, inwiefern durch eine Reduzierung des Umgebungsdrucks die schädliche Plasmafackel über der Dampfkapillare beim Schweißen mit dem  $\text{CO}_2$ -Laser unterdrückt werden. Dieser Effekt wurde nachgewiesen und als Nebenerkenntnis wurde eine Steigerung der erreichbaren Einschweißstiefen festgestellt.



Die ersten eigenen Untersuchungen mit modernen Festkörperlaser (Singlemode-Faserlaser) im Vakuum zeigten sowohl eine Reduzierung der Dampffackel über der Kapillare, als auch eine deutliche Steigerung der Einschweißtiefe bei vergleichbaren Parametern. Während an Atmosphärendruck lediglich ein Prozess an der Grenze zwischen Wärmeleitungsschweißen und Tiefschweißen möglich war, führte eine Reduzierung des Umgebungsdrucks auf 10 mbar zur Ausbildung einer ausgeprägten Dampfkapillare und der Ver vierfachung der Einschweißtiefe, **Abbildung 3**.

Die Gründe für die signifikanten Auswirkungen des verringerten Umgebungsdrucks auf den Laserstrahlschweißprozess sind vielfältig und unterschiedlich stark ausgeprägt. Dabei spielt die augenscheinlichste Verringerung der Metalldampffackel über der Kapillare nur eine geringe Rolle, **Abbildung 4**.

Der Hauptgrund der zu beobachtenden Prozessveränderungen liegt in der Beeinflussung der Verdampfungstemperaturen der Werkstoffe und der weitgehenden Druckunabhängigkeit ihrer Schmelztemperaturen. Am Beispiel der Dampfdruckkurve der wichtigsten Bestandteile unlegierter Stähle, Eisen und Mangan, wird dies besonders deutlich, **Abbildung 5**.

Die Reduzierung des Arbeitsdrucks in der Vakuumkammer von Atmosphärendruck bis auf  $10^1$  mbar führt zu einer signifikanten Verringerung der Verdampfungstemperatur der Legierungsbestandteile. Im beschriebenen Fall liegt die Verringerung der Siedetem-

peratur von Eisen bei über  $1300^\circ\text{K}$ .

Diese Verringerung führt zu mehreren Auswirkungen. Als erster Effekt wird weniger Energie benötigt, um den Werkstoff in die Gasphase zu überführen. Daneben zeigen die Untersuchungen, dass sich die Grenzintensität zum Übergang in den Tiefschweißeffekt verringert, **Abbildung 3**. Der dritte Effekt der Siedepunktverringerung tritt in Verbindung mit der weitgehenden Druckunabhängigkeit der Schmelzpunkte in den Vordergrund. Die geringere Temperatur an der Phasengrenze zwischen Dampfkapillare und Oberfläche des Schmelzemannels bewirkt vermutlich in Kombination mit dem unveränderten Schmelzpunkt eine Verringerung der Dicke des Schmelzmannels um die Dampfkapillare. Durch die Verringerung des Schmelzevolumens ist die Dampfkapillare stabiler und die Schweißnaht ist deutlich schmaler ausgeprägt und weist im Allgemeinen parallele Nahtflanken auf, **Abbildung 6**.

Die **Abbildung 6** zeigt den Vergleich bei 16 kW Strahlleistung und unterschiedlichen Schweißgeschwindigkeiten unter Atmosphärendruck (jeweils rechts) und unter  $10^1$  mbar (jeweils links). Deutlich sind die Veränderungen der Einschweißtiefe und Nahtgeometrie erkennbar. Dabei wird augenscheinlich, dass der Effekt der Einschweißtiefensteigerung mit abnehmender Schweißgeschwindigkeit zunimmt.

Basierend auf diesen Ergebnissen wurde die Weiterentwicklung des Laserstrahlschweißens im Vakuum zu einem industriell einsetzbaren

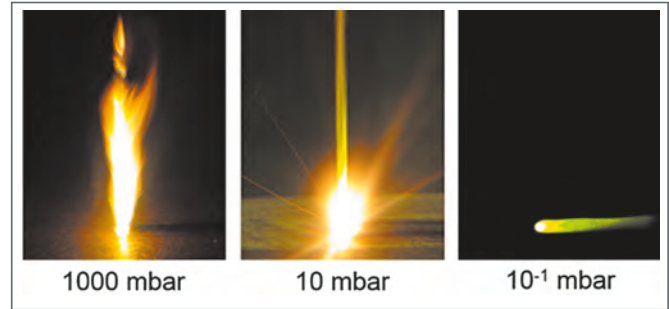


Abbildung 4: Verringerung der Metalldampffackel

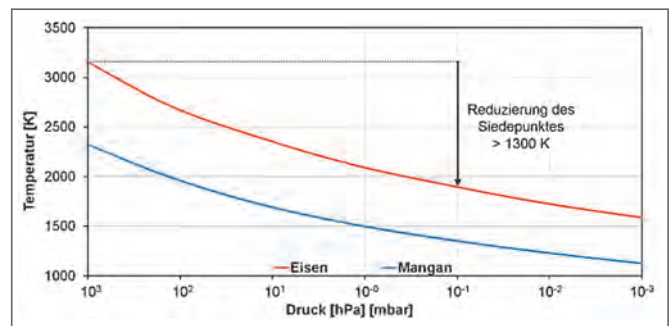


Abbildung 5: Dampfdruckkurven von Eisen, Mangan

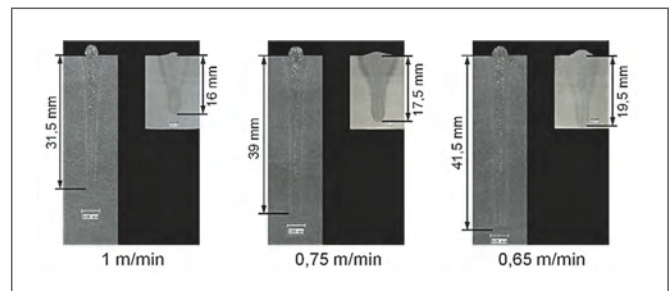


Abbildung 6: Vergleich ATM und  $10^{-1}$  mbar bei 16 kW



Abbildung 7: Versuchsanlage LaVa 16 kW

Fügeverfahren beschlossen. Um die neue Verfahrensvariante anwendungsnah untersuchen zu können, wurde mit der Firma Fokus GmbH eine Versuchsanlage konzipiert und realisiert, **Abbildung 7**. Diese ermöglicht Schweißuntersuchungen mit bis zu 16 kW Strahlleistung im Vakuum bis  $1 \times 10^{-1}$  mbar. Mit dieser Anlage wurde sowohl ein grundlegendes Prozessverständnis erarbeitet, als auch bereits Prozessentwicklung im industriellen Kontext betrieben.

Besonderes Augenmerk wurde auf das Schutzsystem für das Einkoppelfenster gelegt. Bei dem beschriebenen Aufbau bildet dieses optische Element die Schnittstelle zwischen Umgebungsdruck und Vakuum und ist entsprechend den Prozessemissionen (Metaldampf und kleine Spritzer) ausgesetzt. Um das Laserstrahlschweißen industriell nutzen zu können wurde daher ein System entwickelt, welches diese kritische Komponente sicher und über viele Schweißungen hinweg vor Verschmutzung bewahren kann. Eine Verschmutzung kann bei den eingesetzten Strahlleistungen schnell zur Zerstörung des Einkoppelfensters führen. Dieses System unterliegt einer ständigen Weiterentwicklung und ist in der Lage, das Einkoppelfenster während einer Vielzahl von Schweißungen bei Leistungen bis zu 16 kW zuverlässig zu schützen.

### VERBINDUNGSSCHWEISSUNGEN AN STAHL

Auf Basis der erarbeiteten Erfahrungswerte wurden Prozessparameter zum Fügen von dickwandigen Blechen aus S690QL entwickelt, umge-

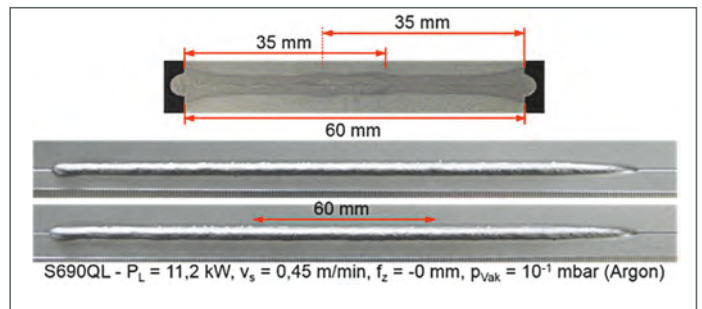


Abbildung 8: Verbindung 60 mm Lage-Gegenlage PC

setzt und die Schweißergebnisse untersucht.

Als direkte Umsetzung der erfassten Parameterfenster wurden 60 mm dicke Bleche aus S690QL in Lage-Gegenlage-Technik verschweißt. Hier kommt der Vorteil zum Tragen, dass es sich bei beiden Lagen faktisch um Einschweißungen handelt, und die Erfahrungswerte direkt umgesetzt werden können, **Abbildung 8**.

Die Ausformung der Ober- und Unterlappen ist ausgesprochen gleichmäßig und der Prozess weitgehend frei von Spritzern. Weder Querschleiff noch Längsschleiff weisen innere Fehler auf, **Abbildung 9**.

Bemerkenswert sind die Stabilität der Einschweißtiefe und die Fehlerfreiheit der beiden Endbereiche von Lage (unten) und Gegenlage (oben) trotz eines relativ einfachen und kurzen Programms zur Vermeidung von Endkratern.

Die Übertragung der Parameter auf eine einseitigeinlagige Verbindungsschweißung erfordert eine besondere Betrachtung der erarbeiteten Parameterfelder. Durch die zur Rückseite offene Dampfkapillare geht ein gewisser Anteil der eingesetzten Strahlleistung verloren. Entsprechend wird im Vergleich zu Einschweißungen mit vergleichbaren Nahttiefen bei Durchschweißungen eine höhere Strahlleistung benötigt, um eine akzeptable Wurzel zu formen.

### WEITERE ANWENDUNGEN UND EINSATZMÖGLICHKEITEN

Neben dem Schweißen von unlegierten Stählen eignet sich die neue Verfahrensvariante für das gesamte Werkstoffspektrum. So wurden bereits erfolgreich Verbindungsschweißungen an niedrig- und hochlegierten Stählen, Duplex-Stählen, Nickel-Basislegierungen

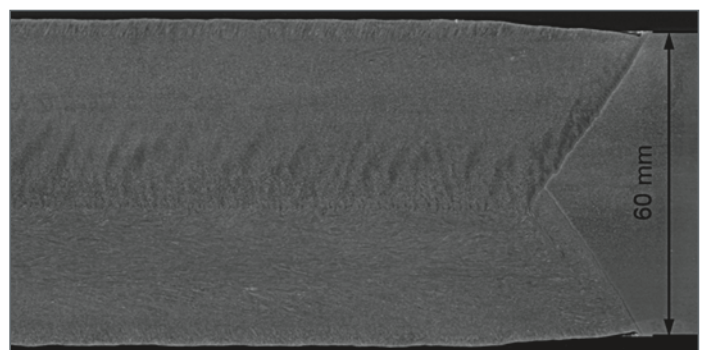


Abbildung 9: Längsschleiff Verbindung 60 mm PC

und Titanlegierungen im Blechdickenbereich von 30 mm bis 40 mm mit dem Laserstrahl im Vakuum geschweißt.

Eine besondere Herausforderung für das Schweißen mit dem Laserstrahl stellt dagegen Kupfer und seine Legierungen dar. Durch die hohe Wärmeleitfähigkeit und Reflektivität im Wellenlängenbereich, der üblicherweise für die Schweißtechnik eingesetzten Laserstrahlquellen, ist das Schweißen von Kupfer mit dem Laserstrahl alles andere als trivial. Selbst in Kombination mit einem frequenzverdoppelten grünen Festkörperlaser liegen die prozesssicher erreichbaren Einschweißstiefen im einstelligen Millimeterbereich. Um unerwünschte Porenbildung bis zu Nahtauswürfen zu verhindern wird i.A. mit hohen Schweißgeschwindigkeiten gearbeitet. Erste Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen im Vakuum an Kupfer zeigen dagegen vielversprechende Ergebnisse, **Abbildung 10**.

Wie erwartet führen der Einsatz von 16 kW Strahlleistung bei relativ geringen Schweißgeschwindigkeiten an Atmosphäre trotz guter Schutzgasabdeckung zu massiven Störungen der Nahtausbildung. Der Prozess wird allerdings signifikant durch das Vakuum von  $2 \times 10^1$  mbar stabilisiert und es können fehlerfreie Einschweißungen von 13 mm Tiefe generiert werden.

Die Ergebnisse dieser und anderer Voruntersuchungen führten zu einem erfolgreichen Forschungsantrag mit der Zielsetzung, das Potential des Laserstrahlschweißens im Vakuum von Kupfer und Kupferlegierungen zu untersuchen.

### LASERSTRAHLSCHWEISSEN UNTER MOBILEM VAKUUM

Das Gros der bisherigen Untersuchungen zum Laserstrahlschweißen im Vakuum fand im Druckbereich von  $10^{-1}$  mbar statt. Eigene Untersuchungen und frühere Forschungsarbeiten deuten darauf hin, dass eine weitere Verringerung des Vakuumdrucks nicht zu einer weiteren, deutlichen Steigerung der erreichbaren Einschweißstiefen führt. Im Hinblick auf eine mögliche Optimierung des Verhältnisses zwischen Einschweißtiefe, Nahtqualität und Aufwand der Vakuumerzeugung wurden erste Versuchsreihen mit höheren Drücken von 50, 100 und 200 mbar durchgeführt.

Dabei zeigt sich, dass selbst bei diesen geringen Vakuumanforderungen noch gute Nahtqualitäten mit deutlichen Einschweißstiefensteigerungen gegenüber dem Laserstrahlschweißen an Atmosphäre erzeugt werden können. Als besonders geeignet erscheint dabei der Druckbereich von 50 bis 100 mbar. Hier werden bei guter Nahtqualität immer noch 75–80 % der Einschweißtiefe von  $10^{-1}$  hPa erreicht.

Einer der gravierendsten Nachteile in Bezug auf die Wirtschaftlichkeit des LBW-Vakuum-Verfahrens ist der Umstand, dass sich das Bauteil während des Fügeprozesses i.d.R. in einer Vakuumkammer befinden muss. Hieraus resultieren auch unweigerlich Einschränkungen in Bezug auf die Bauteilgröße. Ferner entstehen Verweilzeiten durch das Evakuieren. Beim Elektronenstrahlschweißen werden, um diese Zeiten zu reduzieren, häufig Takt-, Schleusen- oder Doppelkammeranlagen einge-

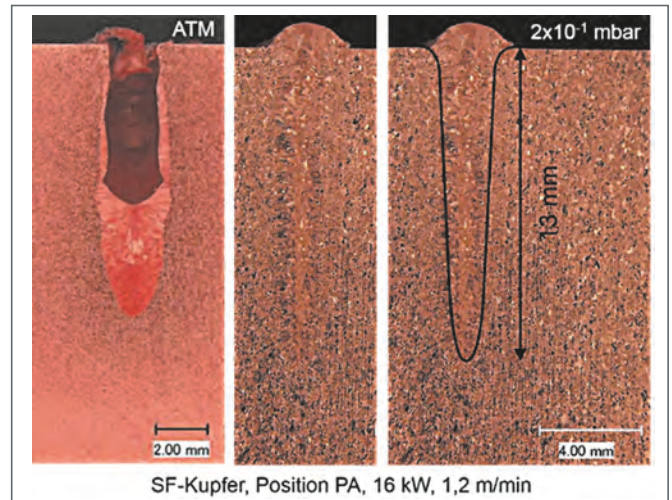
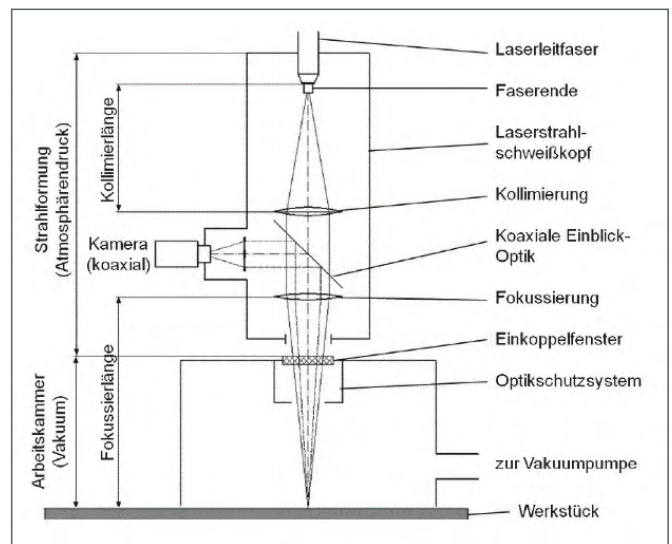


Abbildung 10: Kupfer PA – ATM (l.),  $2 \times 10^1$  mbar (r.)

setzt. Diese sind jedoch nicht universell einsetzbar und vornehmlich für hohe Stückzahlen geeignet. Um die Wirtschaftlichkeit, Flexibilität und Möglichkeiten des LBW zu verbessern, war es das Bestreben, einen Prozess mit mobilem/lokalem Vakuum zu entwickeln. **Abbildung 11** zeigt den Versuchsaufbau des am ISF entwickelten mobilen Vakuumsystems.

Mit diesem System wurde bei ca. 50 mbar und Geschwindigkeiten von 0,2 bis 1,25 m/min geschweißt. **Abbildung 12** zeigt auf der linken Seite zwei Querschnitte von Einschweißungen mit 8 und 16 kW

Abbildung 11: Schema des Versuchsaufbaus zum Mo-Vak-LBW



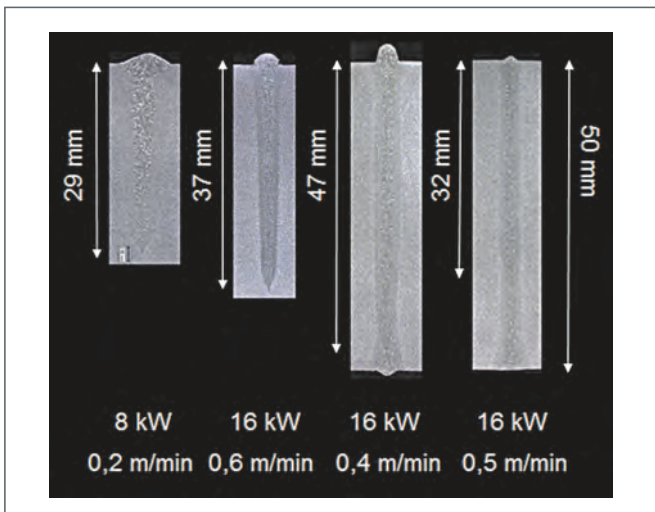


Abbildung 12: Querschliffe Einschweißungen (links) und Verbindungsschweißungen (rechts), MoVak-LBW, 50 hPa

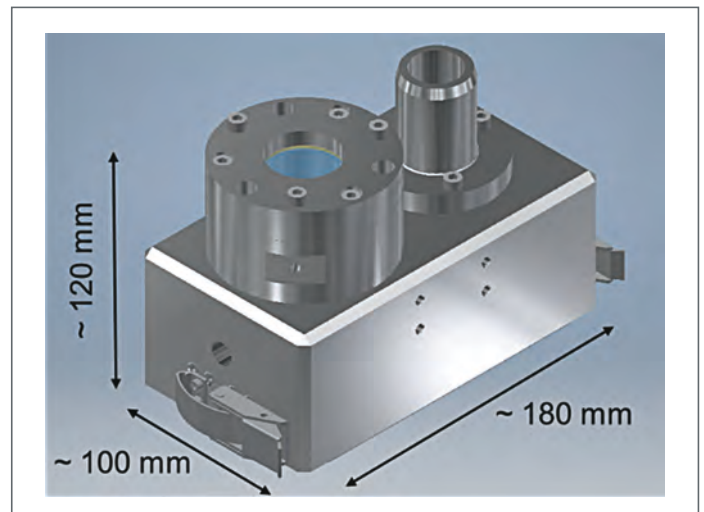


Abbildung 13: MoVak-Kammer

Laserstrahlleistung. Alle Versuche verliefen weitestgehend spritzerfrei. In keinem der ausgewerteten Querschliffe oder der Röntgenbilder waren Poren zu erkennen.

In **Abbildung 12** sind auf der rechten Seite die Schliffbilder zweier Verbindungsschweißungen am Nullspalt zu sehen. Bei der ersten Schweißung wurde zuvor die Wurzel mit einem anderen Prozess (z. B. LBW an Atmosphäre oder WIG) geschlossen und anschließend der Rest der Naht mit dem MoVak-Verfahren geschweißt. Bei der äußerst rechten Schweißnaht handelt es sich um eine Schweißung in der Lage-Gegenlage-Technik, wobei an der Rückseite des Nullspaltes Atmosphärendruck herrschte. Um während der Lage-Schweißung einen Leckagestrom durch den Nullspalt zu vermeiden, wurde wurzelseitig ein Aluminiumklebeband angebracht. Dieses Band wurde vor dem Fügen der Gegenlage wieder entfernt. Es war ohne Probleme möglich, Bleche bis zu einer Dicke von 50 mm fehlerfrei zu fügen.

In der **Abbildung 13** ist die aktuellste Konstruktion eines MoVak-Systems zu sehen. Dabei wurde besonders ein kompaktes System und Arbeitsdrücke von bis zu 10 mbar angestrebt. Ziel zukünftiger Untersuchungen ist es dieses kompakte MoVak-System an realen Bauteilen der Industrie zu testen.

#### FAZIT

Die hier vorgestellten Untersuchungen zeigen das enorme Potential des Laserstrahlschweißens unter Vakuum. Mit der neuen Verfahrensvariante ist es möglich bei vergleichbaren Schweißparametern die Nahtqualität und Einschweißtiefe von Elektronenstrahlschweißten Nähten zu erreichen. Darüber hinaus besitzt das Laserstrahlschweißen im Vakuum noch einige prozessbedingte Vorteile gegenüber dem EB-Schweißen:

Das Verfahren benötigt für den optimalen Einsatz bei Stahl Vakuumdrücke im Bereich von  $10^1$  mbar. Diese Drücke können technisch einfach von Vakuumpumpen erzeugt wer-

den, die bei Elektronenstrahlschweißanlagen als Vorpumpen eingesetzt werden. Das Druckniveau erlaubt zudem die deutlich schnellere Evakuierung von großvolumigen Arbeitskammern.

Wird der Arbeitsdruck des Verfahrens weiter in Richtung 50 mbar gesteigert, ermöglicht dies die Realisierung von kleinen, mobilen Vakuumkammern, die mit dem Schweißprozess über das Werkstück geführt werden.

Ein nicht zu unterschätzender Vorteil des Laserstrahlschweißens im Vakuum gegenüber dem Elektronenstrahl ist die Unempfindlichkeit des Strahls gegenüber magnetischen Feldern. Dies erleichtert deutlich das prozesssichere Fügen von Großbauteilen, die i. A. sehr schlecht vollständig zu entmagnetisieren sind.

#### Kontakt:

Dr.-Ing. Simon Olschok  
Tel.: 0241 8096253  
E-Mail: olschok@isf.rwth-aachen.de



# MICRO POWER BEAM PROCESSING ELECTRON BEAM & LASER IN VACUUM



**FOCUS LaVa**  
LASER BEAM WELDER



**MEBW-60 L95**  
ELECTRON BEAM WELDER

FOCUS GmbH, D-65510 Hünstetten-Kesselbach, Germany, Tel.: +49 (0)6126-4014-0, Web: [www.focus-e-welding.com](http://www.focus-e-welding.com), Mail: [e-welding@focus-gmbh.com](mailto:e-welding@focus-gmbh.com)

*Auch Werbung hat Ihre Grenzen: das Papierformat --*

*und hier könnte Ihre Anzeige stehen! --*

**ALPHA**

Informationsgesellschaft mbH • Finkenstraße 10 • 68623 Lämpertheim • Telefon: 06206 939 220 • Telefax: 939 232

# Mikro-Fügen im Vakuum: Strahlschweißen mit Elektronen und Laser

*Die FOCUS GmbH entwickelt und liefert seit 10 Jahren Lösungen zum hochpräzisen Schweißen mit dem Elektronenstrahl sowohl für die industrielle Mikrosystemtechnik als auch für Forschung & Entwicklung. Kürzlich wurde das Produktspektrum um eine Laseranlage sowie um eine äußerst kompakte EB-Anlage erweitert.*

**FOCUS GmbH**  
Neukirchner Straße 2  
D-65510 Hünstetten  
Tel.: +49 (0)6126 4014-0  
e-welding@focus-gmbh.com  
www.focus-e-welding.com

## Motivation

Für die Fügetechnik im Bereich der Mikrosystemtechnik, wie sie zunehmend z.B. in der Medizin-, der Sensor- oder der Luft- und Raumfahrttechnologie zur Anwendung kommt, ist das Strahlschweißen (auch: Power-Beam-Technology) im Vakuum – sowohl mit dem Elektronenstrahl als auch mit dem Laser – ein mehr und mehr beachteter und vielversprechender Weg.

Fortwährende Investitionen in die Prozess- und Anlagenentwicklung haben es ermöglicht, die Power-Beam-Technology von FOCUS nun auch um die Oberflächenbearbeitung, das Bohren kleinster Löcher wie auch um das Laserschweißen im Vakuum (FOCUS LaVa) zu erweitern.

## Mikro-Elektronenstrahl-Schweißen

Bedingt durch den sehr kleinen Strahldurchmesser sind Schweißnähte kleiner 200  $\mu\text{m}$  bei minimalem Energieeintrag möglich. Mit dem Elektronenstrahl lassen sich insbesondere refraktäre Metalle, wie z.B. Wolfram oder Molybdän, als auch sehr reaktive Metalle, wie Aluminium oder Titan, mit hoher Qualität schweißen. Die hohe Anforderung an die

Positionierbarkeit der Werkstücke ist durch die integrierte REM Funktion (= Raster-Elektronen-Mikroskopie) gewährleistet (s. Abb. 3). Die typischerweise kleinen Abmessungen der Werkstücke stellen besondere Anforderungen an diese Technik.

So müssen alle Vorrichtungen zum Positionieren der Schweißlinge bis auf wenige  $\mu\text{m}$  genau arbeiten. Werkstücke aus der Mikrotechnik können vielfältige Formen aufweisen. Kleine Strukturen dieser Art sind manuell schwer schweißbar. Um diesen Anforderungen gerecht zu werden ist es notwendig, dem Betreiber einer Vakuumschweißanlage eine Vielfalt an Bewegungseinrichtungen zur Verfügung zu stellen. Zur zeitsynchronen Interpolation der Abläufe und um den Fügeablauf präzise einzurichten und jederzeit exakt reproduzieren zu können, sind die Anlagen mit einer modernen CNC Steuerung ausgestattet.

Die Strahlablenkung und Fokussierung muss ebenfalls diesen Anforderungen genügen. Hierfür sind elektronenoptische Abbildungssysteme mit geringen optischen Fehlern wichtig, welche die Strahlqualität auf konstant hohem Niveau gewährleisten. Wird die Anlage mit einer Justiereinheit

und einem Stigmator ausgestattet, können unsymmetrische Einflüsse auf den Elektronenstrahl, z.B. einstreuende Magnetfelder, korrigiert werden, um bestmögliche Schweißergebnisse zu erzielen.

Mit einer hochpräzisen Strahlstromregelung – auch bei kleinsten Strömen von wenigen 10  $\mu\text{A}$  – lassen sich einerseits hoch aufgelöste Sekundärelektronenbilder (REM-Modus) bei geringster Aufheizung der Werkstücke zur Prozesskontrolle erzeugen. Andererseits dürfen im Mikrobereich oft nur geringste Volumina zum Fügen aufgeschmolzen werden. Dann wird die niedrigste einstellbare Leistungsdosis ebenso wichtig. So ist es z.B. zum Verschweißen von 50  $\mu\text{m}$  dicken Folien oder Drähten wie auch beim Umschmelzen von Aluminiumkanten, die nach der Wärmebehandlung einen Kantenradius von konstant 300  $\mu\text{m}$  aufweisen sollen, sehr hilfreich, wenn der kleinste kontrollierbare Strahlstrom von 0,2 mA auf 0,02 mA reduziert wird. Unsere sehr kompakte und ölfreie Hochspannungsvorsorgung ermöglicht es, Strahlleistungen von geringsten bis zu mittleren Leistungen von 2 kW schnell und präzise zu regeln. Im Puls-Modus können Pulsweiten von bis zu 10  $\mu\text{s}$  mit Wiederholfrequenzen im kHz-Bereich moduliert werden.

## Mikro-Elektronenstrahl-Bohren

Das Herstellen kleinster zentrischer Blendenbohrungen in 100  $\mu\text{m}$  dicken Molybdänscheibchen bei hohen Anforderungen an deren mechanische Präzision und Oberflächengüte erfor-



Abb. 1:  
Mikro-Elektronenstrahlschweißanlage  
MEBW-60 L95

Abb. 2:  
Druckaufnehmer aus der Sensorindustrie.  
Verbindung zwischen Titan und Edelstahl  
mit Hilfe einer Kupfer-Zwischenschicht

Abb. 3:  
REM-Aufnahme



derte eine ultimativ hohe Präzision des Elektronenstrahles. Bei Lochdurchmessern von z.B. nur 10 µm sind die Toleranzen für die Zentrierung dieser Blenden zum Elektronenstrahl und damit die Anforderung an die relative Positionierbarkeit der mechanischen Achsen entsprechend hoch!

Die digitale Steuerung und mit ihr die analoge Leistungselektronik für Hochspannung, Strahlablenkung und Fokussierung müssen daher von Blende zu Blende entsprechend reproduzierbare Größen bereitstellen, um die jeweiligen Lochdurchmesser mit den geforderten Toleranzen zu garantieren. Das Strahlprofil des Elektronenstrahls bildet sich hierbei in der Rundheit der Bohrung ab (s. **Abb. 6**). Hier spielt die Emissionscharakteristik einer Lanthanhexaborid (LaB<sub>6</sub>)-Einkristallkatode Ihre Vorteile aus. Der Vergleich mit Bohrungen mittels eines Strahlerzeugers mit Haarnadelkatode zeigte deutliche Unterschiede in der Randausbildung des Lochs.

Solcher Art gefertigte Aperturen werden z.B. in Mikroskopen verwendet. In einem Pilotprojekt konnte erfolgreich der Einsatz dieser Technologie zur wiederholbaren Herstellung zentrischer Bohrungen mit einem Durchmesser von 10 µm bis 200 µm in Molybdänblenden mit 100 µm Dicke gezeigt werden. Charakteristisch für diese Elektronenstrahlbohrtechnik ist die beiderseits gratfreie Oberfläche der Bohrungsränder, was nicht nur für den Einsatz als Mikroskopblende große Vorteile bietet.

**Mikro-EB-Kompaktanlage MEBW-60/COMPACT**

FOCUS hat kürzlich als Ergänzung zu den sehr beliebten Tisch-Anlagen eine besonders kompakte Mikro-Elektronenstrahl-Schweißanlage (MEBW) auf den Markt gebracht (s. **Abb. 4**). Dieses besonders „schlanke“ System mit einer Stellfläche von nur ca. 2 m<sup>2</sup> basiert auf den Varianten MEBW-60 L8 und L95 und erweitert die Einsatzmöglichkeiten insbesondere dort, wo geringe Aufstellflächen gewünscht sind. Die kompakte Bauweise garantiert einen einfachen Zu-

gang und unterstützt einen variablen und effizienten Produktionsfluss.

Ansonsten bietet diese Anlage den gleichen Komfort, wie die größeren Tisch-Anlagen: Die MEBW-60/COMPACT (s. **Abb. 4**) ist – ebenso wie diese Anlagen – in der Lage, hochpräzise Strahleneinstellungen für feinste Oberflächenmodifikationen oder winzige Schweißnähte zu liefern. Auch hier ermöglicht eine Handfernbedienung einen raschen Job-zu-Job Workflow. Eine einfache programmierbare Schweißeinheit auf CNC-Basis, Softwaremasken zum Einstellen der Schweißparameter oder die einzigartige „Draw & Weld“-Funktion bieten den Anwendern darüber hinaus eine moderne, komfortable und intuitive Bedienbarkeit.

Höchste Qualität in der Visualisierung bietet im Fall der EB-Anlage das elektronenoptische Beobachtungssystem (REM) oder wahlweise, wie auch im Falle der LaVa/COMPACT, eine CCD-Kamera. Eine breite Palette von Handling-Systemen gewährleistet die Flexibilität für alle Arten von Schweißanwendungen. Das System verfügt standardmäßig über zwei wählbare Kammergrößen von ca. 8 l oder 95 l Volumen.

**Laserstrahlschweißen im Vakuum**

In Zusammenarbeit mit dem Institut für Schweiß- und Fügetechnik ISF der RWTH Aachen wurde die FOCUS LaVa, ein System zum Laserstrahl-

schweißen im Vakuum, eingeführt (s. **Abb. 5**). Dieses System ist mit einem Vakuumregelsystem zur präzisen Druckregelung ausgestattet. Nach dem ersten Abpumpen regelt ein Edelgasdosierventil auf den gewünschten Schweißdruck.

Damit kann der Schweißprozess zwischen ca. 1 mbar und 200 mbar betrieben werden. Darüber hinaus bietet eine spezielle Betriebsart die Möglichkeit, das Laserstrahlschweißverfahren auch unter atmosphärischem Druck mit einem Schutzgas zu betreiben. Auf diese Weise ausgestattet, ist die FOCUS LaVa ein ausgezeichnetes Werkzeug, welches es ermöglicht, diese neue und vielversprechende Technologie sowohl in der Forschung aber auch Zug um Zug in der Fertigung einzusetzen.

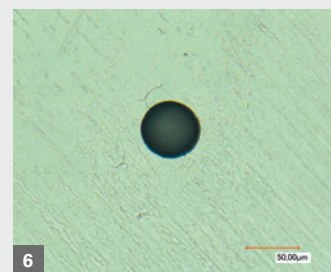
Die Focus LaVa L95 verwendet eine 95 l Prozesskammer. Eine integrierte CNC-Steuerung synchronisiert die Bewegung eines X-Y-Tisches, der Drehvorrichtungen und die z-Bewegung des Laserfokus sowie der Laserleistung. Da die Optik, der Laser und seine Faserführungen an Atmosphäre gehandhabt werden, kann die Anlage mit einer breiten Palette von bekannten Laserkomponenten ausgestattet werden. Alles in Allem kann dieses Arbeitswerkzeug sowohl als mittelgroße Produktionsanlage z.B. in Job-Shops oder im F&E-Bereich für die Entwicklung neuer und interessanter Schweißlösungen verwendet werden.



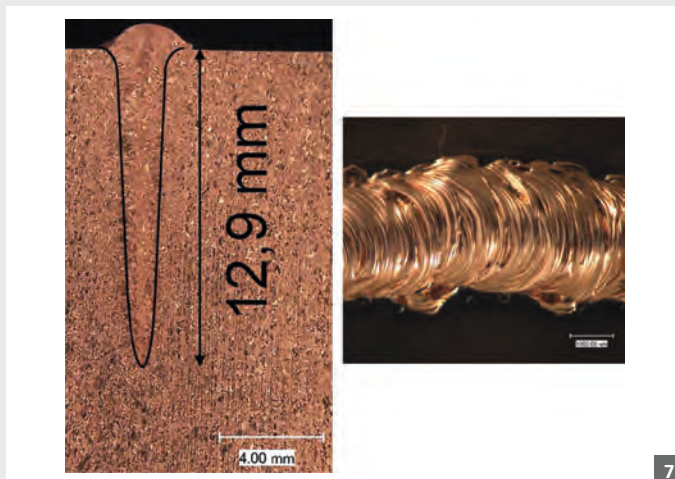
**Abb. 4:** Mikro-Elektronenstrahlschweißanlage MEBW-60/COMPACT



**Abb. 5:** Mikro-Laserstrahlanlage FOCUS LaVa L95



**Abb. 6:** 50 µm Bohrung in Molybdän



**Abb. 7:** Tiefschweißung in Cu mit Laser

# Rührreibschweißen – EIN SONDERVERFAHREN VOR DEM DURCHBRUCH

Marc Essers, Pascal Rabe, Alexander Schiebahn

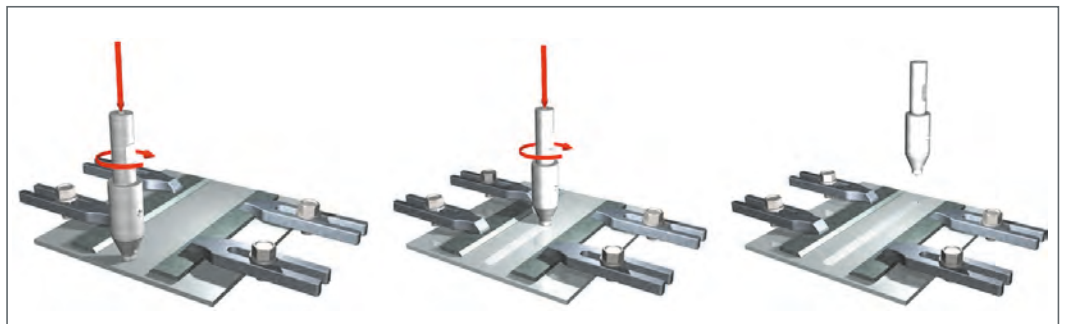


Abbildung 1: Prozessablauf beim Rührreibschweißen [Quelle: HZG]

Das Rührreibschweißverfahren wird vornehmlich zum stoffschlüssigen Fügen von Metallegierungen eingesetzt, welche schmelzschweißtechnisch nur eine bedingte Schweißneigung aufweisen. Viele dieser Metallegierungen finden Anwendung in Leichtbaulösungen der Fahrzeug-, Schienen-, Luft- und Raumfahrtindustrie sowie im Schiffbau. Eine Chance für das Rührreibschweißen sich in diesen Sektoren als robuste Fügetechnik dauerhaft zu etablieren. Relativ hohe Anlageninvestitionskosten erschweren allerdings eine breite Marktdurchdringung. Für das ISF ein Grund mehr sich mit der Technologie zu befassen.

Das Rührreibschweißen (engl.: Friction Stir Welding, FSW) lässt sich in drei wesentliche Prozessarbeitsschritte unterteilen (vgl. **Abbildung 1**). Im ersten Arbeitsschritt bewegt sich ein rotierendes zylindrisches Schweißwerkzeug auf der Oberfläche des zu verbindenden Werkstücks, das auf eine tragfähige Schweißunterlage gespannt ist. Durch die entstehende Reibungswärme

zwischen verschleißfestem Schweißwerkzeug und Werkstück erweicht das Werkstückmaterial und der Schweißstift des Rührreibschweißwerkzeugs sinkt bis zur Werkzeugschulter in das Werkstück ein. Im zweiten Arbeitsschritt bewegt sich das Werkzeug bei einer vorgegebenen Drehzahl und Vorschubgeschwindigkeit entlang der Fügelinie. Im dritten Arbeitsschritt, nach Beendigung

der Schweißaufgabe, fährt das rotierende Werkzeug aus dem Werkstück heraus. Am Ende der Schweißnaht verbleibt, bedingt durch den Schweißstift des Werkzeuges, ein Endloch.

Rührreibschweißverbindungen zeichnen sich durch eine hohe Reproduzierbarkeit und gute Schweißnahteneigenschaften aus. Gegenüber konventionellen Schmelzschweißverfahren

ist der Wärmeeintrag gering, wodurch der Werkstoff im Nahtbereich lediglich plastifiziert und nicht aufgeschmolzen wird. Daraus ergeben sich viele Vorteile: geringer Verzug, Vermeidung von Rissbildung und metallurgischen Poren, deutliche Reduktion der Anzahl metallurgischer Poren im Bereich der Schweißnaht bei Aluminium-Gusswerkstoffen (vgl. **Abbildung 2**). Eine Entmischung oder ein Abbrand von Legierungsbestandteilen treten bei geeigneter Parameterwahl nicht auf. Ferner ist keine besondere Fügestellenvorbereitung notwendig. Für den Schweißprozess werden in der Regel keine Schutzgase oder Zusatzwerkstoffe benötigt. Die Prozesskontrolle ist im Vergleich zu anderen Schweißverfahren wesentlich einfacher.

Die Anwendungsfelder in denen das Rührreibschweißen eingesetzt wird, haben in den letzten Jahren verstärkt zugenommen. Zunächst wurde das Rührreibschweißen im Bereich der Luft- und Raumfahrt eingesetzt. Kurz darauf folgten die Sparten des Schiff- und Waggonbaus. Auch im Bereich der Automobilindustrie wurde das Potenzial dieser Schweißtechnologie erkannt, so dass rührreibgeschweißte Automobilbauteile bereits in Serie produziert werden. Neuen Ansehens erhält das Verfahren unter dem aktuell intensiv diskutierten Themenfeld der Elektromobilität. Im Bereich der Elektrotechnik besteht zunehmendes Interesse an der Herstellung von Mischverbindungen aus Kupfer und Aluminium sowie Aluminium und Messing, die mit den klassischen Schmelzschweißverfahren nicht oder nur schwer zu erzeugen sind.



Abbildung 2:  
Querschnitt einer klebstofffixierten Überlapp-Rührreibschweißverbindung am Beispiel von zwei 14 mm dicken Aluminiumgussplatten (Schweißen erfolgte durch den Klebstoff)

Das Rührreibschweißen wird überwiegend für das Fügen von Aluminiumwerkstoffen verwendet. Mit der Entwicklung neuer Schweißwerkzeuge unter Verwendung entsprechender verschleißfester Werkstoffe wird das Schweißverfahren nun auch bei Stahl- und Titanwerkstoffen, sowie bei der Erzeugung von Alu-Stahl-Mischverbindungen eingesetzt. Um den Anwendungsbereich des Rührreibschweißverfahrens zu erweitern und die Produktivität des Verfahrens zu steigern, wird am ISF das

konventionelle Rührreibschweißen zum einen mit Komponenten aus der Widerstandsschweißtechnik kombiniert und zum anderen mit Elementen aus der Klebtechnik. Hierüber ist in der vorherigen Ausgabe dieser Zeitschrift ausführlich berichtet worden.

Spezielle, für das Rührreibschweißen entwickelte Maschinen benötigen neben einem großen, abgesicherten Stellplatz eine hohe Investitionssumme, die oftmals weit im 6-stelligen Bereich liegt. Für

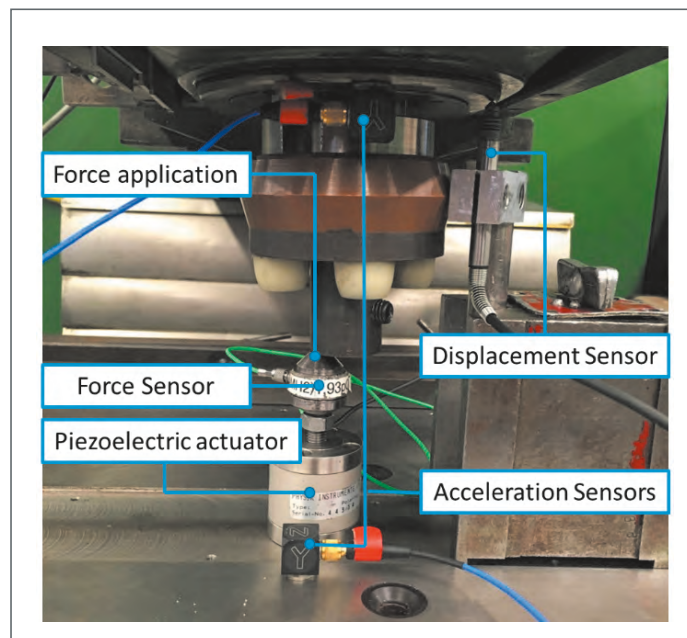


Abbildung 3:  
Messtechnischer Aufbau zur Erfassung der Nachgiebigkeit einer Fräsmaschine [WZL]

viele potenzielle Anwender des Verfahrens, insbesondere aus dem KMU-Sektor, stellt dies eine große finanzielle Hürde dar. Zudem sind diese Anlagen meist auf die Bearbeitung großer Bauteile mit hohen Wandstärken ausgelegt und so für viele Anwendungsfälle überdimensioniert. Am ISF werden daher neben Rührreißschweißmaschinen auch konventionelle Fräsmaschinen für den Rührreißschweiß-einsatz untersucht. In Zusammenarbeit mit dem WZL (Werkzeugmaschinenlabor) der RWTH Aachen werden hierzu die statischen und dynamischen Eigenschaften von Rührreißschweißmaschinen und Fräsmaschinen erfasst mit dem Ziel, Schweißparameter, die an Rührreißschweißanlagen ermittelt wurden, auf Fräsmaschinen unter Gewährleistung einer möglichst gleichbleibenden Verbindungsqualität anzupassen. **Abbildung 3** zeigt diesbezüglich beispielhaft den Messaufbau zur Ermittlung der statischen Nachgiebigkeit in Richtung der Spindelachse an einer Fräsmaschine des Herstellers Deckel (Typ: FP 5 NC). Aus den gewonnenen Daten wird im Zuge des Internationalen Cornet AiF-Projektes „MillFSW-Support for implementation of FSW on milling machines by use of an empirical approach“ ein empirischer Ansatz entwickelt, der neuen Anwendern die Möglichkeiten von konventionellen Werkzeugmaschinen für das Rührreißschweißen aufzeigen und die Parameterfindung bzw. die Schweißbereichsermittlung erheblich erleichtern soll.

Das IGF-Projekt 191EN der Forschungsvereinigung „Euro-

päische Forschungsgesellschaft für Blechverarbeitung e.V.“ wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) in der Variante CORNET vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

Um die Prozesssicherheit des Rührreißschweißprozesses in der Serienanwendung zu optimieren und das Anwendungsgebiet zu erweitern, werden im AiF-Projekt „FriCoat – Untersuchungen zum Rührreißschweißen von beschichteten Aluminiumblechen“ (19.729N) verschiedene externe Prozesseinflüsse auf die Ausbildung und Qualität der Schweißzone untersucht wie beispielsweise der Einfluss von technischen Beschichtungen und Gushäuten sowie von ungewollten Oberflächenschichten wie Kühlschmierstoffen oder Tiefziehölen.

Im Rahmen des RWTH Exzellenzclusters „Integrative Produktionstechnik für Hochlohnländer“ forscht das ISF an der Entwicklung von vollautomatisierten selbstregelnden Rührreißschweißprozessen. Die entwickelten Prozesse können datenbankbasiert anhand von Werkstoffkennwerten selbstständig Schweißparameter für die gestellten Fügeaufgaben generieren und diese auf Basis der Prozessüberwachung im laufenden Prozess nachregeln, um optimale Schweißergebnisse zu erzielen. Ziel dieses Vorhabens ist es, den vielseitig anwendbaren Fügeprozess des Rührreißschweißens einer breiten Anzahl an Anwendern zugäng-

lich zu machen, die auf diese Weise mit einem datenbankbasierten System auch ohne große Prozessenerfahrung sichere und zuverlässige Schweißverbindungen erzeugen können.

**Kontakt:**

Dr.-Ing. Alexander Schiebahn  
Tel.: 0241 8097233  
E-Mail: schiebahn@isf.rwth-aachen.de

# Innovative Lösungen für die Schweißtechnik in Zeiten von Industrie 4.0

*Für Fronius ist Industrie 4.0 gelebte Wirklichkeit: Schon 1997 entwickelte das österreichische Unternehmen die erste digitale Schweißstromquelle der Welt und gilt als Technologieführer bei der Digitalisierung und Vernetzung in der Schweißtechnik. Das Portfolio umfasst Lösungen, mit denen Anwender schnell, intuitiv und flexibel arbeiten können – wie das Dokumentations- und Datenanalysesystem WeldCube.*

Die Digitalisierung verändert die Produktionsprozesse von Grund auf – auch in der Schweißtechnik. Neue Funktionen und Fähigkeiten sind gefragt, um Schweißsysteme optimal in die vernetzte und computergesteuerte Fabrik der Zukunft zu integrieren. Wichtig ist dabei das Sammeln und Auswerten von Daten. Fronius bietet dafür das Dokumentations- und Datenanalysesystem WeldCube. Es

bereitet die wichtigsten Schweißinformationen auf und stellt sie übersichtlich zur Verfügung. Die Istwerte jeder Stromquelle lassen sich pro Naht maschinenbezogen und übergreifend auf Bauteilebene dokumentieren. Sollwerte wie zum Beispiel Jobdaten lassen sich ebenfalls beobachten und werden vom System über die gesamte Lebensdauer eines Schweißgerätes erfasst. Per Netzwerk

können mit einer WeldCube-Installation bis zu 50 Stromquellen verbunden und die Ergebnisse vom Computer oder über Tablet und Smartphone abgerufen werden. Damit unterstützt WeldCube die Produktion und hilft dabei, Abläufe nachhaltig zu verbessern und Kosten messbar zu reduzieren. Das System ist auch als reine Software-Lösung erhältlich.

**Fronius Deutschland GmbH**  
**Am Stockgraben 3**  
**D-36119 Neuhof-Dorfborn**  
**Tel.: +49 (0)6655 91694-0**  
**sales.germany@fronius.com**  
**www.fronius.de**

/ Perfect Welding / Solar Energy / Perfect Charging

**ALLE SCHWEISSYSTEME  
 IM BLICK.  
 EINE SOFTWARE.**

**Fronius**

Und was ist Ihre  
 Welding Challenge?  
**Let's get connected.**

Mit ihrer Vielzahl an Funktionen ermöglicht unsere WeldCube-Software die lückenlose Schweißdatendokumentation und -analyse von gesamten Produktionslinien. Die Konsequenz? Mehr Transparenz, Sicherheit und Nachvollziehbarkeit für Ihre Serienproduktion. Neben der lückenlosen Nachweisbarkeit Ihrer Schweiß-Qualität kann Ihr Unternehmen die gewonnenen Daten für eine kontinuierliche Kostenoptimierung nutzen. Und das Beste: Durch den geringeren Kontrollaufwand haben Sie persönlich sogar mehr Zeit fürs Wesentliche. Jetzt mehr erfahren: [www.fronius.com/weldcube](http://www.fronius.com/weldcube)

# Die DVS Media GmbH: Fachmedien der Fügetechnik

*In der Welt des Fügens, Trennens und Beschichtens existiert jede Menge Fachwissen. Die DVS Media GmbH bietet als fügetechnischer Fachverlag den direkten Zugang zu diesem Wissenspool.*

Im breit gefächerten Produktportfolio des Verlages ist für jeden fügetechnisch Interessierten etwas Passendes dabei: Für erfahrene Experten ebenso wie für die „Experten to be“, für Praktiker und Wissenschaftler, für Lernende und Lehrende, für Liebhaber des Gedruckten und für Fans von E-Books und Apps. Sie alle finden im Angebot der DVS Media maßgeschneiderte Produkte.

Deutsch und Fremdsprachige Fachbücher und Fachzeitschriften gehören zu den Hauptsparten im Angebot des Verlages. Inhaltlich decken die Fachbücher eine sehr große Band-

breite ab, von A wie Aluminium bis Z wie Zerstörungsfreie Prüfung. Hinzu kommen Tagungsbände, Normenhandbücher, Regelwerkssammlungen und vieles mehr.

Im Zeitschriftensektor, übernehmen die renommierten Fachzeitschriften SCHWEISSEN UND SCHNEIDEN und der PRAKTIKER seit vielen Jahren die Rolle der Flaggschiffe.

Neben dem klassischen Verlagsgeschäft spielen im Leistungsspektrum von DVS Media DVS-Regelwerke eine besonders wichtige Rolle. In enger Zusammenarbeit mit dem DVS-

Verband werden vom Verlag sowohl technische als auch bildungsbezogene DVS-Richtlinien herausgegeben. Das Bildungsregelwerk ist für DVS-Bildungseinrichtungen relevant, die im gesamten Bundesgebiet nach DVS-Standards ausbilden. Die dafür benötigten Lehrgangsunterlagen und Ausbildungsleitfäden werden ebenfalls von DVS Media erarbeitet und vertrieben. Von diesen fachlich fundierten Unterlagen profitieren natürlich in erster Linie die Lehrgangsteilnehmer – letztlich aber auch die gesamte Branche, die dadurch auf erstklassiges Fachpersonal vertrauen kann.

**DVS Media GmbH**  
Aachener Straße 172  
D-40223 Düsseldorf  
media@dvs-hg.de  
www.dvs-media.info



DER SCHNELLSTE WEG ZUM  
FÜGETECHNISCHEN EXPERTENWISSEN  
FACHMEDIEN IM DVS

[www.dvs-media.eu](http://www.dvs-media.eu)



Laserstrahl-Unterpulver Hybridschweißen –

# EIN MODERNES FÜGEVERFAHREN FÜR KONSTRUKTIONSSTAHL IM BEREICH GROSSER BLECHDICKEN

Oliver Engels, M.Sc.

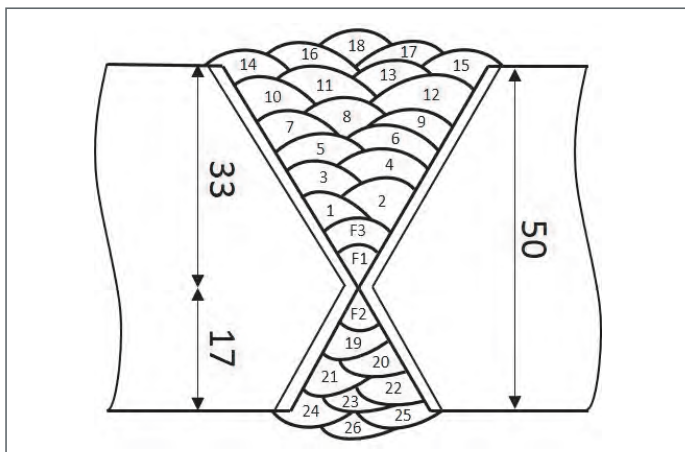


Abbildung 1:  
Kantenvorbereitung und Schweißfolgeplan UP;  
Blechdicke: 50 mm [4]

Das wirtschaftliche Fügen von Stahlblechplatten mit großer Wanddicke gewinnt seitens der Industrie an immer größer werdender Bedeutung. Der Pipeline-, Brücken- oder Kranbau sind nur einige wenige Beispiele wo Blechdicken von 50 mm und mehr im Produktionsalltag schweißtechnisch verarbeitet werden müssen. Derzeit wird diesen Fügeaufgaben mit dem konventionellen Unterpulver (UP) Schweißverfahren begegnet. Verfahrensbedingt ist also eine Vielzahl an Schweißlagen insbesondere bei großen Blechdicken notwendig. Neben dem hohen Energieeintrag und damit zusammenhängendem Bauteilverzug/Richtarbeiten kommt es zu maßgeblichen Kosten für den Schweißzusatzwerkstoff. Mit der Entwicklung des Laserstrahl-Unterpulver Hybridschweißverfahrens (LB-UP Hybrid) wurde erstmals der konventionelle UP-Schweißprozess mit einem hochenergetischen Laserstrahl zu einem hybriden Schweißverfahren kombiniert. Mit dem LB-UP Hybridschweißverfahren konnten bereits Blechdicken von bis zu 50 mm im Stumpfstoß mittels Lage-Gegenlagetechnik gefügt werden. In dieser Arbeit werden Schweißversuche angestellt welche zum Ziel haben den hybriden Charakter des Verfahrens herauszustellen. Dazu werden vergleichende Schweißnähte bei unterschiedlichen Prozessabständen und Anstellwinkeln der Laserstrahl-Optik erzeugt und anschließend mit verschiedenen Mess- und Evaluierungsmethodiken untersucht und ausgewertet.

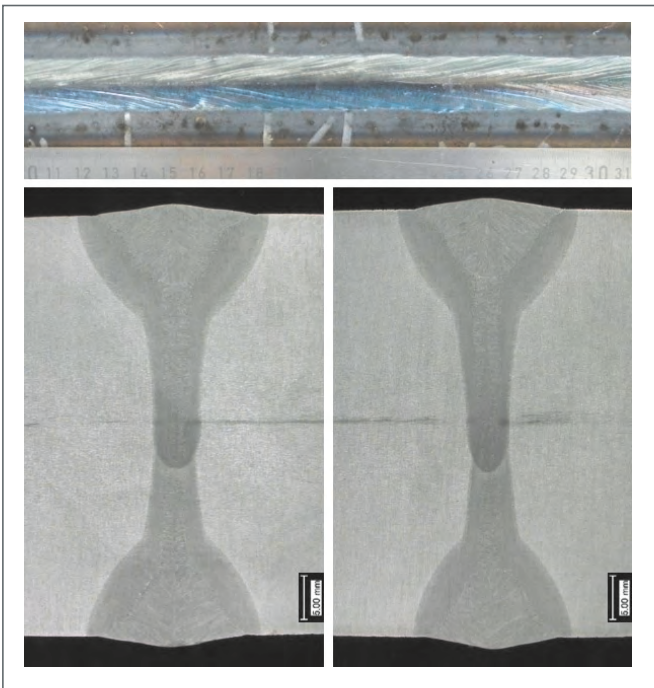


Abbildung 2:  
LB-UP Hybrid; Blechdicke: 50 mm;  
Scheibenlaser [14]

## MOTIVATION

Das Schweißen von dickwandigen Strukturen aus Baustahl ist heutzutage eine häufig anzutreffende Schweißaufgabe. Neben zahlreichen Anwendungen im Bereich Windkraft (Gründungs- und Turmstrukturen) [1], ist außerdem die Rohrherstellung besonders zu erwähnen (längsnaht- und spiralgeschweißte Rohre) [2]. Normalerweise wird für diese Art von Schweißaufgabe das Unterpulver-Schweißverfahren (UP) eingesetzt [1, 2, 3]. Als Schweißnahtvorbereitung wird in der Regel eine DV-Kantenpräparation an die Fügepartner gearbeitet. Im Anschluss folgen 2 bis 3 Heftlagen welche mit einem konventionellen Metallschutzgas Schweißverfahren (MSG) ausgeführt werden. Die verbleibende Schweißnahtfuge wird durch ein UP-Verfahren mit einer großen Anzahl von Schweißraupen gefüllt. Die Kantenvorbereitung und der Schweißfolgeplan für ein mit dieser Technik verschweißtes Bauteil, sind in

**Abbildung 1** [4] schematisch dargestellt (Blechdicke: 50 mm).

Neben dem hohen Zeitaufwand für das Schweißen der einzelnen Raupen, ist darüber hinaus ein thermisch bedingter Bauteilverzug unvermeidbar. In der Folge werden kostenintensive Richtmaßnahmen notwendig. Darüber hinaus werden große Mengen an Schweißzusatzwerkstoffe wie Schweißdraht und Schweißpulver eingesetzt. Die große Anzahl der Schweißdurchgänge birgt des Weiteren die Gefahr von Zwischenlagenfehlern (Schlackeneinschlüsse) [2, 5].

Aufgrund der hohen verfügbaren Energiedichte können mit modernen Strahlschweißverfahren wie dem Laser- oder Elektronenstrahlschweißverfahren große Schweißtiefen erreicht werden. Im Vergleich zum UP-Verfahren lässt sich durch den Einsatz von Strahlschweißverfahren sowohl die Schweißzeit als auch die benötigte Menge an Schweißzusatzwerkstoffen reduzieren. Nachteile dieser Verfahren sind jedoch die geringe Spaltüberbrückbarkeit sowie die Neigung zur Aufhärten des Schweißgutes aufgrund der hohen Abkühlraten. Diesen Nachteilen kann durch die Kombination des Laserstrahlschweißens mit dem MSG-Verfahren zu einem hybriden Schweißverfahren (LB-MSG Hybrid) entgegen getreten werden [6, 7].

Als problematisch erweist sich hierbei jedoch, dass bei den hohen Einschweißtiefen die Schmelze eher erstarrt, als das Gasblasen über die Oberfläche entweichen können. Diese verbleiben dann als Poren in der Schweißnaht. Dies gilt insbesondere wenn ohne

vollständige Penetration geschweißt wird (Lage-Gegenlage Technik) [8].

Mit der Substitution des MSG-Verfahrens durch ein UP-Verfahren wird das Erstarrungsintervall der Schmelze aufgrund des höheren Energieeintrages weiter vergrößert. Es steht eine längere Zeitspanne zur Erstarrung zur Verfügung, sodass Gasblasen aus dem Wurzelbereich sicher über die Werkstückoberfläche entweichen können [9].

Frühere Untersuchungen beschäftigten sich bereits mit der Kombination von Laserstrahl- und UP-Schweißprozessen. Die Ergebnisse zeigen jedoch klar, dass hier lediglich zwei eigenständige und voneinander separierte Schmelzbadbereiche vorliegen. Dies deutet auf eine serielle Kombination dieser beiden Schweißverfahren hin und nicht auf ein Hybridverfahren. Es entsteht lediglich ein Vorwärmeffekt durch den Laserstrahl, der zu einer Erhöhung der Schweißgeschwindigkeit für den nachfolgenden UP-Prozess führt [10, 11].

Neuere Untersuchungen bezüglich des Laserstrahl-Unterpulver-Hybrid-Schweißverfahrens (LB-UP Hybrid) zeigen, dass das Fügen von Blechdicken von 36 mm sowie 50 mm mit einem CO<sub>2</sub>-Laser bzw. Scheibenlaser möglich ist, **Abbildung 2** [12, 13, 14, 15].

Als auffällig erwiesen sich jedoch die stark unterschiedlichen Werte bezüglich der Kerbschlagzähigkeit im Hinblick auf den LB- und UP-dominierten Schweißnahtbereich. Dies hat eine metallurgische Kerbwirkung zur Folge [12].

### ANLAGENAUFBAU

Eine Prinzip-Skizze des Schweißaufbaus für das LB-UP Hybrid-schweißverfahren ist im Folgenden dargestellt

Zwischen dem Laserstrahl und der UP-Drahtelektrode ist ein Trennblech positioniert. Die Aufgabe des Trennblechs besteht darin, dass für den UP-Schweißprozess notwendige Schweißpulver vom Auftreffpunkt des Laserstrahls zu separieren.

Die geometrische Anordnung von Laserstrahl, UP-Brenner und Trennblech zueinander ist von großer Relevanz für den Schweißprozess und wurde im Rahmen der in dieser Arbeit vorgestellten Schweißergebnisse variiert.

Für die folgenden Schweißversuche wurde Baustahl mit einer Streckgrenze von 355 N/mm<sup>2</sup> verwendet, **Tabelle 1**.

C [%]	Si [%]	Mn [%]	P [%]	Cr [%]	Ni [%]	Cu [%]
0,033	0,33	1,52	0,009	0,15	0,013	0,017

Tabelle 1: Metallurgische Zusammensetzung des Grundwerkstoffs; S355

Die Schweißnahtvorbereitung wird ausgeführt als DV-Vorbereitung (Steghöhe: 24 mm; Gesamtöffnungswinkel: 70°). Die Blechdicke beträgt 40 mm, **Abbildung 4**. Vor dem Schweißen wurden die Fügepartner mit dem Laserstrahl geheftet.

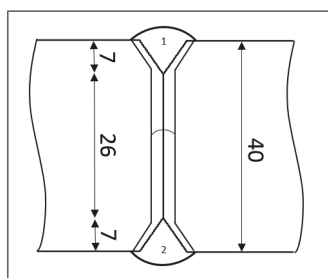


Abbildung 4: Schweißnahtvorbereitung; Blechdicke 40 mm

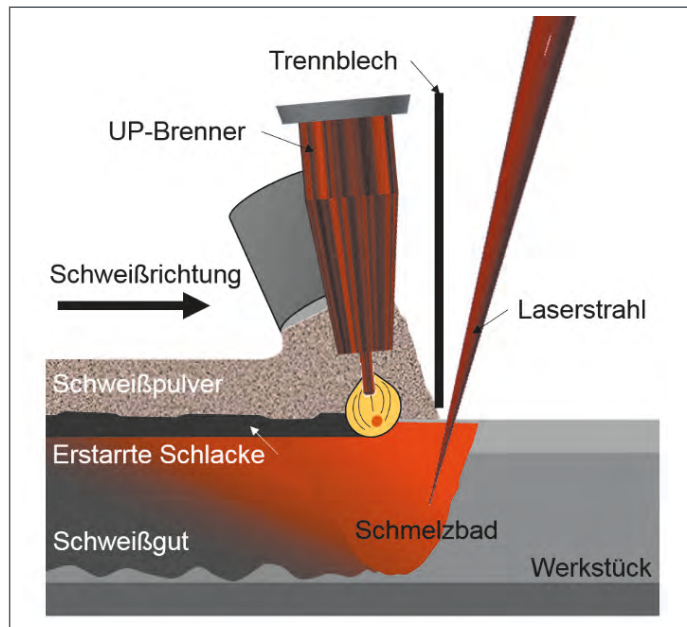


Abbildung 3: LB-UP Hybrid; schematisch

Als Schweißzusatzwerkstoff wurde eine nickelhaltige Drahtelektrode (S<sub>2</sub>Ni<sub>2</sub>) mit einem Durchmesser von 4 mm verwendet. Das aluminatbasierte Schweißpulver hat einen Basizitätsindex nach Boniszewski von 3,2.

schließlich mit verschiedenen Mess- und Evaluierungsmethodiken untersucht und ausgewertet.

### SCHWEISSVERSUCHE UND DISKUSSION

In einer ersten Versuchsreihe wurden vergleichende Untersuchungen bei verschiedenen Anstellwinkeln der Laserstrahl-optik und Prozessabständen

Abbildung 5: Anlagenaufbau LB-UP Hybrid

Der Durchmesser des Lichtleitkabels beträgt 200 µm, so dass sich in Verbindung mit den anderen Strahlformenden Komponenten ein mathematisch bestimmter Fokussdurchmesser von 0,4 mm ergibt. Der Aufbau der gesamten Schweißanlage ist in **Abbildung 5** zu sehen.

Im Folgenden werden Schweißversuche angestellt welche zum Ziel haben den hybriden Charakter des Verfahrens herauszustellen. Dazu werden vergleichende Schweißnähte bei unterschiedlichen Prozessabständen und Anstellwinkeln der LB-Optik erzeugt und an-



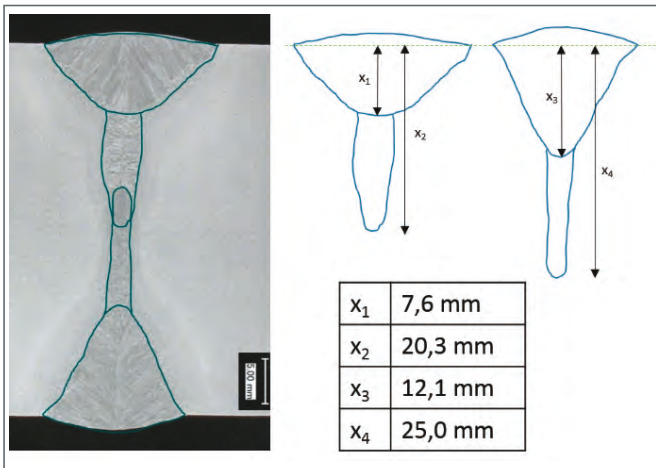
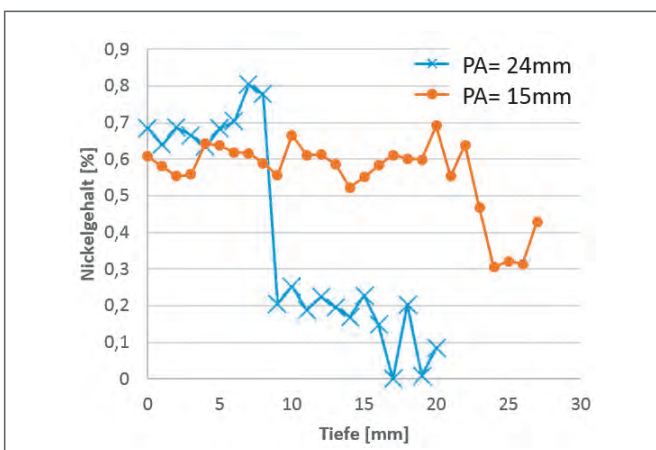


Abbildung 6:  
Anstellwinkel der LB-Optik 0° (oben) und 15° (unten)

(PA) durchgeführt. Im Detail wurde der Anstellwinkel der Laserstrahl-optik von 0° zur senkrechten der Werkstückoberfläche auf einen Winkel von 15° verändert, sowie der Prozessabstand von 24 mm auf 15 mm verringert, **Abbildung 6**.

Die Schweißnaht **Abbildung 6 (oben)** wurde einem Anstellwinkel der LB-Optik von 0° und einem Prozessabstand von 24 mm geschweißt. Die Schweißnaht **Abbildung 6 (unten)** wurde mit einem Anstellwinkel der LB-Optik von 15° und einem Prozessabstand von 15 mm geschweißt. Für beide Schweißversuche wurden eine Laserstrahlleistung von 16 kW und eine

Abbildung 7:  
EDX-Schweißgutanalyse



Drahtvorschubgeschwindigkeit von 2,1 m/min gewählt. Die Schweißgeschwindigkeit betrug 0,6 m/min. Die geometrische Ausformung der beiden Schweißnähte unterscheidet sich maßgeblich. Qualitativ lässt sich die Form des UP-Bereichs der oberen Schweißnaht als eher flach und breit, und der UP-Bereich der unteren Schweißnaht als eher schmal und tiefreichend beschreiben. Quantitativ weist der UP-dominierte Schweißnahtbereich der oberen Schweißnaht eine Tiefe von etwa 7,5 mm auf, wohingegen der UP-Bereich der unteren Schweißnaht eine Tiefe von etwa 12 mm aufweist. Bei Betrachtung der LB-dominierten Schweißnahtbereiche fällt auf, dass der LB-Bereich der unteren Schweißnaht schmaler und tiefreichender ist als der der oberen Schweißnaht. Für die Schweißnaht mit senkrechter LB-Optik Anstellung und einem PA von 24 mm konnte eine gesamte Einschweißtiefe von etwa 20 mm ermittelt werden. Die Schweißnaht mit einer 15° Anstellung der LB-Optik und einem PA von 15 mm weist bei sonst unveränderten Schweißparametern eine Einschweißtiefe von 25 mm auf. Bei genauer Betrachtung des Querschliffs fällt des Weiteren auf, dass sich die Orientierung des Dendritenwachstums im LB-dominierten Schweißnahtbereich bei den beiden Schweißnähten unterscheidet. Bei der oberen Schweißnaht ist eine scharfe Veränderung der Orientierung am Übergangspunkt von UP- zu LB-dominierten Schweißnahtbereich zu erkennen. Dies deutet auf zwei separierte Schweißnahtbereiche hin. Bei der unteren Schweißnaht gibt es einen Übergangsbereich zwischen

UP- und LB-dominierten Schweißnahtbereich in dem sich die Orientierung der Dendriten stetig verändert. Dies deutet auf die Ausbildung eines gemeinsamen Schmelzbades hin (Eigenschaft eines hybriden Schweißprozesses).

Vor dem Hintergrund die getroffene Annahme, dass es sich bei **Abbildung 6 (oben)** um einen seriellen Schweißprozess von Laserstrahl- und UP-Schweißprozess handelt weiter zu untermauern, es sich jedoch bei **Abbildung 6 (unten)** um einen hybriden Schweißprozess handelt, wurden weiterführende Untersuchungen angestellt. Es wurden EDX-Analysen des Schmelzgutes der beiden Schweißnähte angefertigt, **Abbildung 7**.

Da für die Schweißversuche ein nickelhaltiger Schweißzusatzwerkstoff verwendet wurde, dient dieses Element als guter Indikator für eine etwaige Durchmischung von LB- und UP-Schmelzgut. Der Grundwerkstoff weist mit etwa 0,014 % (einen verschwindend geringen Nickelgehalt auf. Von der Werkstückoberfläche aus (Tiefe 0 mm) in Richtung Schweißnahtinneres weisen die beiden Kurven bis zu einer Tiefe von etwa 8 mm vergleichbare Nickelgehalt von etwa 0,6 % bis 0,7 % auf. Der Nickelgehalt für die Schweißprobe welche mit einem Anstellwinkel von 0° und einem PA von 24 mm geschweißt wurde, **Abbildung 6 (oben)**, fällt jedoch ab etwa 8 mm im Werkstück inneren schlagartig auf etwa 0,2 % ab. Dieser Wert befindet sich im Bereich der Detektionsgrenze der Analyse-methode. Eine Durchmischung beider Schmelzbäder hat demnach nicht stattgefunden. Der Verlauf des

Nickelgehaltes für die Schweißprobe welche mit einem Anstellwinkel von 15° und einem PA von 15 mm geschweißt wurde, **Abbildung 6 (unten)**, weist diesen signifikanten Bruch nicht auf. Hier lässt sich eine stetige, leichte Abnahme des Nickelgehaltes bis auf einen Wert von 0,3 % bis 0,4 % in einer Tiefe von 25mm feststellen. Dieser Wert liegt weit über dem Nickelgehalt des Grundwerkstoffs. Es kam also zu einer relevanten Durchmischung der Schmelzbäder bis in den Wurzelpunkt des LB-dominierten Schweißnahtbereichs hinein.

Ferner wurden von einer Schweißnaht welche mit einem Anstellwinkel der LB-Optik von 15° und einen PA von 15 mm gefügt wurde Härteprofile aufgenommen, **Abbildung 8**.

Gemessen von der Schweißnahtoberfläche bis in die Tiefe der Schweißnaht steigt die Härte von etwa 210 HV1 stetig bis auf maximal 245 HV1 im Wurzelpunkt der Schweißnaht an.

Bei Betrachtung der Schweißnahtoberflächen im Einlaufbereich sind ebenfalls Auffälligkeiten festzustellen. **Abbildung 9 (oben)** zeigt eine Schweißnahtoberfläche mit senkrechter LB-Optik Anstellung und einem PA von 24 mm. **Abbildung 9 (unten)** zeigt eine Schweißnahtoberfläche welche mit einer Anstellung der LB-Optik von 15° und einem PA von 15 mm geschweißt wurde.

Auf den ersten 6 cm bis 7 cm weisen die Schweißnahtoberflächen beide eine einheitliche Breite von etwa 18 mm auf. Wohingegen diese Breite für

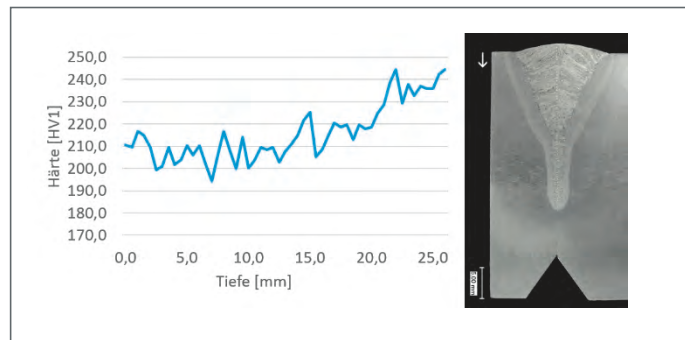


Abbildung 8: Härteverlauf LB-UP Hybrid

die obere Schweißnaht über die gesamte Schweißnahtlänge konstant bleibt, schnürt sich die Breite der Schweißnahtoberfläche bei der unteren Schweißnaht nach einigen Zentimetern deutlich sichtbar auf eine Breite von etwa 14 mm ein. In weiterführenden Versuchen konnte beobachtet werden, dass sofern es zum Einschnüren der Schweißnahtoberfläche kommt, dies ebenfalls mit einer Ausformung der Schweißnaht im Werkstückinneren gemäß **Abbildung 6 (unten)** einhergeht. Das Einschnüren der Schweißnahtoberfläche fungiert also als geeignetes Anzeigeinstrument ob die Schweißnaht hybride Eigenschaften aufweist oder nicht.

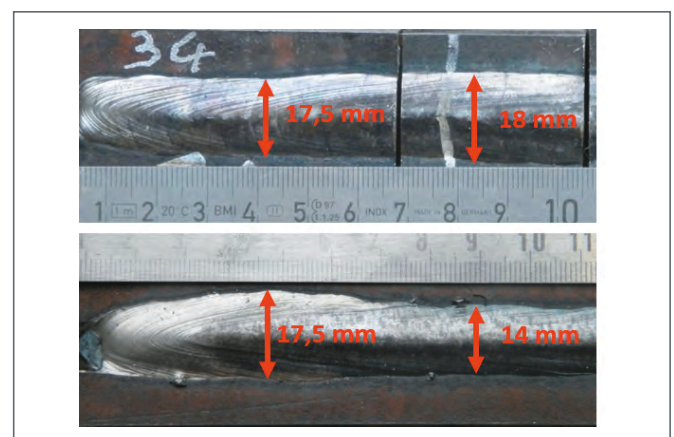
### ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

In dieser Arbeit wurde gezeigt, dass sich bei einer Anstellung der Laserstrahl-Optik von 15° zur Werkstücksenkrechten und einem Prozessabstand von 15 mm ein hybrider Schweißprozess zwischen dem Laserstrahl- und dem Unterpulver-Schweißprozess einstellt. Dies wurde anhand von EDX-Analysen des Schweißgutes über die gesamte Tiefe der Schweißnaht nachgewiesen. Im Wurzelpunkt der Schweißnaht lassen sich noch

große Anteile vom durch den UP-Prozess eingebrachten Zusatzwerkstoff detektieren. Mit dem LB-UP Hybrid-schweißverfahren lassen sich bei einer Laserstrahlleistung von 16 kW, Drahtvorschubgeschwindigkeit von 2,1 m/min und einer Schweißgeschwindigkeit von 0,6 m/min Einschweißtiefen von etwa 25 mm erreichen. Die Aufhärtung der Schweißnaht erweist sich als äußerst gering mit einem Maximalwert von etwa 245 HV1 im Wurzelpunkt der Schweißnaht. Darüber hinaus wurden Auffälligkeiten an der Schweißnahtoberfläche herausgestellt und erkannt, dass eine Einschnürung der Oberflächenbreite auf einen hybriden Schweißprozess hindeutet.

In weiterführenden Arbeiten wird das Augenmerk auf der

Abbildung 9: Schweißnahtoberflächen



Untersuchung der mechanisch-technologischen Eigenschaften liegen. Es werden verschiedene Schweißdraht-Pulver-Kombinationen erprobt und deren Einfluss auf die Kerbschlagzähigkeit, Aufhärtung sowie Ausbildung des Mikrogefüges evaluiert.

### FÖRDERHINWEIS

Das IGF-Projekt „Erprobung des Laserstrahl-Unterpulver-Hybridschweißverfahrens für die industrielle Anwendung im Bereich großer Blechdicken (LU-PuS)“, IGF-Projekt Nr. 19.039 N, der Forschungsvereinigung Stahlanwendung e. V. FOSTA, Sohnstraße 65, 40237 Düsseldorf wurde von der AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) des Bundesministeriums für Wirtschaft und Energie auf der Grundlage eines Erlasses der Deutschen Bundestages gefördert.



### Literatur

- [1] Hoops, K., Schumacher, P. (2011) Wirtschaftliche schweißtechnische Produktion von Großkomponenten für Offshore-Windenergieanlagen, DVS-Berichte Band 277, Schweißen im Schiffbau und Ingenieurbau, 47–52
- [2] Houldcroft, P.T. (1989) Submerged-Arc Welding, Woodhead Publishing Series in Welding and Other Joining Technologies, Woodhead Publishing, 9–26.
- [3] Gericke, A. (2013) Wirtschaftliches UP-Quer-Schweißen an größeren Blechdicken in der Offshorestruktur- und Schiffskörperendmontage, DVS-Berichte Band 296, Große Schweißtechnische Tagung, Essen, DVS-Verlag, 1229–1234
- [4] Matthes, K.-J., Richter, E. (2008) Schweißtechnik – Schweißen von metallischen Konstruktionswerkstoffen, Carl Hanser Verlag GmbH Co. KG, Auflage: 4, 135–137
- [5] Reisgen, U., Stein, L. (2016) Fundamentals of joining technologies – Welding, brazing and adhesive bonding, DVS-Media, 119–132
- [6] Vollertsen, F., Rethmeier, M., Gumenyuk, A., Grünewald, S., Reisgen, U., Olschok, S. (2010) Welding thick steel plates with fibre lasers and GMAW, Welding in the World 54, 62–70.
- [7] Seffer, O., Lindner, J., Springer, A., Kaierle, S., Wesling, V., Haferkamp, H. (2012) Laser GMA hybrid welding for thick wall applications of pipeline steel with the grade X70, International Congress on Applications of Lasers and Electro Optics, Anaheim, USA, 494–501.
- [8] Dilthey, U., Woeste, K., Olschok, S. (2005) Modern beam-welding technologies in advanced pipe manufacturing, 4th European Conference on Steel and Composite Structures, Eurosteel, Netherlands, 2.2–9
- [9] Kah, P. (2012) Overview of the Exploration Status of Laser-Arc Hybrid Welding Processes, Rev. Adv. Mater. Sci. 30, 120–121.
- [10] Coiffier, J.C., Jansen, J.P., Peru, G., Claeys, J. (1997) Combination of laser beam and submerged arc processes for the longitudinal welding of large welded pipes, International Symposium of High Strength Steels, Trondheim, Norway.
- [11] Krivstun, I., Seyffarth, P. (2002) Laser Arc Processes and their Applications in Welding and Material Treatment, Taylor & Francis, London.
- [12] Reisgen, U., Olschok, S., Jakobs, S. (2012) Laser beam submerged arc hybrid welding, Physics Procedia 39, 75–83.
- [13] Reisgen, U., Olschok, S., Jakobs, S. (2014) Laser submerged arc hybrid welding (LUPuS) with solid state lasers, Physics Procedia 56, 653–662.
- [14] Reisgen, U., Olschok, S., Jakobs, S., Engels, O. (2016) Modern hybrid welding process for structural steelwork engineering – Laser submerged arc hybrid welding, Journal of Laser Applications 28
- [15] Reisgen, U., Olschok, S., Engels, O. (2017) Innovative hybrid welding process for structural steelwork engineering – Laser submerged arc hybrid welding, Journal of Laser Applications 29

### Kontakt:

Dr.-Ing. Simon Olschok  
Tel.: 0241 8096253  
E-Mail: olschok@  
isf.rwth-aachen.de

Klebtechnik am ISF:

# AKTUELLE ERGEBNISSE UND AUSBLICK IN DIE ZUKUNFT

Bernd Marx, Johannes Schönberger, Julia Schoft,  
Josef Weiland



Die Abteilung Klebtechnik am ISF beschäftigt sich mit innovativen klebtechnischen und artverwandten Fügeverfahren. Den Schwerpunkt bilden dabei die Erforschung der gesamten klebtechnischen Prozesskette über die Teilaspekte der Gestaltung und Auslegung, der Oberflächenvorbehandlung mitsamt der Integrierbarkeit in vollautomatisierte Fertigungsprozesse, des eigentlichen Fügeprozesses, der Reparaturkonzepte für geklebte Verbindungen und Strukturen aus faserverstärkten Kunststoffen und des Structural Health Monitoring ebendieser.

Kleben ist aus dem Alltag nicht mehr weg zu denken. Selbsthaftende Notizzettel im Büro, Klebstifte in Kindergärten und Schulen, der Handtuchhaken im Badezimmer, wind- und wasserdichte Funktionskleidung für die Outdoor Aktivitäten oder die Etiketten auf der Getränkeflasche. All diese Anwendungen und viele mehr wären ohne Klebstoffe nicht möglich.

Aber nicht nur im Haushalts- und Alltagsgebrauch sondern auch in weiten Teilen der Industrie hat sich das Kleben als Fügeverfahren durchgesetzt.

Bekannte Beispiele hierfür sind das Einkleben von Frontscheiben im Kraftfahrzeugbau, das Kleben von Komponenten im Windanlagenbau, der Möbel- und Haushaltswarenindustrie oder das Kleben von

Fassadenelementen im Bauwesen. Weniger bekannte, aber nicht weniger anspruchsvolle Klebverbindungen, finden sich in der Tier- und Humanmedizin.

Aus der kurzen Einleitung wird sichtbar, dass die Fügetechnik Kleben durch ihre universelle Einsetzbarkeit ein extremes Potential hat – in Fachkreisen heißt es sogar, dass die Kleb-

technik die Füge-technik des 21. Jahrhunderts ist.

Die Arbeiten am ISF spiegeln die universelle Einsetzbarkeit der Klebtechnik sehr gut wider. Leitthemen sind aktuell die Prozessentwicklung und -optimierung, die Verbundcharakterisierung, das Structural Health Monitoring (kurz SHM) sowie Reparaturstrategien für Faserverbundwerkstoffe. Nachfolgend wird ein Überblick über die aktuellen Forschungsarbeiten gegeben, sowie ein Ausblick auf zukünftige Forschungsthemen.

### AUSLEGUNG VON GLAS-METALL KLEBVERBINDUNGEN IM BAUWESEN „GLASKLEBEN“

Jede lastabtragende geklebte Verbindung in Deutschland benötigt eine Zustimmung im Einzelfall oder eine allgemeine bauaufsichtliche Zulassung. Diese Verfahren sind sehr kosten- und zeitintensiv. Vorbehalte gegenüber lastabtragend geklebten Verbindungen (Structural Glazing) rühren vor allem aus einer nicht vorhandenen konsistenten Methodik zur Auslegung und zuverlässigen Simulation dieser Verbindungen (vergl. **Abbildung 1**).

Ziel des Projektes „Glaskleben“ ist deswegen die Ableitung einer solchen konsistenten

Auslegungsmethodik von Klebverbindungen im Bauwesen, insbesondere unter Berücksichtigung der modell- und spannungszustandsabhängigen Materialparameter. Dazu verfolgt das Projekt ein klar gegliedertes und abgestecktes Arbeitsprogramm aus Kennwertversuchen unter Berücksichtigung der Materialmodellierung, der Validierung der aufgestellten Materialmodelle an typischen Struktursituationen und bauteilähnlichen Strukturen und der Schädigung (Mullins-Effekt). Nach erfolgreicher Durchführung des Projektes sollen den KMU, wie z. B. Ingenieurbüros, Metallbauern und Fassadenbauern, Bemessungsmöglichkeiten und die erforschte Methodik zusammengefasst in einem ingenieur-technischen Leitfaden bzw. Handbuch mitsamt der Beschreibung einfach zu realisierender Kennwertversuche an die Hand gegeben werden.

Das IGF-Projekt 19158 N/2 der Forschungsvereinigung „DECHEMA Gesellschaft für Chemische Technik und Biotechnologie e.V.“ wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Außerdem bedanken sich die Autoren bei allen Beteiligten Projektpartnern.

### THERMISCHES DIREKTFÜGEN VON METALL UND THERMOPLASTISCHEM KUNSTSTOFF

Das Thermische Direktfügen (TDF) hat sich in den letzten Jahren zu einer vielversprechenden Füge-technologie für die Verbindung von Metall und thermoplastischem Kunststoff entwickelt. Durch Wärmeeinbringung in das Metallbauteil wird der mit dem Metall in Kontakt stehende thermoplastische Kunststoff lokal aufgeschmolzen. Im flüssigen

Abbildung 1: Schematische Darstellung einer Structural Glazing Konstruktion (Bild: Kömmerling Chemische Fabrik GmbH, Pirmasens)

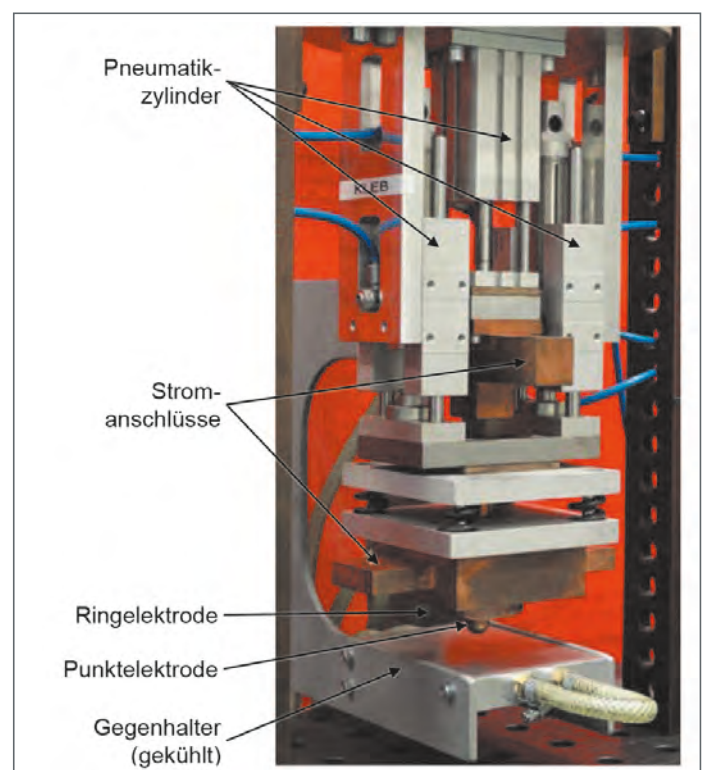
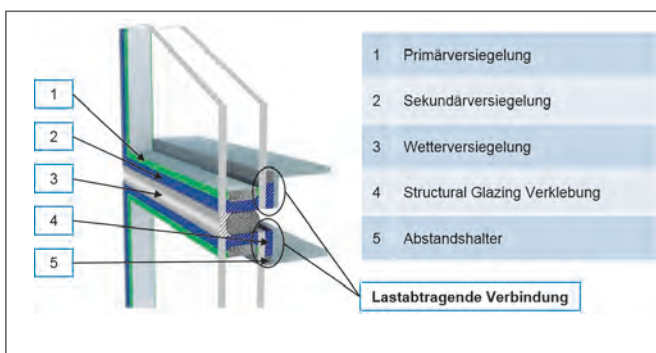


Abbildung 2: Anlage zum thermischen Direktfügen mit Widerstandserwärmung



Zustand kann die Polymer-schmelze ein metallisches Bauteil gut benetzen und es bilden sich, analog zu einem Klebstoff, Haftungskräfte auf Basis zwischenmolekularer Wechselwirkungen zwischen den Fügepartnern aus. So erreicht der Verbund nach der vollständigen Erstarrung des thermoplastischen Kunststoffes bereits seine Endfestigkeit, wodurch, abhängig von der Art der Wärmebringung, Taktzeiten von wenigen Sekunden möglich sind. Am ISF wird das TDF mittels Widerstands- und Induktionserwärmung untersucht.

Beim TDF mittels Widerstandserwärmung wird das zu fügende Metallblech mit Elektroden kontaktiert und über einen angepassten Strom-Zeit-Verlauf auf Prozesstemperatur erwärmt und für einige Sekunden auf dieser gehalten. Hierzu kann konventionelle Widerstandsschweißtechnik verwendet werden. Die Vorteile dieser Technologie liegen in den sehr kurzen Aufheizzeiten von wenigen Sekunden. **Abbildung 2** zeigt den kompakten Aufbau einer Anlage zum TDF mit Widerstandserwärmung. Diese besteht aus einer Ringelektrode und einer innenliegenden, konzentrisch geführten Punktelektrode, wie

sie aus dem Widerstandspunktschweißen bekannt ist. Durch diese Elektrodenkonfiguration ist eine gezielte Wärmebringung für das Fügen kleiner Flächen möglich.

**Abbildung 3** zeigt eine Kopfzugprobe inkl. Bruchfläche, welche mit dem TDF gefügt wurde. Das Bruchbild weist ein kohäsives Versagen im Kunststoffsubstrat auf, was auf eine gute Adhäsion zwischen diesem und dem Metallblech hinweist.

Beim TDF mit induktiver Erwärmung wird ein an das Werkstück angepasster Induktor bis auf wenige Zehntelmillimeter an das Metallfügeteil herangeführt. Der Induktor erzeugt ein hochfrequentes Magnetfeld, welches durch Wirbelstromverluste im metallischen Werkstück zu dessen Erwärmung führt.

Der Vorteil der induktiven Erwärmung liegt in der homogenen Wärmebringung in das Metall und der besseren Prozessregelung, welche beispielsweise über Pyrometrie oder Infrarot-Thermografie erfolgen kann. Dies ermöglicht das Fügen größerer Flächen ohne lokale Überhitzungen als dies bei der Widerstandserwärmung möglich ist. In aktu-

ellen Untersuchungen wird das TDF mit induktiver Erwärmung und Ultraschallunterstützung erprobt. Ziel ist es, durch die Ultraschallanregung des thermoplastischen Kunststoffes eine verbesserte Benetzung der Polymerschmelze auf der Metalloberfläche zu erreichen, um die Adhäsion zu verbessern und somit die Haftung der Fügebauteile zu erhöhen.

Mögliche Anwendungsgebiete des TDF sind semistrukturale Metall-Kunststoff Verbindungen, Beschichtungen, Interieur Dekors, Vorfixierungen für Klebverbindungen und weitere Anwendungen bei denen kurze Prozesszeiten angestrebt werden.

Gefördert durch die Deutsche Forschungsgemeinschaft. Außerdem danken sich die Autoren bei allen Beteiligten Projektpartnern.

### STRUKTURELLE REPARATUR VON FASERVERBUNDKUNSTSTOFFEN „CFK-WERKSTATT“

Der wachsende Einsatz von faserverstärkten Kunststoffen (FVK) im Automobilbau stellt die Automobilindustrie und die kleinen und mittleren Kfz-Werkstätten vor die Herausforderung, wirtschaftliche Reparaturmethoden bereitzustellen. Hierzu werden an der RWTH Aachen University in enger Zusammenarbeit zwischen sechs Forschungsinstituten und begleitet von ca. sechzig Industrieunternehmen neue Technologien zur Schadenserkennung, Schadensbewertung und Reparatur entwickelt.

Die Forschungsinhalte des ISF liegen in erster Linie im Bereich des eigentlichen Reparaturprozesses, welcher aus den Arbeitsschritten Strukturvor-

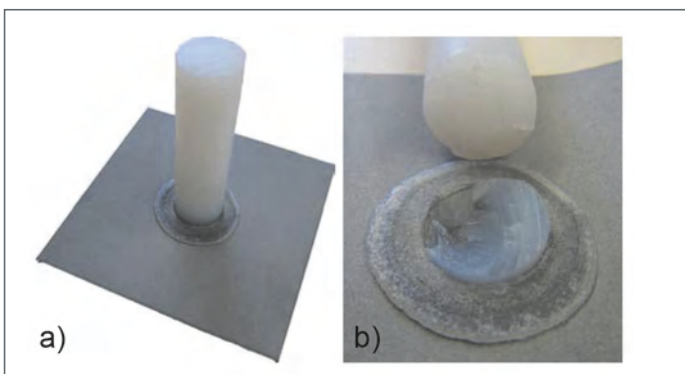


Abbildung 3: a) Thermisch direkt gefügte Kopfzugprobe aus PA 6 und DC04; b) Detailaufnahme Bruchfläche

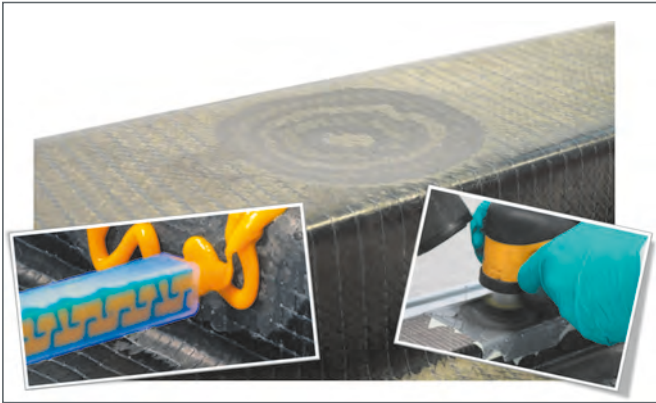
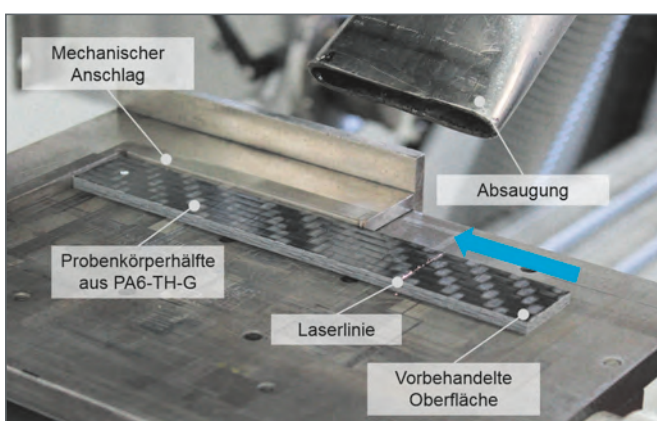


Abbildung 4:  
Reparaturprozess für Strukturbauteile  
aus faserverstärkten Kunststoffen

bereitung, Oberflächenvorbehandlung und Fügeprozess besteht (vergl. **Abbildung 4**). Neben der Reparatur mit Hartpatches aus FVK wird auch die Reparatur ohne strukturelles Zusatzmaterial sowie mit metallischen Patches untersucht.

Nach derzeitigem Stand der Untersuchungen ist für die Strukturvorbereitung ein kontinuierliches Schäften der schadhafte Stelle an der Karosserie sowie des individuell gefertigten Reparaturpatches zielführend. Aus Gründen der Wirtschaftlichkeit, Handhabbarkeit und Zugänglichkeit, wird die Karosserie manuell unter Verwendung eines Exzentrerschleifers geschäftet. Dagegen wird die Schäftung des Patches nachfolgend unter Verwendung der Daten einer 3D-Vermessung der händisch geschäfteten Stelle als Negativ automatisiert gefräst.

Abbildung 5:  
Oberflächenflächenvorbehandlung eines  
Fügeteils durch CO<sub>2</sub>-CW Laserstrahlung



Werden Patches mit duroplastischer Matrix verwendet, ist keine zusätzliche Oberflächenvorbehandlung notwendig, da bei Zugscherversuchen bereits infolge einfachen Reinigens mit Lösungsmitteln kohäsives Versagen zu beobachten ist. Für Patches mit thermoplastischer Matrix ist eine Oberflächenvorbehandlung durch Atmosphärendruckplasma mit Stickstoff zielführend. Als geeignete Klebstoffe erwiesen sich ein System auf Polyurethanbasis der Firma Ashland sowie ein System auf Epoxidharz- und Acrylatbasis der Firma 3M mit integrierten Glasperlen und Farbindikator.

Das IGF-Vorhaben 18.757N, 18.758N und 26LN der Forschungsvereinigung „Vereinigung zur Förderung des Institutes für Kunststoffverarbeitung in Industrie und Handwerk an der RWTH Aachen e.V.“ wird über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Außerdem bedanken sich die Autoren bei allen Beteiligten Projektpartnern.

### OBERFLÄCHENVOR- BEHANDLUNG BEIM KLEBEN VON FASER- VERBUNDKUNSTSTOFFEN MIT DEM LASER „PROPHOMULA“

Für hochfeste Strukturen und Gewichtsreduzierung werden FVK, neben anderen Industriezweigen, besonders für die Automobilbranche zunehmend relevant. Durch stetigen Wettbewerb, ständige Innovation und gesetzliche Vorgaben zu Kohlenstoffdioxid- und Abgasemissionen sowie Crash-Anforderungen wird der Einsatz dieser Werkstoffe in Zukunft

notwendig. Um die Potentiale der FVK voll auszuschöpfen, ist ein passendes Fügeverfahren notwendig. Kleben ist hierfür das optimale Fügeverfahren. Fertigungsrückstände wie Verunreinigungen und Trennmittel auf der Fügefläche des FVK müssen vor dem Kleben entfernt werden. Eine Möglichkeit zur Entfernung der Fertigungsrückstände, bei gleichzeitiger Oberflächenaktivierung, ist die Oberflächenvorbehandlung mit Laserstrahlung (vergl. **Abbildung 5**).

Ziel des Projektes war es, herauszufinden, ob der Einsatz von Laserstrahlung für die klebtechnische Vorbehandlung von FVK im Bereich der automobilen Fertigung geeignet ist. Des Weiteren musste überprüft werden, ob die so hergestellten Klebverbindungen einer Alterung im feuchten Klima nach DIN EN 11997-1 Zyklus B standhalten. Außerdem sollte eine Demonstrator-Laborzelle entwickelt und aufgebaut werden, die die Integrierbarkeit der Laserstrahlvorbehandlung in einen automatisierten klebtechnischen Prozess für die Automobilindustrie aufzeigt.

Im Zuge der Identifizierung geeigneter Laserstrahlparameter wurden duroplastische und thermoplastische FVK mit verschiedenen Laserstrahlquellen und Einstellungen vorbehandelt und in Verbindung mit einem 2K-Polyurethan- und einem 2K-Epoxidharzklebstoffsystem untersucht. Zur Vorbehandlung wurden UV-, UKP-, CO<sub>2</sub>-TEA- und CO<sub>2</sub>-CW-Laserstrahlensysteme eingesetzt. Die Fügeteile wurden im Zugschertest nach DIN EN 1465 geprüft und die Bruchart nach DIN EN ISO 10365 bestimmt.

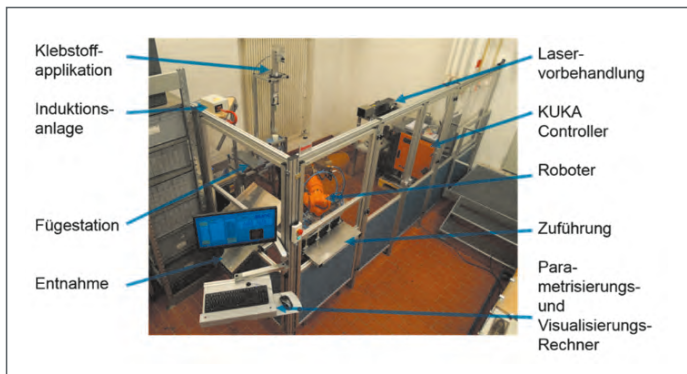


Abbildung 6: Demonstrator Laborzelle

Es konnten geeignete Laserstrahlparameter für jede Materialkombination identifiziert werden, die neben einer ausreichend hohen Zugscherfestigkeit, sowohl vor als auch nach Alterung im feuchten Klima, kohäsive Bruchbilder aufzeigen. Des Weiteren konnte ein geeigneter automatisierter klebtechnischer Fertigungsprozess (Demonstrator-Laborzelle, vergl. **Abbildung 6**) mit Laserstrahlvorbehandlung für die Herstellung einer beispielhaften Multi-Material-Struktur aus FVK und Metall aufgebaut werden.

Die Autoren bedanken sich beim Bundesministerium für Bildung und Forschung (BMBF) für die Zuwendungen im Rahmen des Förderprogramms „Photonische Verfahren und Werkzeuge für den ressourceneffizienten Leichtbau“ zu dem Teilvorhaben „Erforschung eines automatisierten Gesamtprozesses“ (FKZ:13N12771). Außerdem bedanken sich die Autoren bei allen Beteiligten Projektpartnern.

### KLEBTECHNISCHE HORNSPALTVERSORGUNG BEI PFERDEN „EQUINEHOOFREPAIR“

Eine häufige Erkrankung bei Pferden ist das Auftreten von Hornspaltdefekten am Huf (vergl. **Abbildung 7**). Hornspaltdefekte sind vertikal ver-

laufende Trennungen in der Hufwand. Die Ursachen für Hornspaltdefekte liegen in ungleichmäßigen Belastungsverhältnissen, resultierend aus einer nicht sachgerecht durchgeführten Hufbearbeitung, einem nicht sachgerechten Hufbeschlag oder Huf fehlstellungen. Außerdem können Hornspaltdefekte aus einer schlechten Hornqualität oder einer Verletzung resultieren.

Um eine funktionierende Biomechanik wiederherzustellen, müssen gleichmäßige Belastungsverhältnisse an der Hufwand vorherrschen. Im Bereich der Hornspaltdefekte treten Spannungsspitzen in der Hufwand auf, die ungleichmäßige Belastungsverhältnisse zur Folge haben. Daraus folgt, dass die Hufwand im Bereich des Hornspaltes lokal entlastet werden muss. Neben dem



Abbildung 7: Hornspaltdefekt am Pferdehuf

Einsatz eines Hornspaltfüllers ist die Anwendung eines Hornspaltpfisters zielführend, um so die Spannungsspitzen und den Rissfortschritt zu reduzieren.

Ziel dieses Projektes ist die Entwicklung eines Hufhornspaltpfisters einschließlich eines auf die besonderen Benetzungseigenschaften des Hufes abgestimmten Klebstoffes zur Fixation des Hufhornspaltpfisters.

Gefördert durch Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages. Außerdem bedanken sich die Autoren bei allen Beteiligten Projektpartnern.

### AUSBLICK IN DIE ZUKUNFT

#### Untersuchung des Alterungsverhaltens und der Gebrauchseigenschaften beim Thermischen Direktfügen von Metallen und thermoplastischen Kunststoffen „AGeD“

Die Oberflächenvorbehandlung nimmt beim TDF, genauso wie bei anderen adhäsiven Fügeverfahren (wie z. B. dem Kleben), eine entscheidende Rolle ein. Der Prozess gliedert sich damit in zwei wesentliche Prozessschritte: Die Vorbehandlung der Metalloberfläche und den Fügeprozess. Eine effiziente Methode für die Vorbehandlung der Metalloberfläche ist z. B. die Lasermikrostrukturierung. Für eine Überführung des TDF in die industrielle Anwendung fehlt es derzeit jedoch an ausreichendem Wissen hinsichtlich der Verfahrensgrenzen in Bezug auf die Größe der herstellbaren Fügezonen sowie der Temperaturwechsel- ( $\Delta\alpha$ -Pro-

blematik) und Korrosionsbeständigkeit.

Ziel des beantragten Forschungsvorhabens ist es, einen Anwendungskatalog zu erstellen, der je nach Werkstoffkombination, Fügezonengeometrie und gestellten Anforderungen als Hilfestellung für die Auswahl von Vorbehandlungs- und Fügemethoden zum TDF dienen soll. Damit wird, insbesondere für kleine und mittlere Unternehmen, die Überführung dieser Fügetechnologie in die industrielle Umsetzung erleichtert.

#### Geregelter und überwachter Laserstrahlvorbehandlungsprozess von Faserverbundkunststoffen „ProKleb“

Für FVK ist Kleben das geeignetste und industriell am weitesten verbreitete Fügeverfahren, da es sich dabei um eine Technologie handelt, die dem Faserverbund gerecht wird. Jedoch neigen insbesondere thermoplastische (faserverstärkte) Kunststoffe zu einer schlechten Klebbarkeit. Dies resultiert zum einen aus dem Aufbau der Kunststoffoberfläche und der damit verbundenen niedrigen Oberflächenenergie und kann zum anderen aber auch aus verarbeitungsbedingten Einflüssen herrühren. So können Trennmittelrückstände aus dem Fertigungsprozess an der FVK-Oberfläche zurückbleiben oder Verunreinigungen während Transport- oder Lagerungsphasen entstehen. Um diesen Effekten entgegenzuwirken, sind verschiedene

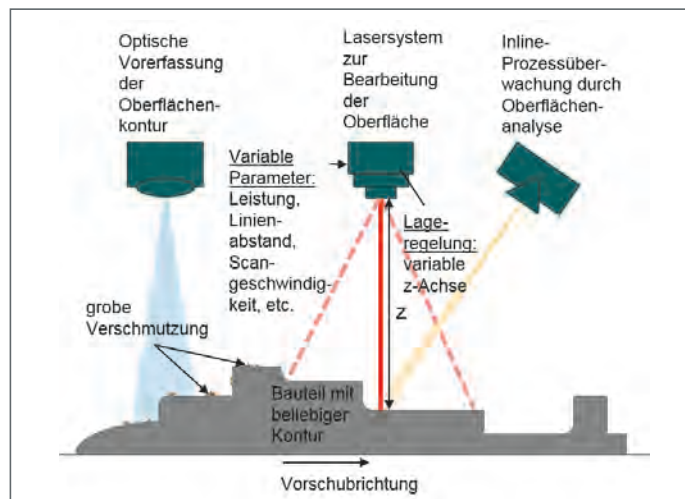


Abbildung 8:  
Schematische Darstellung des zu entwickelnden automatisierten Laserstrahlvorbehandlungsprozesses

Oberflächenvorbehandlungsverfahren verfügbar, jedoch mangelt es an der Möglichkeit einer Inline-Kontrolle des Vorbehandlungsprozesses, sodass eine Automatisierung der Klebvorbehandlung von FVK-Bauteilen nicht gegeben ist. Diese ist aber eine Grundvoraussetzung für die prozesssichere Integration der Oberflächenvorbehandlung bzw. des Klebprozesses für FVK im Rahmen einer automatisierten Serienfertigung.

Im Rahmen des beantragten Projektes soll eine Inline-Prozessregelung für die laserstrahlbasierte Klebvorbehandlung von FVK mittels Pyrometrie und Spektrometrie entwickelt werden. Mit dem Ziel erstmals eine robuste Automatisierung dieses Prozesses für den industriellen Einsatz zu ermöglichen. Dabei handelt es sich um zwei optische Messverfahren, mit denen lokal die Oberflächentemperatur respektive die Zusammensetzung der Oberfläche ermittelt werden kann. Beide Verfahren sollen in Kombination mit einem Laserverfahren zur Klebvorbehandlung eingesetzt werden (vergl. **Abbildung 8**).

Nach erfolgreicher Durchführung des Projekts sollen den im projektbegleitenden Ausschuss beteiligten kleinen und mittleren Unternehmen die entwickelte Methodik zur Verfügung gestellt werden, um diese in ihre Anlagentechnik und Serviceleistungen zu integrieren bzw. ihre Absatzmärkte zu erweitern.

### Strukturelle Reparatur von Faserverbundkunststoffen – Umsetzung im Werkstattumfeld „CFK-Werkstatt II“

Während in der ersten Phase des Forschungsvorhabens „CFK-Werkstatt“ seitens des ISF in erster Linie der Reparaturprozess qualifiziert wurde, beziehen sich die Inhalte des ISF für das geplante Folgeprojekt auf die Umsetzbarkeit des Prozesses im Werkstattumfeld sowie auf die Arbeitssicherheit. Da im Verlauf des Reparaturprozesses CFK spanend bearbeitet wird und CFK-Partikel als gesundheitlich bedenklich gelten, ist die Bewertung der Partikelbelastung für die Werkstatt sowie die Ableitung geeigneter und effektiver Arbeitssicherheitsmaßnahmen notwendig. Die Partikelmessungen finden in

einer Modellwerkstatt statt, welche im Rahmen des Folgeprojekts zur Validierung und Veranschaulichung des Prozesses aufgebaut wird.

### Smart Structural Health Monitoring „SmartSHM“

Trotz der zunehmenden Verbreitung der Klebtechnik in strukturellen Bauteilen stellt die Vorhersage und Detektion von Schädigungen innerhalb einer Klebfuge eine besondere Herausforderung dar. Die in der Industrie zur Vorauslegung verwendeten Berechnungsmethoden weisen signifikante Ungenauigkeiten auf. Speziell die Berechnung von Schadensinitiation und Schadensfortschritt sind problematisch. Schwankende Fertigungsqualitäten und mangelndes Wissen im Bereich des Ermüdungsverhaltens unter variierenden Umgebungsbedingungen und Alterungserscheinungen verstärken die Differenz zwischen dem theoretisch vorhergesagten und dem realen Bauteilverhalten. Als Konsequenz fehlt es an breiter Kundenakzeptanz und Vertrauen in die Betriebssicherheit.

Eine weitere Herausforderung stellt die strukturelle Bewertung einer vorhandenen Schädigung dar. Klebverbindungen können nach ihrer Fertigung nicht-destruktiv untersucht werden (z. B. Ultraschall, Lock-In Thermographie). Die gängigen Verfahren ermitteln dabei aber lediglich die Ausdehnung eines beschädigten Bereichs. Die Auswirkung des Schadens auf das strukturmechanische Verhalten wird nicht bestimmt, so dass direkte Rückschlüsse bzgl. der Restfestigkeit und der verbleibenden Lebensdauer nicht gegeben sind.

Ziel des beantragten Forschungsprojektes ist die Erforschung eines effizienten und zuverlässigen Systems für die Strukturzustandsüberwachung (Structural Health Monitoring – SHM), welches in der Lage ist, bei geringem messtechnischen Aufwand einen Schaden zuverlässig und frühzeitig im Betrieb zu erkennen und zu bewerten. Das hier vorgestellte SmartSHM-Konzept baut auf dem Wissen der Strukturmechanik auf (vergl. **Abbildung 9**).

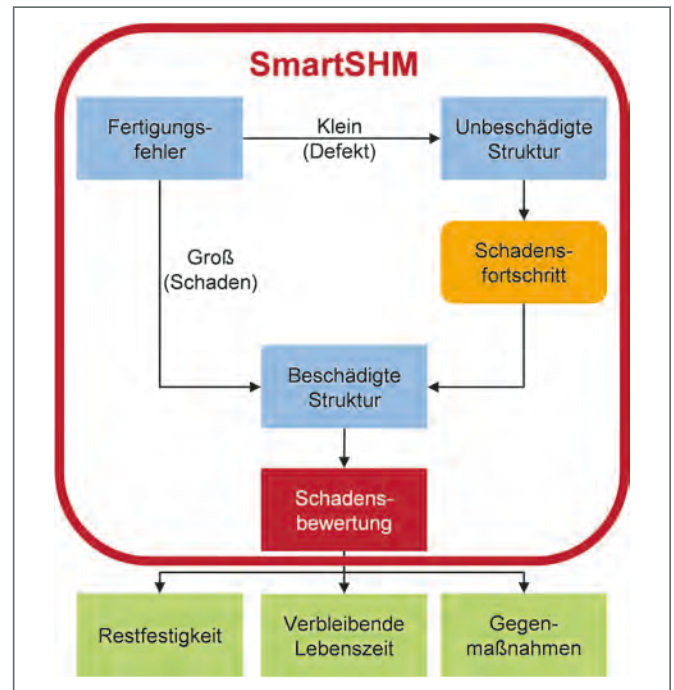
Bereits bei der Auslegung einer Klebung können kritische Bereiche, in denen eine Schadensinitiierung wahrscheinlich ist, zuverlässig identifiziert werden. Durch die Berücksichtigung des Schadens in den statischen Berechnungsmodellen kann die Änderung im strukturmechanischen Verhalten erfasst werden und so effiziente Schadensindikatoren ermittelt werden.

**Einsatz von UV-Klebstoffen zwischen UV-Licht intransparenten Substraten „FiberKleb“**

Ein wesentliches Defizit der Klebtechnik, welches bis dato nicht ausreichend adressiert werden konnte, sind die langen Aushärtezeiten der Klebstoffe. Lediglich UV-härtende Klebstoffe ermöglichen eine vollständige Aushärtung innerhalb von Sekunden. Aufwän-

dige Fixier- und Haltevorrichtungen bis zum Erreichen der Handlingfestigkeit sind nicht notwendig. Bis dato ist der Einsatz von UV-Klebstoffen jedoch nur bei mindestens einem UV-Licht transparenten Füge teil möglich. Der Einsatz von UV-Klebstoffen an intransparenten Füge teilen ist nach aktuellem Stand der Technik nicht möglich. Die spezifischen Vorteile von UV-Klebstoffen, wie die Aushärtung innerhalb weniger Sekunden auf „Knopfdruck“, die einfache Dosierung durch nur eine zu verarbeitende Klebstoffkomponente und die unendliche Offenzeit, können bislang bei UV-Licht intransparenten Füge teilen nicht genutzt werden. Dem ISF ist es gemeinsam mit dem Institut für Textiltechnik (ITA) der RWTH Aachen University durch den Einsatz optischer Polymerfasern (POF) gelungen, UV-Klebstoffe zwischen UV-Licht intransparenten Füge teilen auszuhärten. Dabei wird eine POF in die Klebfuge eingelegt, über die UV-Licht radial oder axial zur Aushärtung des Klebstoffes in der Klebfuge ausgekoppelt wird (vergl. **Abbildung 10**).

Dadurch, dass die POF aus einem Polymer besteht, kann eine gezielte Anpassung der mechanischen Eigenschaften der POF auf die Klebfuge erfolgen, anders als z. B. bei der Verwendung von Glasfasern. Der Einfluss der POF auf den



Kleverbund kann so minimiert oder ggf. sogar eliminiert werden.

Abbildung 9: SmartSHM Konzept

Ziel des beantragten Forschungsprojektes ist es, die FiberKleb-Technologie weiterzuentwickeln und ein grundlegendes Verständnis für die Auswirkungen von POF in einer Klebfuge zu erarbeiten. Die Ergebnisse des Forschungsvorhabens sollen als übergreifendes Ziel Akzeptanzbeschränkungen gegenüber der Klebtechnik aufgrund der langen Aushärtezeiten ausräumen und so neue Anwendungsfelder erschließen.

Kleine und mittlere Unternehmen aus dem Bereich der Systemintegratoren aus UV-Lichttechnik, des Sonderanlagenmaschinenbaus und der anwendenden Industrie profitieren von den Projektergebnissen. Dazu gehören sowohl Ingenieurbüros und Dienstleistungsunternehmen als auch grundsätzlich alle Unternehmen, welche die Fügetechnologie Kleben anwenden.

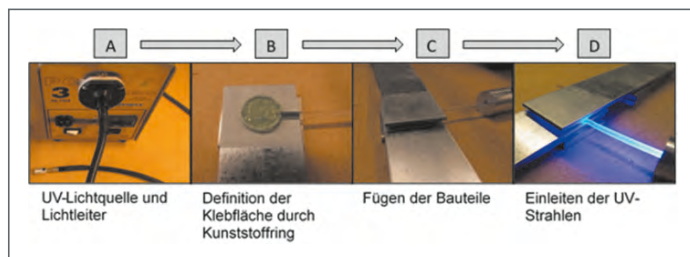


Abbildung 10: Schematischer Ablauf der FiberKleb-Technologie

**Kontakt:**  
 Dr.-Ing. Alexander Schiebahn  
 Tel.: 0241 8097233  
 E-Mail: schiebahn@isf.rwth-aachen.de

# Schweißprozesssimulation – SIMULATIONSGESTÜTZTE ERFORSCHUNG DER PHYSIKALISCHEN PROZESSE VERSCHIEDENER SCHWEISSVERFAHREN

Marek Simon, Andre Schmidt, Dr. Oleg Mokrov

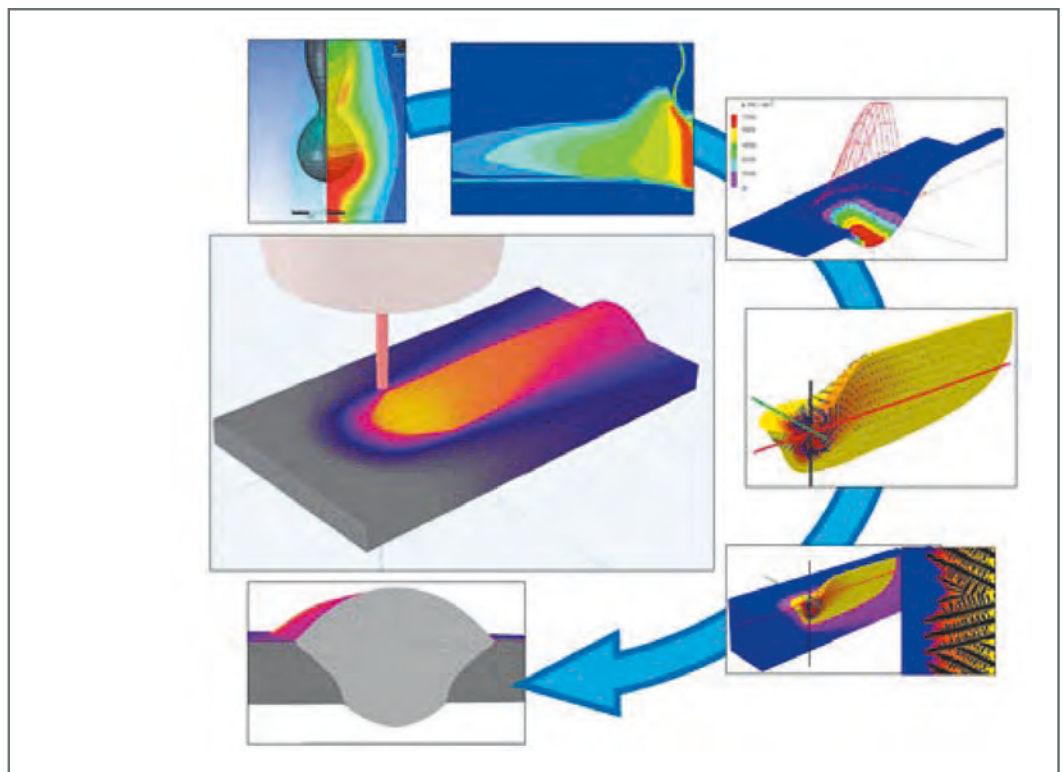


Abbildung 1: Prozesskette des selbstkonsistenten Modells des Lichtbogenschweißens mit Tropfenbildung, Lichtbogenbereich, Fallgebieten, Schmelzbadströmungen, Erstarrung bis zur Schweißnahtgeometrie (TP A4 des SFB 1120)

In der Simulationsgruppe des ISF werden Metallschutzgas-, Unterpulver-, Laserstrahl-, Elektronenstrahl- und hybride Schweißprozesse erforscht. Dazu werden eigenentwickelte Software neben bereits verfügbaren Softwarepaketen eingesetzt.

## SCHWEISSPROZESS-SIMULATION AM ISF

Für viele technische Anwendungen ist der mathematische Zusammenhang oder der Prozess derart komplex, dass eine exakte Lösung gar nicht berechnet werden kann. Daher bieten sich computergestützte Simulationen an, die in Zeiten wachsender Rechnerkapazität eine immer größer werdende Rolle einnehmen. Mit ihnen können numerische Verfahren schnelle und präzise Lösungen für vielfältige Versuchsszenarien erzielen. Dies ermöglicht allgemein eine material- und somit kostensparende Vordimensionierung, hilft Experimente auszulegen oder kann in Bereichen angewandt werden, die in der realen Durchführung zu risikobehaftet, zeitaufwendig oder nicht umsetzbar wären.

Die Schweißsimulation ist nach Radaj (1999) in drei Teilbereiche gegliedert: Struktur-, Prozess- und Werkstoffsimulation. Bei der Struktursimulation ist es das Ziel, die Wirkung des Schweißens auf das Werkstück zu ermitteln, also zum Beispiel die Eigenspannung oder den Verzug. Bei der Prozesssimulation geht es um die Berechnung der Energieeinbringung, der Schweißnahtgeometrie, der Prozessstabilität und des Prozesswirkungsgrades. Die Werkstoffsimulation hat die Aufgabe mikroskopische Änderungen in dem Werkstoff zu simulieren. Diese drei Bereiche unterscheiden sich in den betrachteten Längen- und Zeitskalen, sind aber eng miteinander verknüpft.

In der Simulationsabteilung des Instituts für Schweißtechnik und Fügetechnik der

RWTH Aachen University werden auf Basis theoretischer, experimenteller und numerischer Untersuchungen Modelle für die rechnergestützte Schweißprozesssimulation entwickelt.

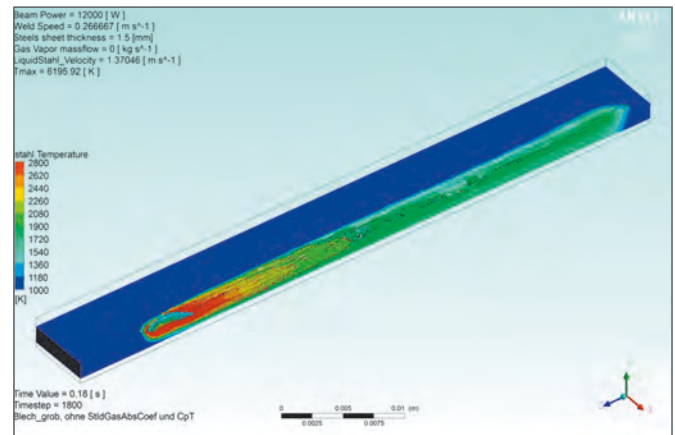
Für die tiefer gehende physikalische Modellentwicklung des Lichtbogenschweißens wird seit einigen Jahren auch das Simulationsprogramm ANSYS CFD verwendet. Dabei werden die Prozesse in Tropfen, Gas und Lichtbogen untersucht.

Die Ergebnisse dieser Arbeiten werden in enger Zusammenarbeit mit Partnern aus Industrie und Forschung in leicht bedienbare Softwareprogramme zur Schweißprozesssimulation, wie zum Beispiel SimWeld, überführt. SimWeld ist eine Ingenieurssoftware zur schnellen numerischen Simulation von Metallschutzgas (MSG) und Unterpulverschweißverfahren (UP).

Darüber hinaus werden Forschungsaufgaben aus anderen Schweißsimulationbereichen in Kooperationen mit Instituten innerhalb sowie außerhalb der Hochschule bearbeitet.

### SIMULATIVE ERFORSCHUNG VON STRAHLSCHWEISS-PROZESSEN

Die am ISF entwickelten Simulationsprogramme sind dazu geeignet, möglichst schnell eine anwendungsnahe Gesamtlösung zu berechnen. Um die physikalischen Phänomene des Schweißprozesses tiefergehend zu untersuchen, wird am ISF auch FEM-Software eingesetzt. Solche Berechnungen mit FEM-Software sind wesentlich zeitaufwändiger –



meist benötigen sie mehrere Tage, manchmal sogar Wochen.

In einem abgeschlossenen Forschungsprojekt wurden mit ANSYS CFD die Humping- und Randkerbbildung beim EB- und Laserstrahlschweißen im Wärmeleitmodus untersucht (**Abbildung 2**).

In einem anderen abgeschlossenen Projekt in Kooperation mit dem Institute of Laser and Welding Technologies der SPBSTU (Russland) ist eine Software erstellt worden, mit der eine Prozesssimulation für das Elektronenstrahlschweißen von Mischverbindungen durchgeführt werden kann.

### SIMULATION DES WIG-LASER HYBRIDSCHWEISSENS

In einem kürzlich abgeschlossenen Projekt in Zusammenarbeit mit dem E.O. Paton Institut (Ukraine) wurde das Wolfram-Inertgasschweißen (WIG) in Kombination mit Laserstrahlschweißen unter Berücksichtigung der Prozesse im Anodengebiet untersucht. Es wurden mathematische Modelle zur Wechselwirkung zwischen Laser und Lichtbogen, sowie zu den Prozessen und Phänomenen im Schweißbad des Hybridschweißens

Abbildung 2: Simulation von Humping- und Randkerbbildung beim Strahlschweißen im Wärmeleitmodus

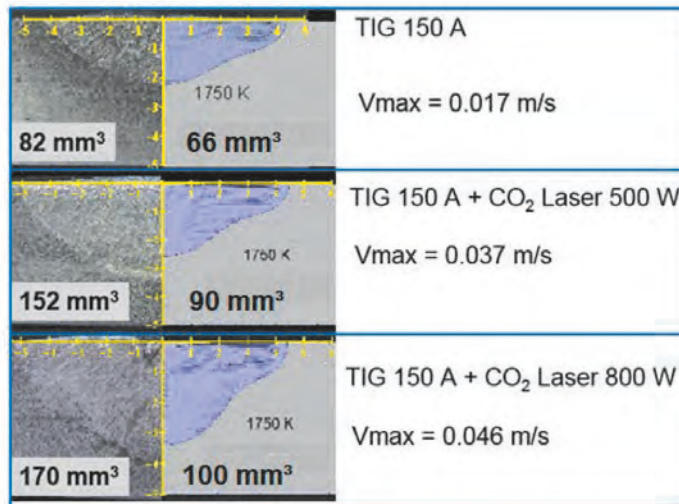


Abbildung 3:  
Vergleich der simulierten und der experimentellen Schweißnahtkontur für das Laser-WIG-Hybridschweißen.

entwickelt und die dominierenden Faktoren für das erhöhte Einschweißvermögen beim Hybrid-schweißen identifiziert. Die Modelle wurden durch experimentellen Untersuchungen unterstützt. Die Arbeiten wurden durch die DFG im Rahmen des Projektes RE-2755/20-1 „Selbstkonsistentes Modell für das Laser-WIG/Plasma-Hybridschweißen im Wärmeleitungsmodus“ gefördert (Abbildung 3).

### SIMWELD ANWENDER-FREUNDLICHE SIMULATIONSSOFTWARE

Mit SimWeld kann der Schweißprozess für Geome-

trien nach DIN EN ISO 9626-1 und verschiedene Stähle sowie Aluminiumlegierungen mit veränderlichen Parametern zuverlässig simuliert werden. Als Eingangsparameter dienen unter anderem Materialeigenschaften, geometrische und Prozessparameter sowie die Steuerungsparameter für die verwendeten digitalen Schweißstromquellen. Derzeit werden Steuerungsalgorithmen von Stromquellen der Hersteller OTC und Cloos unterstützt. Des Weiteren kann der Schweißprozess mit benutzerdefinierten Parametern einer verallgemeinerten Stromquelle gesteuert werden.

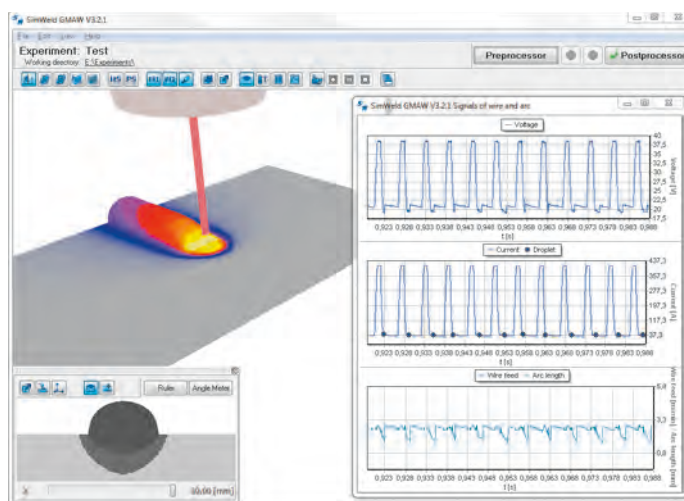


Abbildung 4:  
Simulation des MSG-Schweißens mit SimWeld GMAW 3

Die wichtigsten Ergebnisse des Programms sind der räumliche und zeitliche Temperaturverlauf, die Geometrie der Schmelzzone, der Schweißnaht und der Wärmeeinflusszone, die eingebrachte Energiemenge sowie der Anteil der vom Tropfen aufgenommenen Energie.

Innerhalb der Forschungsprojekte werden die Ergebnisse ständig validiert und verifiziert: Eine kontinuierliche Qualitätssicherung erfolgt durch den Vergleich der Simulationsergebnisse mit den Ergebnissen realer Experimente.

Der Vorteil der Simulation mit SimWeld besteht darin, dass bereits im Vorhinein ermittelt werden kann, mit welchen Parametern eine optimale Schweißnaht zu erwarten ist, ganz ohne kostenintensive Versuche. Ein weiteres Anwendungsfeld ist die Nutzung der mit SimWeld ermittelten Temperaturfelder und der Schweißnahtgeometrie für die Berechnung von Eigenspannungen und Verzug mit einer geeigneten Struktursimulationssoftware (Abbildung 4).

### QUALITÄTSSTIEGERUNG DER STRUKTURSIMULATION MIT HILFE EINER MODIFIKATION DER ÄQUIVALENTEN WÄRMEQUELLE NACH GOLDAK

Basierend auf der äquivalenten Wärmequelle nach Goldak (1984) wurden in einem ebenfalls kürzlich abgeschlossenen Projekt zwei Modifikationen für die Berechnung des Temperaturfelds beim MSG-Schweißen entwickelt (ÄWQ MR10 nach Mokrov). Die Modifikation erlaubt es, das Temperaturfeld exzellent zu reproduzieren bei



einem signifikant geringeren Kalibrierungsaufwand. Die modifizierte ÄWQ wird als Ergebnis von SimWeld in einer Datei ausgegeben, die direkt in SYSWELD und DynaWeld verwendet werden kann (**Abbildung 5**).

Das IGF-Vorhaben (AiF-Nr. 17.942 N/ DVS-Nr. I2.013) der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS wurde von der Arbeitsgemeinschaft industrieller Forschungsvereinigungen „Otto von Guericke“ e.V. (AiF) im Rahmen der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) aus Mitteln des Bundesministeriums für Wirtschaft und Technologie (BMWi) aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.

#### AKTUELLE FORSCHUNGSPROJEKTE

Im Teilprojekt P4 des K-Projekt Network of Excellence for Metal JOINING, welches im Rahmen von COMET – Competence Centers for Excellent Technologies durch BMWFW, BMVIT, FFG, Land Oberösterreich, Land Steiermark, Land Tirol und SFG gefördert wird, wird in einer internationalen Zusammenarbeit (Fronius International GmbH, Audi AG, FH JOANNEUM GmbH und ISF) die Kopplung von Algorithmen von SimWeld mit einem virtuellen Schweißtrainingssystem (Fronius Virtual

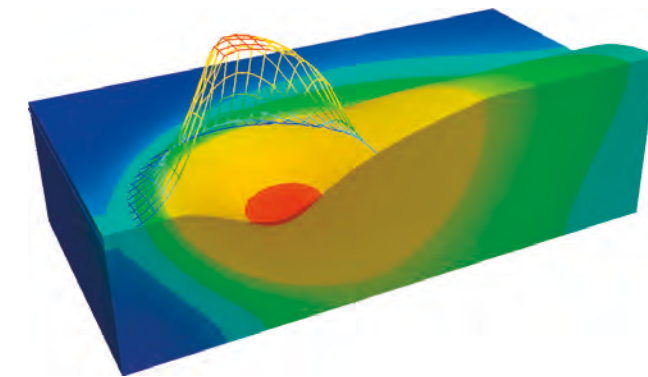


Abbildung 6:  
Ergebnis der Kopplung des Modells für die Wärmebringung im Kathodenbereich mit der Strömungssimulation im Schmelzbad im Rahmen des TP A4 des SFB 1120

Welding) durchgeführt. Dazu werden auch die physikalischen Modelle reduziert und beschleunigt, um die Berechnung in Echtzeit zu ermöglichen. Das Ziel ist die Entwicklung eines Virtual-Reality-Schweißerausbildungssystems, welches eine effiziente, kostengünstige und intuitive Darstellung der Einflüsse unterschiedlicher Schweißparameter erlaubt.

Im Rahmen des Sonderforschungsbereichs 1120 (SFB1120) „Präzision aus Schmelze“, gefördert von der Deutschen Forschungsgemeinschaft (DFG), wird derzeit im Teilprojekt A4 (TP A4) ein selbstkonsistentes Modell entwickelt, welches den gesamten Schweißprozessbereich beim MSG-Schweißen umfasst, einschließlich einer präziseren Beschreibung der relevanten physikalischen

Phänomene. In der laufenden Förderperiode wurde ein Modell für die Strömungen im Schweißbad entwickelt, sowie ein Modell für die Wärmebringung im Kathodenbereich, welches an das Strömungsmodell gekoppelt wurde. In weiteren Projektphasen soll das Modell auf den Impulsprozess erweitert werden. Das Ziel des Teilprojektes ist daher die simulationsunterstützte Vorhersage der Ausbildung der Schweißnähte beim Lichtbogenschweißen (MIG/MAG) als Basis für eine gezielte Beeinflussung der Schweißnaht zur Erhöhung der Bauteilpräzision (**Abbildung 6**).

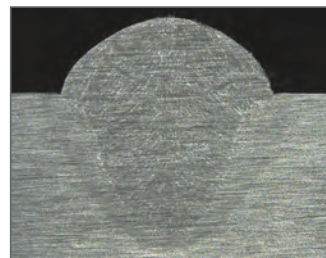


Abbildung 5:  
Vergleich von Querschnitten des Schweißbades für die Fälle Goldak's ÄWQ mit 2.Modifikation (links), ÄWQ MR10 nach Mokrov (mitte) und Experiment (rechts)

**Kontakt:**  
Dr.-Ing. Alexander Schiebahn  
Tel.: 0241 8097233  
E-Mail: schiebahn@isf.rwth-aachen.de

# Laserauftragschweißen bei Oerlikon Metco – aktuelle Anwendungsbeispiele

*Oerlikon Metco arbeitet seit über 20 Jahren mit Hochleistungslasern in der Materialbearbeitung. Für das Laserauftragschweißen kamen zunächst der CO<sub>2</sub>-Laser, später Nd:YAG- und Faserlaser, heute der Diodenlaser als Strahlquelle zum Einsatz.*

**Oerlikon Metco AG**  
Rigackerstrasse 16  
CH-5610 Wohlen  
metco.media@oerlikon.com  
www.oerlikon.com/metco

Beim Laserauftragschweißen (englisch: Laser Cladding) erzeugt der Laser auf der Bauteiloberfläche einen Schmelzfleck, dem der Schweißzusatz mit einer Pulverdüse in Pulverform zugeführt wird. Aus der Bewegung des Prozesskopfs über dem Bauteil ergeben sich Schweißraupen, die nebeneinander liegend eine Fläche beschichten oder mehrlagig eine Geometrie wiederherstellen. Die vergleichsweise geringe, aber fokussierte Energiezufuhr erlaubt die Verarbeitung von hochkohlenstoffreichen Stählen oder hochwarmfesten Nickelbasislegierungen, die sich konventionell schwer bis gar nicht schweißen lassen.

Typische und seit langem bekannte Anwendungen dafür sind Reparaturschweißungen an Formwerkzeugen oder Gasturbinenschaufeln. Neben anspruchsvollen Schweißreparaturen gewinnen heute Verschleiß- und Korrosionsschutzschichten in der Neuteilfertigung zunehmend an Bedeutung. Denn konventionelles Auftragschweißen kann aufgrund der hohen Durchmischung mit dem

Grundmaterial mehrere Schweißlagen erfordern, um die gewünschten Schichteigenschaften zu erzielen. Die geringe Aufmischung beim Laserauftragschweißen erlaubt dagegen effiziente Beschichtungen mit nur einer dünnen Schweißlage. Das Aufschweißen auf dünnwandigen Geometrien, aber auch gezielt auf Ecken und Kanten, wird damit möglich.

## **Verschleißschutzschicht auf Kompressor-Schaufeln**

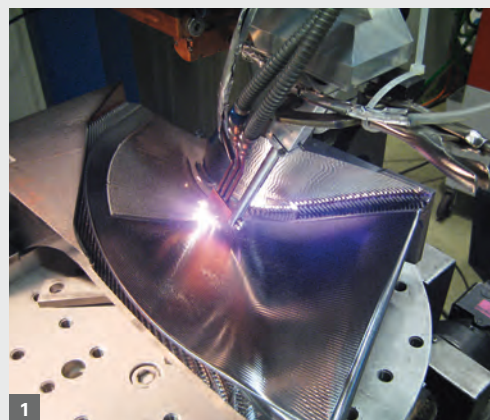
Im vorgestellten Beispiel muss ein einstufiger Radialkompressor-Rotor in einem Stahlwerk Gase mit hohen Feststoffanteilen und damit hoher Erosionswirkung verdichten. Thermische Spritzschichten als Verschleißschutz platzen ab, weil ihnen die schmelzmetallurgische Anbindung fehlt. Epoxidbeschichtungen versagen aufgrund mangelnder Erosionsbeständigkeit. Und konventionelles Lichtbogen-Auftragschweißen von Hand ist ungeeignet für einen gleichmäßigen und flächigen Schweißaufbau auf den dünnen Kompressorschaukeln. Dabei steht mit MetcoClad™ 21 ein Beschichtungs-

werkstoff ähnlich einem Stellite™ 21 zur Verfügung, der ausgezeichnete Verschleiß- und Korrosionseigenschaften aufweist. Er ist durch eine nicht zu große Härte und damit nicht zu große Sprödigkeit auch für dynamisch hochbelastete Bauteile einsetzbar und außerdem für das Laserauftragschweißen optimiert. Mit diesem Prozess werden heute die einzelnen Schaufelblätter des Kompressor-Rotors bei Oerlikon Metco beschichtet und anschließend mechanisch endbearbeitet und fugend mit der Rotorscheibe verschweißt.

Für die Qualifikation des Auftragschweißprozesses wurden Probeschweißungen auf Musterstücken aus vergleichbarem Material angefertigt, metallographisch auf Schweißdefekte wie Risse und Bindefehler untersucht und so die optimalen Schweißparameter bestimmt. Die Programmierung der Schweißbahnen auf der gekrümmten Schaufelgeometrie erfolgte mit einem CAD-Modell der Schaufel in einem Offline-Programmiersystem. Die Schweißstrategie muss eine vollständige Abdeckung der Oberfläche

**Abbildung 1**

Laserauftragschweißen auf der Kompressorschaukeloberfläche.



1

**Abbildung 2**

Förderschnecke mit Wolfram-Carbid (WC)-Verschleißschutzbeschichtung.



2

auch an der filigranen Schaufeleintrittskante sicherstellen. Der präzise, endformnahe Schweißaufbau erfordert lediglich minimales Überschleifen, um die Oberfläche aerodynamisch zu glätten. Mit dieser dünnen Verschleißschicht wird so eine deutlich längere Lebensdauer realisiert, als mit der ursprünglichen, unbeschichteten Konstruktion.

### Bauteilpanzerungen für extreme Verschleiß- und Schlagbeanspruchungen

Für extreme Verschleiß- oder Schlagbeanspruchungen sind aufgeschweißte Bauteilpanzerungen erste Wahl, da sie aufgrund der schmelzmetallurgischen Anbindung bei richtiger Wahl der Prozessparameter nicht abplatzen. Wolfram-Carbid-(WC)-Schichten beinhalten Hartstoffpartikel großer Härte, typischerweise 2000 HV0.1 und mehr, die in einen vergleichsweise weichen Matrixwerkstoff, beispielsweise ein Nickel- oder Kobaltbasislegierung, eingebunden werden.

Im vorgestellten Beispiel muss eine Förderschnecke in der Kunststoffproduktion gegen ein hochgradig abrasives Medium geschützt werden. PlasmaDur™ Beschichtungswerkstoffe von Oerlikon Metco mit einer Nickel-Matrix erfüllen die Anforderungen bei gleichzeitig guter Schweißeignung.

Das Laserauftragschweißen erlaubt hier das flächige Aufschweißen, aber auch im Gegensatz zum konventionellen Plasma-Auftragsschweißen den Materialaufbau auf den Kanten. Bei Kenntnis des Verschleißprofils lassen sich sogar besonders gefährdete Abschnitte auf dem Bauteil mit zusätzlichen Aufschweißlagen verstärken. Die Dicke der Schicht variiert dabei üblicherweise zwischen 0.5 und 3.0 mm. Die lasertypisch hohen

Temperaturgradienten und Erstarrungsgeschwindigkeiten im Schweißprozess führen im Gegensatz zum manuellen Sauerstoff-Acetylen-Schweißen zu einer feinen und homogenen Verteilung der Carbide im Schweißgut und damit zu der angestrebten sehr hohen Verschleißbeständigkeit. Etwaige Risse im Schweißaufbau erweisen sich nicht als ein Problem. Auch die rauhe Oberfläche stört im Einsatz der Förderschnecke nicht, sie ließe sich auch nicht mehr spanend, sondern nur noch mit Überschleifen bearbeiten. Kritisch ist dagegen die lückenlose Abdeckung der Oberfläche und dass, wie schon erwähnt, die Beschichtung unter schlagender Beanspruchung nicht abplatzt.

### 3D-Bearbeitung mit dem MetcoClad™-System

Alle vorgenannten Anwendungsbeispiele erfordern die Fähigkeit zur 3D-Bearbeitung, also das Aufbringen der Schweißbahnen auf beliebig gekrümmten Oberflächen.

Das MetcoClad™ System von Oerlikon Metco erfüllt diese Anforderung mit bis zu 10 numerisch gesteuerten Achsen und der Option zur Verarbeitung von CAD-Daten für die Programmierung der Schweißbahnen. Dabei kann das System-Layout flexibel an die Bedürfnisse der Kunden hinsichtlich Bauteilgrößen, Bauteilgeometrien und Prozessanforderungen angepasst werden.

Die langjährige Erfahrung mit Laserauftragschweißen als Lohndienstleistung spiegelt sich in der sorgfältigen Integration aller Anlagenkomponenten, von Laser und Optik bis zur Pulverdüse, und in vielen Detaillösungen wie beispielsweise dem Layout des Bedienpults wieder.

**oerlikon**  
metco

Das erste MetcoClad™ System ist für Oerlikon Metco's eigenes Laser Cladding Servicegeschäft am Standort Wohlen in der Schweiz im Einsatz und dient zugleich als Versuchsanlage für neu entwickelte Anlagenkomponenten sowie zur Prozessentwicklung, Unterstützung und Produktionsvorbereitung für Metco's Anlagenkunden. Wer den Einstieg in das Laserauftragschweißen sucht, ist so bei Oerlikon Metco bestmöglich aufgehoben.

**Abbildung 3**  
Das MetcoClad™ System von Oerlikon Metco.



# Optische Erfassung von Schweißprozessen – ÜBERWACHUNG BEIM AUTOMATISIERTEN METALLSCHUTZGASSCHWEISSEN

Philipp Lozano, Guido Buchholz

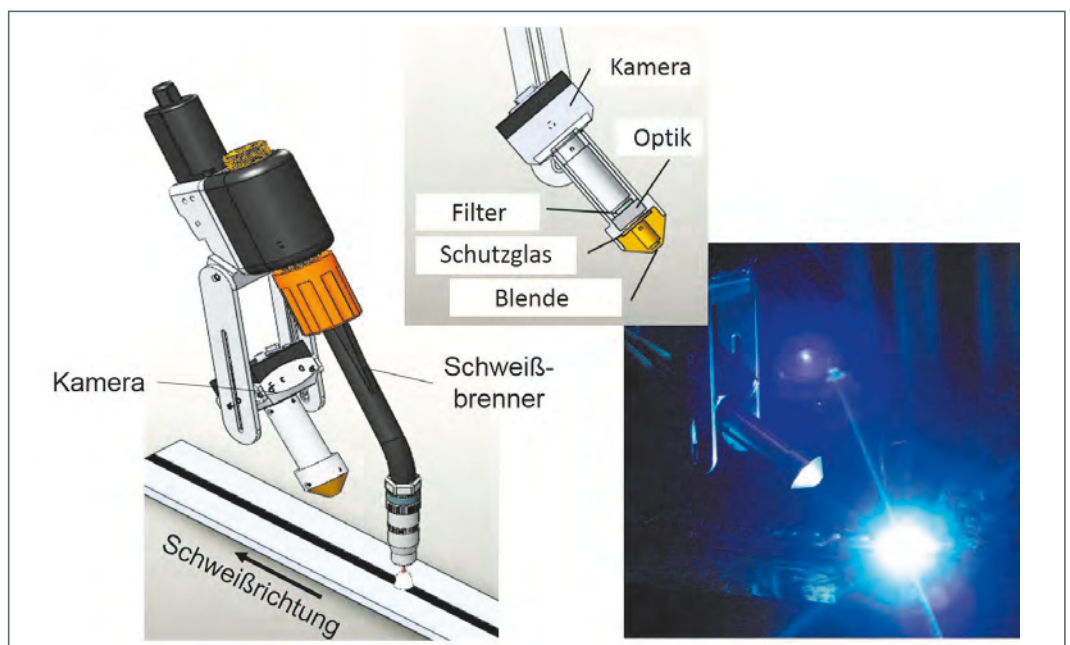


Abbildung 1: Links: Anordnung der Kamera am Schweißbrenner, Mitte: Aufbau der Kamera, Rechts: Kamera beim Schweißen

Heute kommen beim automatisierten Metallschutzgasschweißen optische Sensoren zur Erfassung der geometrischen Merkmale der Fügezone vorlaufend vor dem Schweißbrenner zum Einsatz. Nachteilig ist hierbei allerdings, dass der Mess- und Prozessort zeitlich und örtlich voneinander getrennt sind. Deshalb wurde am ISF ein optisches Sensorsystem entwickelt, das ähnlich wie der Handschweißer, seine Informationen direkt an dem Schweißprozessort gewinnt und dadurch eine Prozessüberwachung ermöglicht.

## PROBLEMSTELLUNG UND MOTIVATION

In der automatisierten schweiß-technischen Fertigung kommt

das MSG-Schweißverfahren aufgrund seiner vielfältigen Einsatzmöglichkeiten und geringen Investitionskosten häufig zum Einsatz. Allerdings können

im Fügebereich geometrische Abweichungen auftreten, die zu Qualitätseinbußen in der Schweißverbindung führen und dementsprechend geeig-

nete Gegenmaßnahmen erfordern. Ursache für diese geometrischen Abweichungen sind Toleranzen bei der mechanischen Fertigung der Schweißnahtvorbereitung und Verzug durch die Wärmeeinbringung beim Schweißvorgang selbst. Zur Beherrschung dieser Abweichungen kommen zur Fixierung der Bauteile oft technisch aufwändige, spezifisch angepasste Spannvorrichtungen zum Einsatz. Einen wesentlich flexibleren Lösungsansatz für diese Problematik bietet jedoch der Einsatz von Sensoren, die teilweise auch während des Schweißvorganges, eine Erfassung dieser Abweichungen ermöglichen [1]. Zur Sicherstellung der Schweißnahtqualität kann der basierend auf diesen Sensordaten eine Anpassung sowohl der Schweißbrennerposition als auch der Schweißparameter durchgeführt werden. Für die Erfassung der Abweichungen beim automatisierten Schweißen stehen verschiedene Sensoren zur Verfügung, wobei die optischen Sensoren den höchsten Informationsgehalt aufweisen. Bei den optischen Sensoren kommt zur Erfassung von Abweichungen am häufigsten das Lichtschnittverfahren zum Einsatz, wobei als Informationsquelle geometrische Merkmale in der Fügezone herangezogen werden. Aus diesem Grunde und zur Minimierung des störenden Einflusses der Lichtbogenstrahlung auf das Messsignal werden die optischen Sensoren immer vorlaufend vor dem Schweißprozess angeordnet, wobei die Größe der Vorlaufstrecke von der Intensität des Lichtbogens abhängig ist [2–4]. Nachteilig ist hierbei allerdings, dass der Mess- und Prozessort zeitlich und örtlich voneinander getrennt sind.

Das bedeutet, dass eventuelle Anpassungen des Schweißprozesses, aufgrund von vorlaufend gemessenen, geometrischen Abweichungen, erst zeitversetzt durchgeführt werden können. Das Ergebnis dieser Anpassung auf die Schweißnaht kann bei einer derartigen Vorgehensweise nicht überprüft werden, d. h. es existiert kein geschlossener Regelkreis.

Wesentlich optimaler wäre der Einsatz von Sensoren, die, ähnlich wie der Handschweißer, Informationen direkt an dem Schweißprozessort gewinnen. In der Vergangenheit hat es hierzu diverse Lösungsansätze gegeben, die mit einer Kamera den Schweißprozessort erfassen. Diese sind aber meistens daran gescheitert, dass für die komplexe Bildauswertung in Echtzeit nicht die erforderliche Rechenleistung zur Verfügung stand [5–9]. Da aber gerade auf dem Gebiet der Bildverarbeitung in den letzten Jahren erhebliche Fortschritte gemacht wurden, wurde die Thematik am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik aufgegriffen und ein derartiges Sensorsystem entwickelt.

#### AUFBAU UND FUNKTIONSWEISE DES OPTISCHEN SENSORSYSTEMS

Die Sensorentwicklung zielt auf die optische Online-Erfassung von geometrischen Merkmalen am Ort des MSG-Schweißprozesses mittels einer Kamera. Über die Auswertung der Kamerabilder können hiermit Informationen über die Position des Schweißbrenners und des Lichtbogens sowie der Schmelzbadlage relativ zur Schweißfuge bereit-

gestellt werden. Ferner können auch geometrische Größen über das Schmelzbad ausgewertet werden. Bei eventuell auftretenden Abweichungen kann auf Basis dieser Informationen dann online eine Anpassung der Prozessparameter erfolgen und dadurch die Schweißnahtqualität sichergestellt werden. Mithilfe dieser Form der Informationsgewinnung kann ferner anschließend überwacht werden, ob die Adaption der Prozessparameter zum gewünschten Ergebnis geführt hat. Dies geschieht in Verbindung mit einem Modell über die Form der Schweißnaht. Durch diese neuartige Sensor/Modell-Kombination ist somit eine nachhaltige Schweißnahtqualitätssicherung beim automatisierten MSG-Schweißen gewährleistet, die mit existierenden Sensoren bisher nicht möglich war.

Zur optischen Erfassung wurde eine CMOS-Kamera ausgewählt, deren spektraler Empfindlichkeitsbereich in Verbindung mit einem optischen Filter auf die Erfassung der charakteristischen Merkmale am Schweißprozessort angepasst wurde. Die Kamera verfügt über eine kompakte Bauweise, die die Anordnung direkt am Schweißbrenner ermöglicht. Weitere Kriterien für die Auswahl der Kamera waren die variable Bildfrequenz von bis zu 500 Bildern im Vollbildmodus und die hohe Bildauflösung von 1280 x 1024 Pixeln.

In **Abbildung 1** ist der Aufbau des optischen Sensorsystems, die Anordnung am Schweißbrenner und im realen Schweißbetrieb dargestellt. Die Optik wurde entsprechend der speziellen Anforderungen beim

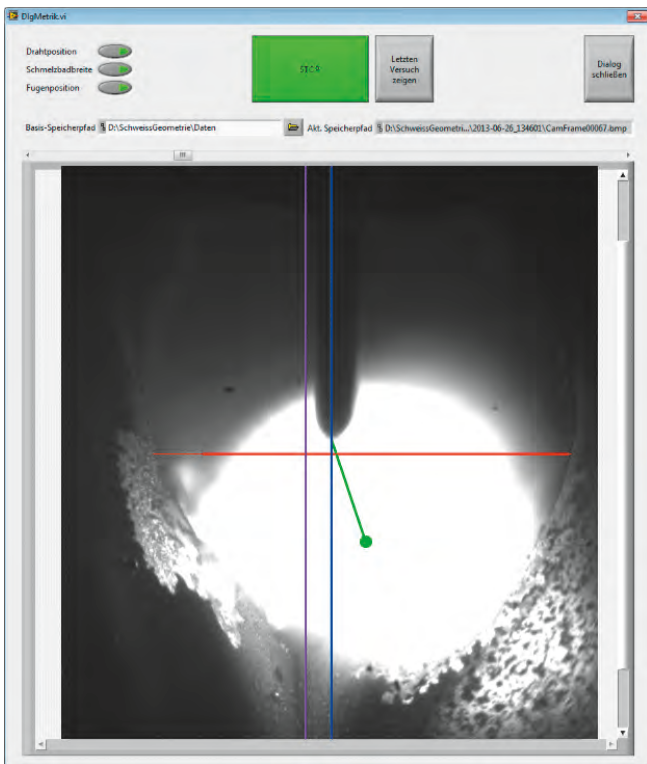
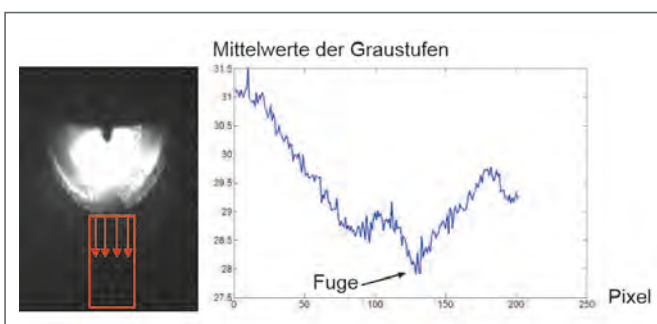


Abbildung 2:  
Visualisierung der Bildauswerteergebnisse

MSG-Schweißen ausgelegt. So verfügt sie über einen optischen Filter, der den Spektralbereich zur Erfassung des Schweißprozesses und des Schmelzbades auf den nahen Infrarotbereich beschränkt. Ferner ist die Optik zum Schutz gegenüber Schweißspritzer mit einem auswechselbaren Schutzglas ausgestattet. Zur Reduzierung der Strahlintensität des Schweißprozesses verfügt sie über eine angepasste Blende, die aufgrund ihres geringen Durchmessers einen weiteren Schutz gegen Spritzer gewährleistet. Die Kamera ist mittels einer Halte-

Abbildung 3:  
Bestimmung der Fugenlage.  
Links: Originalbild mit den Pfeilen, die die Spalten der Kontrastanalyse angeben.  
Rechts: Mittelwerte der Graustufen über den Spalten aufgetragen.



rung direkt mit dem Schweißbrenner verbunden, die eine Ausrichtung hinsichtlich des gewünschten Beobachtungswinkels ermöglicht.

Die Echtzeitauswertung der Kamerabilder erfolgt unter LabView. Zwischen Kamera und LabView-System ist eine beidseitige Kommunikation möglich, so dass zum einen Parametereinstellungen für die Aufnahmen vorgenommen werden können, zum anderen die aufgenommenen Bilder an LabView transferiert und über entsprechende Algorithmen ausgewertet werden können.

In **Abbildung 2** ist die Visualisierung der Ergebnisse der Bildauswertung am Beispiel einer Kehlnaht dargestellt. Bei der Bildauswertung liegt der Hauptfokus auf der Bestimmung der Position der Lichtbogenfläche (grüner Punkt), des Drahtes (blaue Linie), des Schmelzbades (rote Linie) und der Schweißfuge (violette Linie). Zur Positionsbestimmung des Lichtbogens im Kamerabild wird der Schwerpunkt der Lichtbogenfläche herangezogen. Die Position des Schweißdrahtes muss, aufgrund der mechanisch starren Verbindung zwischen Kamera und Schweißbrenner, nur am Anfang der Schweißung bestimmt werden. Sie ist durch den dunklen Bereich im Lichtbogen gekennzeichnet. Die Auswertung der Position des Schmelzbades erfolgt über die Ermittlung der Lage der Schmelzbadbreite. Die Positionsbestimmung der Fuge im Kamerabild gestaltet sich, aufgrund der wechselnden Reflexionen, schwieriger. Allerdings kann davon ausgegangen werden, dass der Fugenverlauf nahezu vertikal in Schweißrichtung im Bild zu finden ist.

Dementsprechend muss zur Detektion eine vertikale Grauwertanalyse herangezogen werden, bei der die Fugenlage, nach Aufsummierung der spaltenweise ermittelten Grauwerte, den regional niedrigsten Helligkeitswert aufweisen muss. Eine solche spaltenweise Mittelwertbildung über eine festgelegte Zeilenanzahl ist in **Abbildung 6** dokumentiert. Über eine Glättung der dargestellten Kurve und eine lokale Extremwertsuche kann dann die Fugenlage auch in Bildern mit schlechterem Kontrast oder mit Störungen detektiert werden.

In Abhängigkeit von der Komplexität der genutzten Algorithmen können mit der unter LabVIEW entwickelten Bildverarbeitung Auswertefrequenzen von 20–50 Hz erzielt werden. Dies bedeutet, dass bei einer Schweißgeschwindigkeit von 0,6 m/min minimal alle 0,5 mm und maximal alle 0,2 mm Auswerteergebnisse zur Adaption des Schweißprozesses zur Verfügung gestellt werden können. Durch diese realisierten Bildauswertzeiten ist die Echtzeitfähigkeit des optischen Sensorsystems hinreichend erfüllt.

Zur Überprüfung der Funktion der Bildauswertung wurden Schweißversuche an Kehlnähten, die eine Variation der Nahtposition durch Versatz des Bleches zur Schweißbahn aufwiesen, durchgeführt. In **Abbildung 4** sind der Schweißnahtverlauf und die Ergebnisse der Bildauswertung an zwei verschiedenen Schweißpositionen dargestellt. Im Schweißnahtverlauf ist zu erkennen, dass der Lichtbogen zunächst solange wie möglich auf dem horizontalen Blech brennt. Erst ab einem gewissen Versatz zur

Schweißbahn verlagert sich der Lichtbogenansatzpunkt fast schlagartig auf das vertikale Blech. In den ausgewerteten Bildern ist der Versatz zur Schweißbahn durch die Abweichungen der Drahtposition zur Fugenposition erkennbar.

Ferner sind in den ausgewerteten Bildern die Abweichungen des Schwerpunktes des Lichtbogens zur Fugenposition zu erkennen, die allerdings wesentlich gravierender sind, sodass diese Information für die Überwachung der Schweißbrennerposition eher geeignet ist, da diese auch die Richtung des Tropfenüberganges anzeigt. Im unteren Bereich der **Abbildung 4** sind zusätzlich die zugehörigen Makroschliffe dargestellt.

Üblicherweise wird bei Kehlnahtschweißungen zur Erzielung einer möglichst gleichmäßigen Anbindung an dem horizontalen und vertikalen Blech der Schweißbrenner mit einem Offset zum vertikalen Blech positioniert. In der Praxis wird der Offset für die jeweilige Schweißaufgabe in empirischen Schweißversuchen ermittelt. Mit dem entwickelten optischen Sensorsystem ist es nun möglich die Orientierung des Lichtbogens online im Schweißablauf zu ermitteln und mit dieser Information bei Abweichungen eine Anpassung der Schweißbrennerposition durchzuführen.

Zur Festlegung der für die jeweilige Schweißaufgabe optimalen Schweißbrennerposition können Ersatzmodelle herangezogen werden. Hierzu wurden die Ergebnisse der Bildauswertung bei unterschiedlichen Positionen des Lichtbogenschwerpunktes

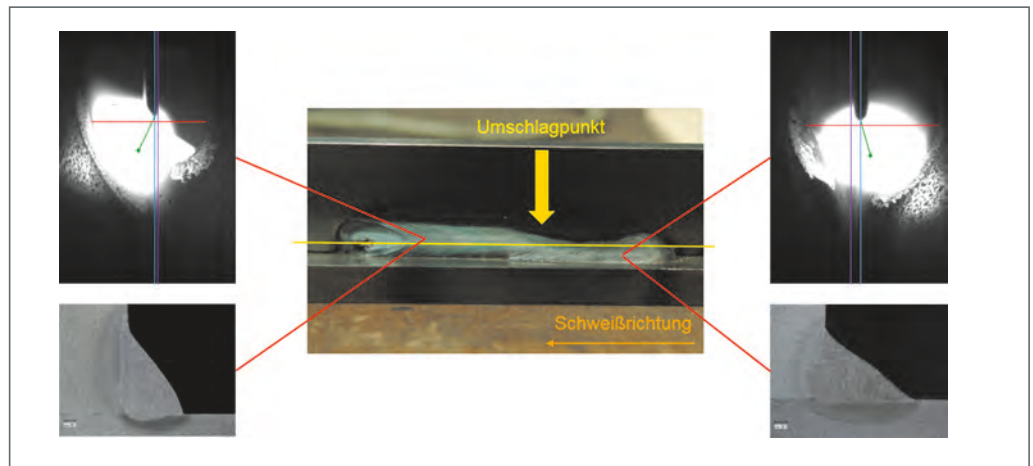


Abbildung 4: Schweißbahn mit Versatz in der Nahtposition, Bildauswertungen und zugehörige Makroschliffe

zum vertikalen Blech mit den Ergebnissen der Auswertung der Makroschliffe der Schweißnähte korreliert. Zur Auswertung der Makroschliffe wurde das Nahflankenverhältnis der Schweißnaht herangezogen, das aus der Länge der horizontalen und vertikalen Nahtflanke gebildet wird. In **Abbildung 5** sind beispielhaft zwei Makroschliffe bei verschiedenen Schweißbrennerpositionen mit den eingezeichneten Nahtflanken und die Berechnung des jeweiligen Nahtflankenverhältnisses dargestellt.

Die Korrelation der Auswertungsergebnisse zeigt die Grafik in der **Abbildung 6**. Hierbei ergibt sich die gepunktete, schwarze Gerade wenn die Auswertergebnisse der Probe V10 mit einbezogen wer-

den. Allerdings handelt es sich hierbei höchst wahrscheinlich um einen Ausreißer, sodass die blaue Gerade als Funktion des Nahtflankenverhältnisses zur Position des Lichtbogenschwerpunktes herangezogen werden kann. Für diese Gerade ergibt sich folgende Funktion:

$$f_2/f_1 = 1,08 + 0,18 \Delta \text{pixel}$$

Aufgrund dieser Funktion würde sich bei der Position des Lichtbogenschwerpunktes in der Fugenmitte ein Nahtflankenverhältnis von  $\approx 1$  ergeben. Die minimale Abweichung ist wahrscheinlich auf Ungenauigkeiten bei der Auswertung der Makroschliffe zurück zu führen.

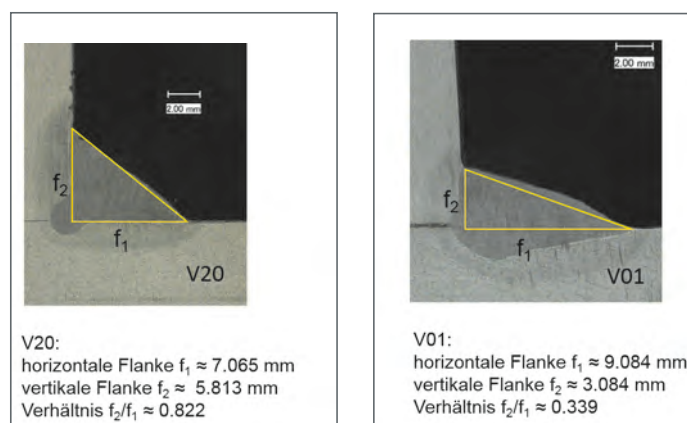


Abbildung 5: Schweißnähte und Nahtflankenverhältnis bei verschiedenen Schweißbrennerpositionen

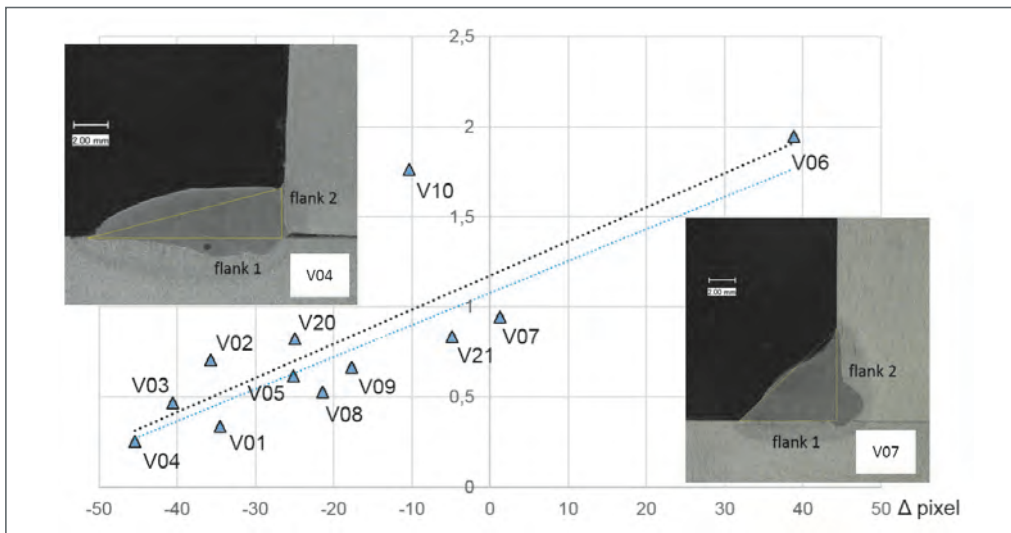


Abbildung 6:  
Korrelation der Ergebnisse der  
Bildauswertung mit den Ergebnissen  
Makroschliffauswertung

### ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Im Gegensatz zu existierenden Sensorsystemen können mit dem entwickelten optischen Sensorsystem erstmals, Informationen direkt am Ort des Schweißprozesses gewonnen und zur Online-Prozessüberwachung herangezogen werden. Über die Auswertung der Kamerabilder werden die Position des Schweißdrahtes, des Lichtbogenschwerpunktes, des Schmelzbades und der Schweißfuge zur Verfügung gestellt. Ferner wird die Breite des Schmelzbades bestimmt. Bei eventuellen Abweichungen kann dann eine Anpassung der Position des Schweißbrenners und der Schweißparameter durchgeführt werden.

Im Rahmen der Forschungsarbeiten wurde außerdem ein Ersatzmodell erarbeitet, das eine Korrelation zwischen der Position des Lichtbogenschwerpunktes und des Flankenverhältnisses der Schweißnaht ermöglicht. Dadurch kann das optische Sensorsystem in Kombination mit dem Ersatzmodell, auf Basis der Position des Lichtbogenschwerpunktes

qualitative Informationen über den Zustand der aktuellen Schweißnaht liefern. Bei Abweichungen von der gewünschten Schweißnahtbeschaffenheit kann dann eine Anpassung der Position des Schweißbrenners durchgeführt und vor Allem das Ergebnis der Anpassung durch das Sensorsystem selbst überwacht werden, wodurch der Regelkreis geschlossen werden kann.

Zukünftig soll die CMOS-Kamera durch eine HDR-Kamera (High Dynamic Range) ersetzt werden. Diese hat den Vorteil, dass sie auch bei Bildszenen, die stark unterschiedliche Helligkeitsbereiche aufweisen, aufgrund ihrer hohen Dynamik noch Bilder mit guten Kontrasten zur Fügung stellt. Ferner ermöglicht die HDR-Kamera die Aufnahme von Bildern mit zwei Belichtungsstufen, wodurch auch bei extrem unterschiedlichen Helligkeitsbereichen noch auswertbare Bilder erfasst werden können. Dadurch kann sich die Auswertung der Schweißprozessbilder, besonders bezüglich der Fugenposition aber auch der anderen Merkmale, sicherer und einfacher gestalten, wo-

durch weniger Aufwand bei der Bildauswertung erforderlich ist und diese in kürzerer Zeit erfolgen kann.

#### Literatur:

- [1] Teßmar, V., Schauder, V.: Automatisierte Qualitätssicherung für das Schutz-gasschweißen. Dresdener Füge-technisches Kolloquium, 2009
- [2] N.N.: Sensoren für das vollmechanische Lichtbogenschweißen – Hinweise zum Einsatz. DVS-Merkblatt 0927-2
- [3] Queren-Lieth, W.: Sensoren für die Schweißautomatisierung – Sensoren zum Schweißen mit offenem Lichtbogen. Schweißen und Schneiden 54 (2002) [4] 214–216
- [4] Falldorf, H.: Geometrievermessung und Nahtverfolgung an Tailored Blanks, Workshop „Sensoren für die Schweißautomatisierung“ ISW, 2000
- [5] Richardson, R.W.; Gutow, D.A.; Rao, S.H.: A vision based system for arc weld pool size control. In: Measurement and control for batch manufacturing, Ed: D.E. Hardt, ASME, pp. 65–77, 1982
- [6] Niepold, R.; Brümmer, F.: PASS – A visual sensor for seam tracking and online process parameter control in arc-welding applications. In: Proc. 14th Int. Symp. On Industrial Robots and 7th Int. Cof. On Industrial Robot Technology, pp. 375–385, 1984
- [7] Wezenbeek, H.C.F.M.: A system for measurement and control of weld pool geometry in automatic arc welding. Proefschrift TU-Eindhoven, 1992
- [8] Kovacevic, R.; Zhang, Y.M.; Ruan, S.: Sensing and Control of Weld Pool Geometry for Automated GTA Welding. Journal of Engineering for Industry, Vol. 117, May 1995, pp. 210–222
- [9] Lu, W., Zhang, Y.M., Emmerson, J.: Sensing of weld pool surface using non-transferred plasma charge sensor. Measurement Science and Technology, Vol. 15, 2004, pp. 991–999

#### Kontakt:

Rahul Sharma, M.Sc.  
Tel.: 0241 80-96267  
E-Mail: sharma@  
isf.rwth-aachen.de



# SYSTEMNUTZBARE ANALYSE UND EVALUATION VON MSG-SCHWEISS-PROZESSEN

Samuel Mann, Guido Buchholz

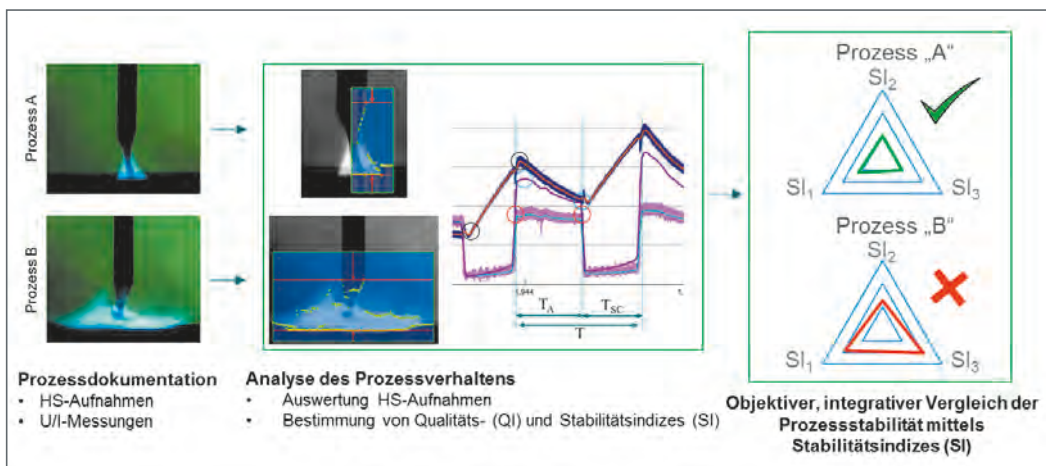


Abbildung 1:  
Analyse und vergleichende Bewertung von MSG-Prozessen

Mit immer steigenden Ansprüchen hinsichtlich des Automatisierungsgrades und der Qualitätssicherung bei gleichzeitiger Forderung nach steigender Flexibilität vor dem Hintergrund kleiner Losgrößen wird eine genauere und eindeutige Beschreibung des Prozessverhaltens unvermeidlich. Hierzu werden am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik verschiedene Methoden und Werkzeuge entwickelt und zur Prozessanalyse und -beschreibung genutzt.

Die Forderung nach einer fortlaufenden Digitalisierung der Produktionstechnik stellt die Fügetechnik und hier im Besonderen die Lichtbogenfugetechnologien, vor immer größeren Herausforderungen. Insbesondere die Lichtbogenschweißprozesse sind aufgrund ihrer inhärenten Komplexität schwierig in ein digitalisiertes Produktionsumfeld einzubetten. Zum einen fehlen praxistaugliche analytische Modelle zur Beschreibung und Vorher-

sage des Prozessverhaltens und der zu erwartenden Produktqualität, zum anderen stellt das Lichtbogenschweißen nach ISO 9000 einen speziellen Prozess dar. Dies bedeutet, dass die finale Produktgüte nicht vollumfänglich, d.h. nicht ohne zerstörende Prüfung, weder qualitativ noch quantitativ erfassbar ist. Aus diesem Grund wird typischerweise ein empirischer Nachweis der Prozessqualifikation in Form der Verfahrens-

prüfung verfolgt, bei dem postuliert wird, dass ein robuster Schweißprozess unter gleichen Prozessrandbedingungen zu ähnlichen und reproduzierbaren Ergebnissen und Produktqualitäten führt. Hierbei wird die Nahtqualität entsprechend einer normativen Vereinbarung in ihren Zieleigenschaften hinreichend genau beschrieben, während der jeweilige Schweißprozess allerdings meist eine eher rudimentäre energetische Beschreibung mittels Durch-

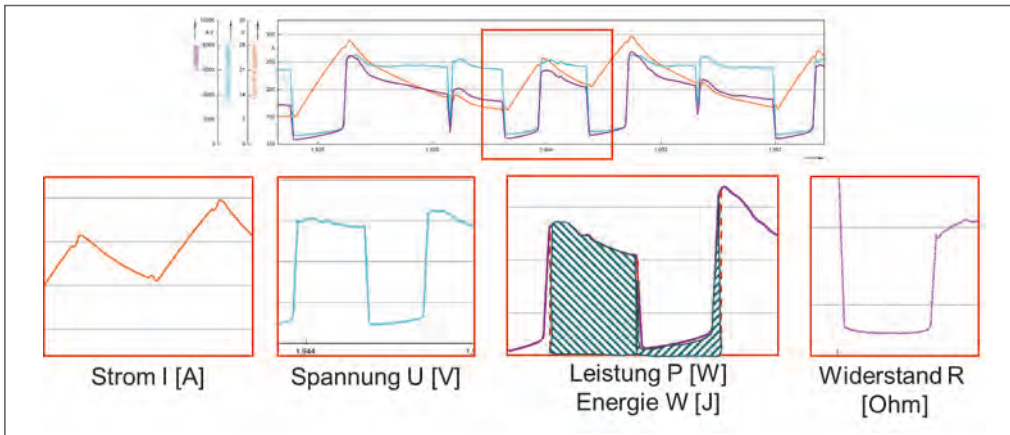


Abbildung 2:  
Charakteristische Prozessphasen des  
Kurzlichtbogens und relevante Signale

schnittswerten von Schweißstrom und -spannung erfährt.

Basierend auf der Annahme, dass der MSG-Prozess bei gleichen Einstellungen und Prozessrandbedingungen deterministisch ein in seiner Stochastik ähnliches und reproduzierbares Verhalten zeigt, können auf Basis der elektrischen Prozessgrößen applikationsspezifische Prozesskennwerte (Qualitätsindizes) identifiziert werden, welche durch Auswertung ihrer zeitlichen Verläufe Aussagen über die Stabilität und relative Güte des gegebenen Prozesses erlauben.

**Abb. 1** zeigt schematisch die Analyse zweier MSG-Prozesse zur vergleichenden Bewertung ihrer Prozessstabilität. Hierbei werden Prozesssignale in Prozesskennwerte überführt, welche die aktuelle Prozessgüte und -stabilität quantifizieren. Der abschließende integrative Vergleich mehrerer Kenngrößen erlaubt eine objektive Bewertung der Ist-Stabilität.

Bei jedem Schweißprozess wird dem Schweißdraht-Licht-

bogensystem phasenweise jeweils eine elektrische Größe, d.h. Schweißstrom oder Schweißspannung, vorgegeben. Die aktuell vorherrschenden Prozessrandbedingungen, z.B. technologische Brennerabstände und Freiheitsgrade, Art und Eigenschaften der beteiligten Werk-, Zusatz- und Hilfsstoffe, Bauteilgeometrie, Gravitationsrichtung, etc., bestimmen in Kombination mit dem aktuellen Prozesszustand eine Systemantwort in Form der jeweils komplementären Prozessgröße, bzw. des Leistungsverlaufs. Durch die statistische Analyse der zeitlichen Verläufe dieser Systemantworten können charakteristische Dispersionsmaße oder Musterverläufe identifiziert werden, welche den dynamischen Zustand des Prozesses beschreiben (Stabilitätsindizes). Beispielhaft wären dies beim Kurzlichtbogen Kurzschlussfrequenzen, die Verhältnisse von Lichtbogenbrennzeit zu Kurzschlusszeit, die Relation der Energien von Lichtbogenphase und Kurzschlussphase, sowie in erster Abstraktion deren jeweiligen Schwan-

kungsmaße, **Abb. 2**. Dieses Vorgehen ist mit jedem zyklischen und deterministischen Lichtbogenprozess durch Identifikation und Auswertung charakteristischer Prozessphasen möglich.

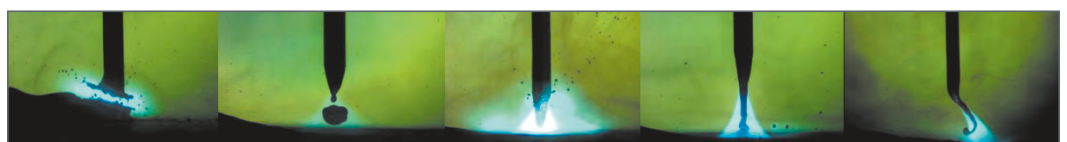
Ein spezifischer Schweißprozess lässt sich somit mit einer überschaubaren Anzahl von Prozesskennwerten statisch und dynamisch hinsichtlich seiner jeweiligen aktuellen Qualität und Stabilität quantifizieren und beschreiben.

Ein wesentliches und etabliertes Werkzeug zur Evaluation von Lichtbogenschweißprozessen bilden zudem Hochgeschwindigkeits-Filmaufnahmen. Beim Schweißprozess führt die kontinuierlich abschmelzende Drahtelektrode zu transienten Prozessereignissen die sich in Zeiträumen von wenigen Millisekunden entwickeln und maßgeblichen Einfluss auf die Prozess- und Produktqualität nehmen. **Abbildung 3** zeigt beispielhaft verschiedene MSG-Prozessvariationen und deren Zustände.

Eine sorgfältige und weiterführende Untersuchung des Prozessgeschehens erfordert jedoch nicht nur die visuelle Darstellung, sondern auch Methoden zur Quantifizierung kritischer Bildinhalte. Aus diesem Grund ist am Institut für Schweißtechnik und Fügetechnik der Arc Analyzer entstanden (siehe **Abbildung 4**).

Dieses Werkzeug ermöglicht, mittels einer nachgeschalteten

Abbildung 3:  
Hochgeschwindigkeitsaufnahmen zu verschiedenen MSG-Schweißprozessvarianten und deren Zuständen



Bildauswertung, die Extraktion der für den Schweißprozess kritischen visuellen Größen und deren transienten Entwicklung über der Betrachtungsdauer. Aus der Gestalt des hell leuchtenden, vornehmlichen Metalldampfplasmas aus **Abbildung 3** lassen sich Aussagen über den Schweißlichtbogen ableiten. Dieser steht wiederum im Zentrum des Lichtbogenschweißens und beeinflusst maßgeblich die thermische Aufprägung des Schweißprozesses auf seine Fügepartner. **Abbildung 4** zeigt die Auswertung der vertikalen Ausdehnung (rot) des Metalldampfplasmas über die Detektion entsprechender Kontrastkanten (gelb) im ausgewählten Suchfenster (grün).

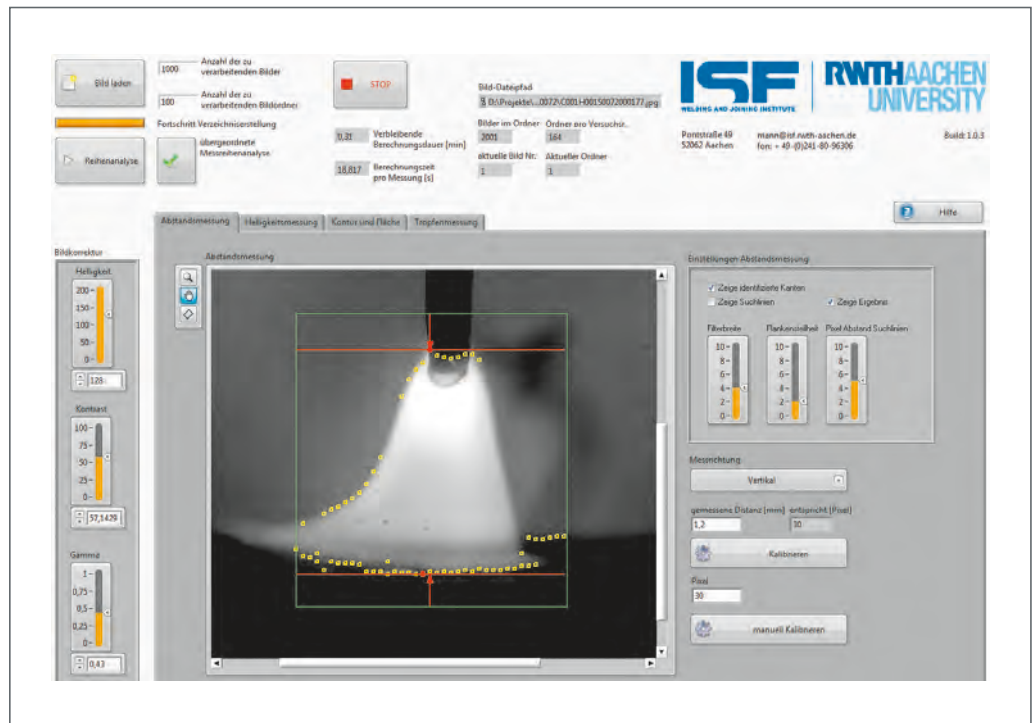


Abbildung 4: ISF Arc Analyzer

Die daraus gewonnenen Zeitreihen aus **Abbildung 5** veranschaulichen die Charakteristik eines definiert aufgeprägten Werkstoffübergangs im sogenannten MSG-Impulslichtbogen (**Abbildung 5 oben**) im Vergleich zum stochastischen, kurzschlussbehafteten Verhalten des Lichtbogens im sogenannten MSG-Kurzlichtbogen (**Abbildung 5 unten**).

destens so vielfältig wie ihre oft unerwünschten Ursachen und Auswirkungen auf das Schweißergebnis. **Abbildung 6** zeigt die Tropfenerkennung im ISF Arc Analyzer. In jedem Bild der Hochgeschwindigkeitsaufnahmen können Anzahl, Position, Geschwindigkeit sowie Größe der automatisiert detektierten Tropfen (rot umrandet) bzw. Spritzer und ihr transientes Verhalten quantifiziert wer-

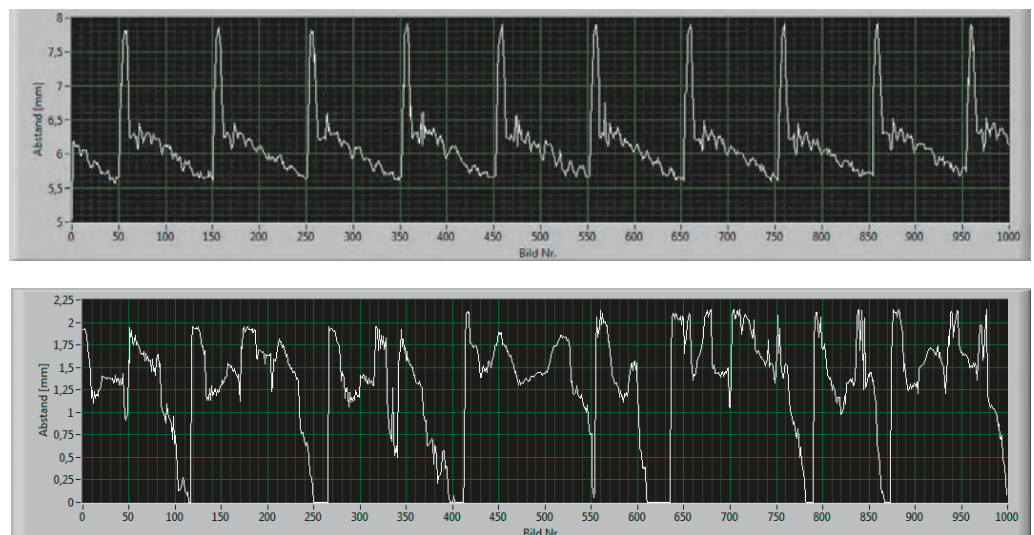
den. Die gewonnenen Informationen dienen der eindeutigen Eingrenzung potentieller Fehlerquellen im Schweißprozess, der Prozessoptimierung sowie Validierung analytischer Modelle.

Die entsprechenden Wirkzusammenhänge, Abhängigkeiten und Ursachen im Kontext der quantifizierten Schweißprozessgrößen lassen sich

Abbildung 5: Horizontale Metalldampfplasma-Ausdehnung, oben: Impulslichtbogen-Prozess, unten: Kurzschlussbehafteter Prozess

Diese geometrischen Prozessdaten werden wiederum statistisch ausgewertet um ferner als Datengrundlage für analytische und statistische Schweißprozessmodellbildung bzw. Kenngrößenerstellung herangezogen zu werden.

Der Auswurf von kleinen Satellitentropfen, Spritzern, die nicht mehr in das Schmelzbad übergehen, sind oft unerwünschte Begleiterscheinungen von Kurzschlüssen zwischen Drahtelektrode und Werkstück. Ihre Größe, Anzahl und Geschwindigkeit sind min-



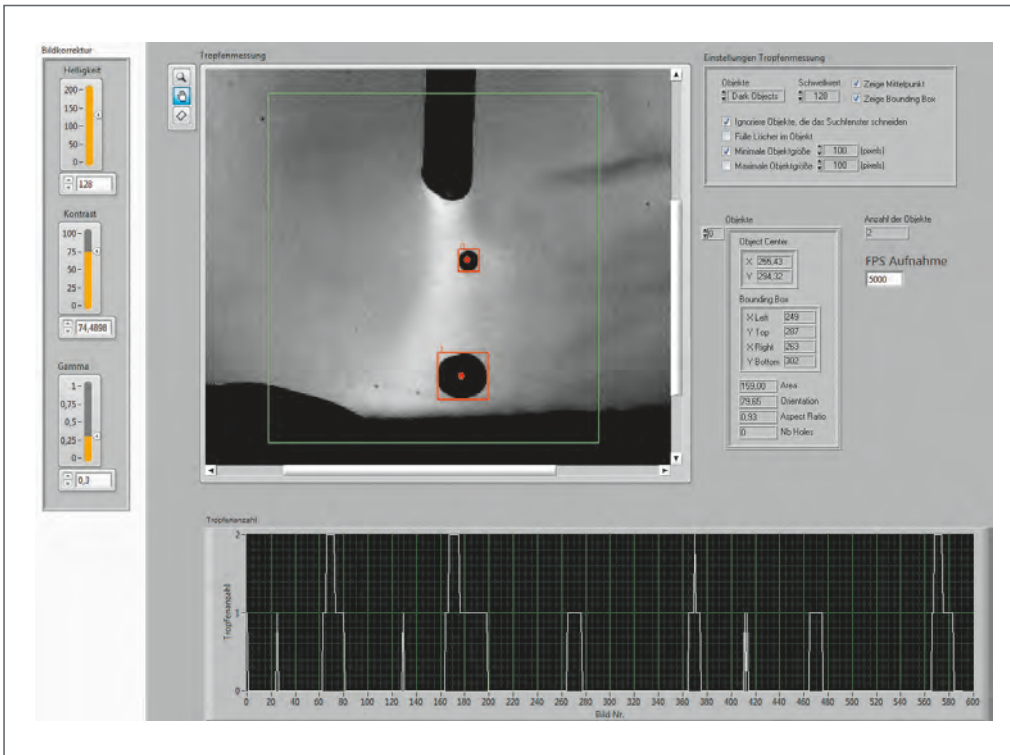


Abbildung 6:  
Arc Analyzer Tropfenenerkennung

jedoch nicht in jedem Fall auf die manipulierbaren Freiheitsgrade des Schweißprozesses übertragen. Aufgrund der inhärenten Komplexität der Lichtbogenschweißverfahren haben sich multivariate, statistische Verfahren bewährt die Zusammenhänge modellieren können, zu denen noch kein vollumfängliches analytisches Verständnis besteht.

**Abbildung 7** beschreibt die drei Kernelemente der angewandten statistischen Modellbildung, die sich am ISF im Kontext der spezifischen Anforderungen und Möglichkeiten der Schweißtechnik etabliert haben. Die zuvor beschriebenen Methoden zur Quantifizierung von Prozessgrößen (Variable Determination) führen zu abhängigen und unabhängigen Variablen und damit zu verifizierten Prozess-Beobachtungen. Statistische Verfahren profitieren im Allgemeinen von einem großen

Umfang an Beobachtungen, müssen sich jedoch gegen einen möglichen Versuchsaufwand rechtfertigen lassen. Zudem ist die reelle Modellgüte stark von der Verteilung der Beobachtungen abhängig. Diese Einflüsse werden unter dem Begriff „Planned Observation“ durch gezielte und numerisch unterstützte Parameterauswahl behandelt. Die

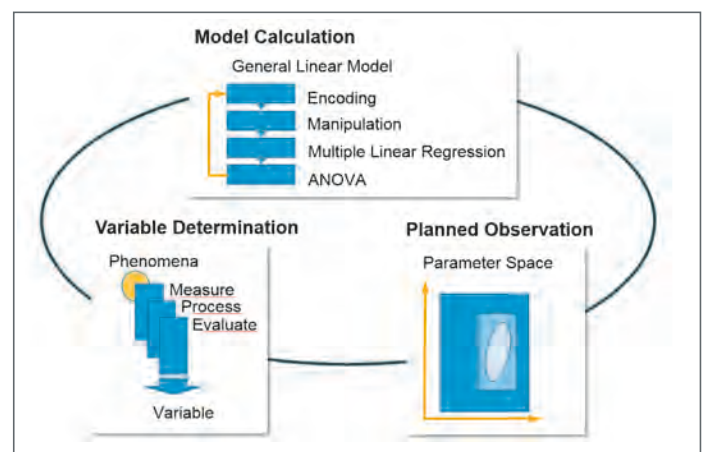


Abbildung 7:  
Angewandte statistische Modellbildung in der Schweißtechnik

eigentliche statistische Modellbildung (Model Calculation) folgt Methoden des allgemeinen linearen Modells, wie entsprechender Variablencodierung oder Varianzanalyse. Alle drei Kernelemente dürfen dabei jedoch nicht für sich sondern nur im Kontext Ihrer spezifischen Einflüsse auf Modellgüte und den Arbeitsbereich des Modells betrachtet werden.

Die beschriebene Methodik der Weiterverarbeitung von Prozesssignalen zu Applikationsspezifischen Prozessgüte- und Stabilitätskennwerten führt zu einer deutlichen Verdichtung von Daten ohne signifikanten Informationsverlust, wodurch die notwendigen Maßnahmen zur Speicherung und Bereithaltung von qualitätsrelevanten Informationen signifikant erleichtert werden.

**Kontakt:**

Rahul Sharma, M.Sc.  
Tel.: 0241 80-96267  
E-Mail: sharma@isf.rwth-aachen.de

# Motoman ArcWorld V2: Schlüsselfertige, roboterbasierte Schutzgas-Schweißzelle

*Mit der neuen ArcWorld V2 setzt Yaskawa die Erfolgsgeschichte seiner Roboterschweißzelle ArcWorld fort. Das Nachfolgemodell zeichnet sich durch einen geringen Platzbedarf, kurze Lieferzeiten und eine hohe Flexibilität aus: Roboter, Positionierer, Steuerung und Stromquelle sind auf einer Plattform zusammengefasst. So kann die Roboterzelle bei Bedarf schnell und einfach versetzt werden. Zudem verfügt das neue Modell über einen hellen, ergonomischen Arbeitsbereich für den Bediener, an dem die benötigten Materialien jederzeit zur Hand sind.*

Installation im Plug-and-Play-Verfahren: Mit der neuen Kompaktzelle gelingt Unternehmen der wirtschaftliche und unkomplizierte Einstieg in das roboterbasierte Schweißen. In der Standardversion kombiniert die Motoman ArcWorld V2 einen 6-achsigen Schweißroboter Motoman MA1440 und einem 2-Stationen-Positionierer mit jeweils 500 kg Traglast pro Station. Damit eignet sich die ArcWorld der zweiten Generation, die sich leicht in verschiedene Produktionsabläufe integrieren

lässt, für das Schweißen kleiner und mittelgroßer Bauteile. Das Be- und Entladen der Werkstücke kann auch mit dem Hallenkran erfolgen.

## Eine Zelle – vielfältige Möglichkeiten

Die ArcWorld V2 kann dank einer großen Auswahl an optionalen Ausstattungsmerkmalen an die jeweiligen Anforderungen in der Produktion angepasst werden. Verfügbar sind beispielsweise eine Schweißausrüs-

tung für das MIG-/MAG-Schweißen, eine Medienzuführung der Signal-, Luft- und Stromleitungen für den Positionierer oder auch ein HMI-Bedienpanel. Optional ist unter anderem die Installation von zwei Robotern (Twin-Roboter) bei gleichbleibender Aufstellfläche oder eines festen Positioniertisches möglich. Kombinierbar ist die Arc World V2 mit unterschiedlichen, am Markt bewährten Schweißstromquellen führender Hersteller und mit der Yaskawa-



Abbildung: Mit der neuen Motoman ArcWorld V2 erweitert Yaskawa sein Angebot an Roboterschweißzellen um ein ebenso kompaktes wie vielfältiges Modell. (Quelle: Yaskawa)

eigenen Inverter-Schweißstromquelle MOTOWELD-RL350.

## Komfortable Steuerung

Nicht zuletzt ist die neue Zelle komfortabel zu bedienen. Die Voraussetzung dafür bietet die aktuelle Steuerungs generation DX200. Über diese Hochleistungssteuerung lassen sich Manipulator und Positionierer einheitlich bedienen. Dabei bietet die DX200 über 120 anwendungsspezifische Funktionen.

# YASKAWA



## WELD MEISTER

MOTOMAN Roboter der MA-Serie haben YASKAWA zum Weltmeister beim Bahnschweißen gemacht. Setzen Sie auf diese Roboter. Sie werden begeistert sein.

## ewm Xnet Welding-4.0-Schweißmanagement mit digitaler Bauteilverwaltung

# Vernetzt von Büro bis Werkstück



Abbildung 1

Die neue Bauteilverwaltung von ewm Xnet steigert die Effizienz erheblich. Der Schweißer braucht lediglich jede gefertigte Raupe per PM-Funktionsbrenner direkt am Werkstück zu quittieren und kann unverzüglich weiterarbeiten.

Mit ihrem innovativen Welding-4.0-Schweißmanagement-System ewm Xnet bringt die EWM AG den Mehrwert von Industrie 4.0 in die Schweißfertigung. Die modular aufgebaute Software vernetzt Planung, Controlling und Fertigung. Damit steigert ewm Xnet die Effizienz und macht Schweißbetriebe zukunfts-fest: Sie profitieren durch Produktivitätssteigerung, Kostensenkung und Qualitätssicherung. Das neueste Highlight von ewm Xnet ist die Bauteilverwaltung.

### Bauteilverwaltung reduziert Nebenzeiten und erspart Arbeit

Digital Bauteile verwalten, Schweißfolgepläne erstellen und WPS zuordnen – die vollständig neu entwickelte, innovative Bauteilverwaltung steigert die Effizienz im Schweißbetrieb von der Planung bis zur Fertigung: Am Büro-PC wird das Bauteil aus dem CAD-System importiert oder in ewm Xnet neu angelegt und mit sämtlichen für den Schweißer relevanten Informationen versehen – insbesondere Schweißanweisungen (WPS) und Schweißfolgeplan. Papierlos per LAN oder WiFi an das Schweißgerät übermittelt, stehen dort sofort alle Parameter zur Verfügung. Die plangemäße Fertigung kann unverzüglich ohne das bisher aufwändige Planlesen und Einstellen des Schweißgeräts erfolgen.

### Die Datenbasis für mehr Gewinn

Bereits das Basismodul von ewm Xnet eröffnet bislang nicht da gewesene Möglichkeiten, noch wirtschaftlicher zu fertigen. Das System erfasst Schweißdaten in Echtzeit, verwaltet sie und übermittelt alle Verbrauchswerte sowie die effektive Lichtbogenzeit ins Büro. Ungenutzte Potenziale lassen sich so schnell und eindeutig feststellen. Auch für exakte Nachkalkulationen oder als Grundlage zur Angebotserstellung liefert die Software eine wertvolle Datenbasis.

### Klare Schweißanweisungen für konstante Qualität

Schweißanweisungen erstellen, verwalten und Schweißern zuordnen – der WPO-X-Manager von ewm Xnet spart wertvolle Zeit bei der Arbeitsvorbereitung. Über den intuitiv nutz-

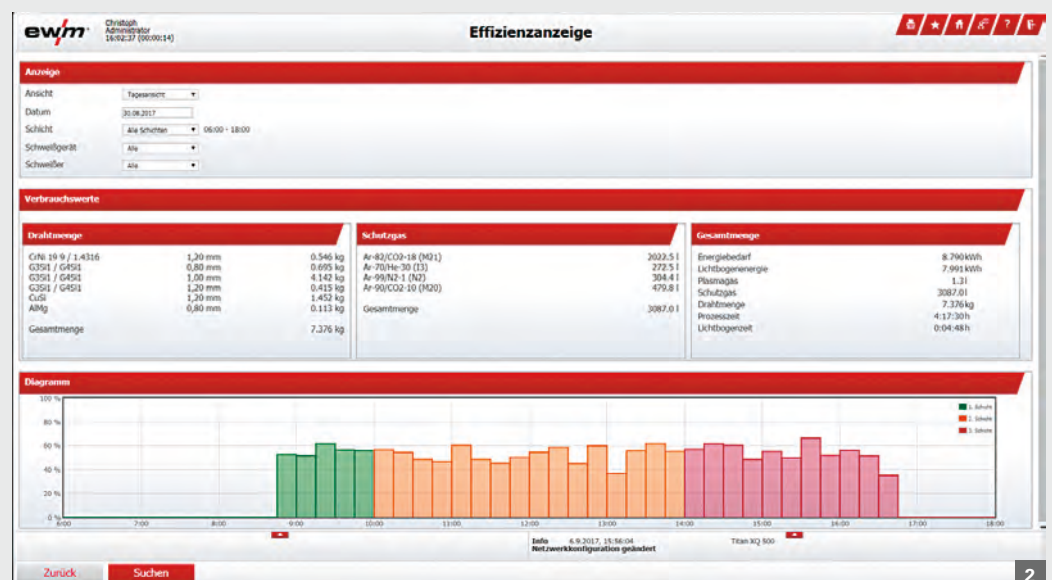
baren Grafikeditor lassen sich alle Raupen und Nähte schnell und exakt darstellen. Die Schweißanweisungen (WPS) fließen vom Büro per LAN oder WiFi direkt an das Schweißgerät und lassen sich vom Schweißer unverzüglich und einfach abrufen.

### Identifizierte Qualifikation für normgerechte Ergebnisse

Die Qualitätssicherung jeder Schweißnaht unterstützt in Verbindung mit ewm Xnet der Xbutton am Schweißgerät. Über ihn stellt das System sicher, dass nur Schweißer mit entsprechender Qualifikation die jeweilige Schweißaufgabe durchführen dürfen.

Abbildung 2

Das Basismodul von ewm Xnet hilft u.a. mit der Effizienzanzeige wirksam dabei, Produktionsabläufe zu straffen sowie Dokumentationspflichten normgerecht und blitzschnell zu erfüllen.



**Benedict Menningen/EWM AG**  
 Dr. Günter-Henle-Straße 8  
 D-56271 Mündersbach  
 Tel.: +49 (0)2680 181-465  
 benedict.menningen@  
 ewm-group.com  
 www.ewm-group.com

# VERMESSUNG DES ELEKTRONEN- STRAHLS FÜR WISSENSCHAFTLICHE UND INDUSTRIELLE ANWENDUNGEN

Stefan Jakobs, Bernd Reichenberg, Jens de Vries

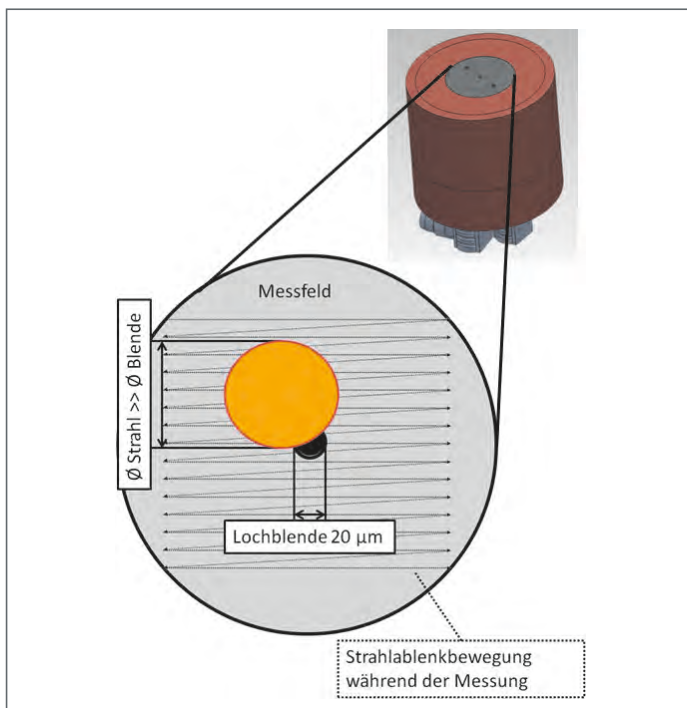


Abbildung 1:  
Prinzip der Lochblendenmessung

Der industrielle Einsatz von Elektronenstrahlschweißmaschinen erfordert von dem Werkzeug „Strahl“ hohe Anforderungen hinsichtlich Prozessstabilität und Reproduzierbarkeit. Um dies sicherzustellen, werden nach Manipulationen am Strahlerzeuger häufig aufwendige Testschweißungen durchgeführt. Mittels eines automatischen Strahlvermessungssystems, kann eine gleichbleibende Strahlqualität bedienerunabhängig gewährleistet werden.

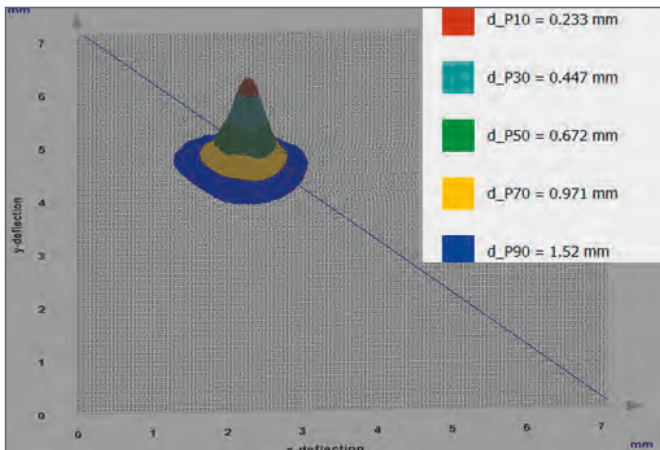


Abbildung 2:  
Darstellung der Leistungsdichtebezogenen Strahldurchmesser

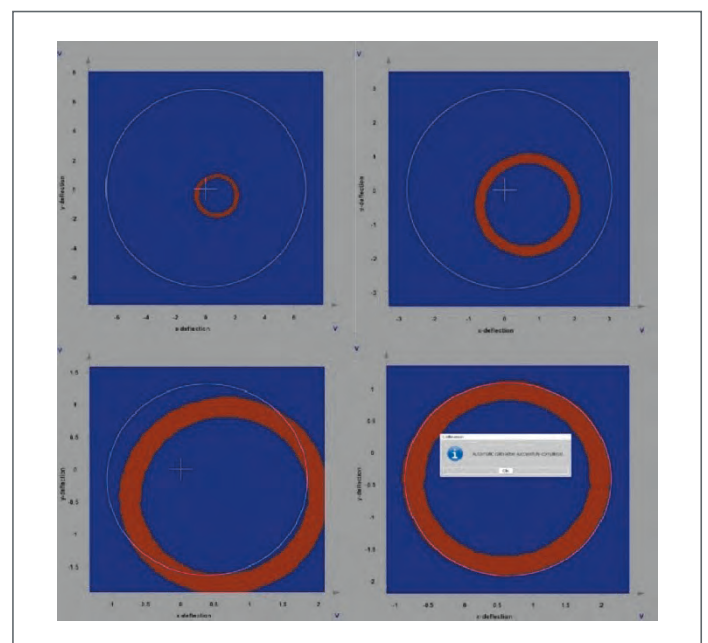
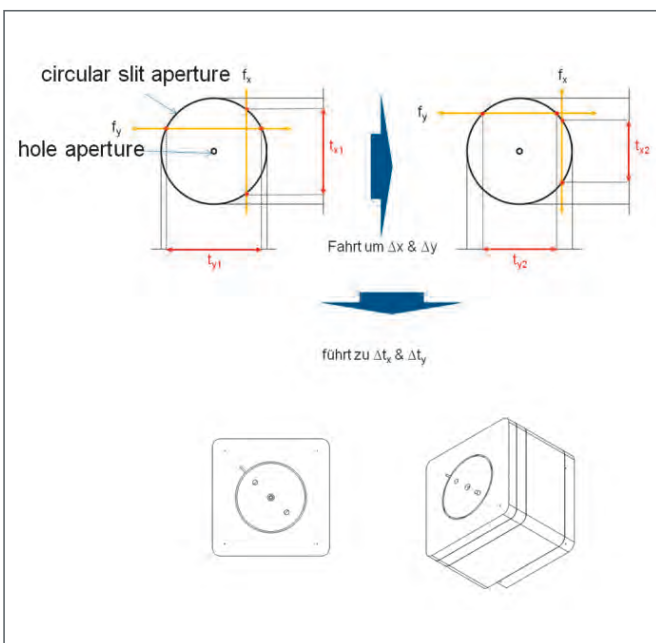
### 1. EINLEITUNG

Bei Schweißverbindungen, die höchsten Ansprüchen genügen müssen, ist das Elektronenstrahlschweißen das prädestinierte Verfahren. Forschung und Entwicklung sowie Luft- und Raumfahrtindustrie legen Wert auf die hohe Prozesssicherheit des Elektronenstrahls. Im Automobilbereich überzeugt der Elektronenstrahl durch seinen hohen Automatisierungsgrad in Verbindung mit seiner reproduzierbaren, hohen Qualität.

Besonders die Fügeaufgaben in der Luft- und Raumfahrtindustrie erfordern ein Fügewerkzeug, das die höchsten Anforderungen gemäß Nahtqualität und Reproduzierbarkeit in der Serienfertigung erfüllt. Um diesen Standard zu erreichen ist ein optimal eingeregelter Strahl zwingend notwendig. Sollabweichungen, resultierend aus veränderten geometrischen oder elektrischen Randbedingungen, können zu drastischen Fügefehlern führen. Im Hinblick auf die Konstanz und Reproduzierbarkeit – gleichermaßen in der Massen- und in der Einzelproduktion – ist die Kontrolle der Strahlparameter von großer Bedeutung. Ein Hauptproblem bei allen Elektronenstrahlschweißmaschinen ist die objektive Messung und Dokumentation der Qualität des Elektronenstrahls. Zwar besitzen viele moderne Elektronenstrahlanlagen eine messtechnische Überwachung des Elektronenstrahls, es fehlt jedoch ein standardisiertes Verfahren zur herstellernerneutralen Vermessung und Analyse des

Elektronenstrahls. Mit einem leistungsfähigen Strahl Diagnosesystem ist es möglich, die hohen Standards der Nahtqualität und Reproduzierbarkeit zu gewährleisten. Ein derartiges Messmittel ist eine Grundvoraussetzung für eine leichte Übertragbarkeit von Prozessen zwischen verschiedenen Anlagen. Eine simple Anwendung stellt beispielsweise die Bestimmung der realen Fokusposition bei hoher Strahlleistung dar. Diese Information ist speziell bei Dickblechschweißaufgaben notwendig. Weiterhin ist die Ermittlung des optimalen Leistungsbezogenen besten Arbeitsabstandes möglich. Es kann festgestellt werden, ob ein Kathoden- oder Triodenwechsel korrekt ausgeführt wurde. Informationen über die Änderung der Fokusverschiebung mit steigendem Strahlstrom korrelieren direkt mit den geometrischen Verhältnissen in der Triode. Eine fehlerhafte Installation der Kathode, ein veränderter Abstand zwischen Wehneltzylinder und Anode

Abbildung 3:  
Automatische Kalibrierung und Justierung des Sensors





und ein falscher Heizstrom sind sofort messbar [1].

## 2. MÖGLICHKEITEN DER STRAHLVERMESSUNG

Die Vermessung der Strahlqualität kann grundsätzlich nach drei verschiedenen Prinzipien durchgeführt werden. Die einfachste Methode ist der Arata-Beam-Test, bei dem die Einbrandform an speziellen Testblechen analysiert wird [2]. Die Vermessung des Elektronenstrahls mit fotografischen/optischen Verfahren (Fluoreszenzschirm) ist nur für sehr niedrige Strahlleistungen möglich [3]. Weiterhin ist es möglich, die Strahlqualität anhand des Rückstreuелеktronenbildes einer definierten Geometrie abzuleiten, während der Strahl auf einem Messaufbau oszilliert [4]. Alternativ besteht die Möglichkeit der direkten Vermessung der Leistungsdichte und der Leistungsdichteverteilung. Dabei oszilliert der Strahl über einem Loch- oder Schlitzblendenensor, wodurch die Leistungsdichte diskret aufgelöst werden kann. [5, 6] (**Abbildung 1**)

## 3. MESSBARE GRÖSSEN UND IHR EINFLUSS

Als grundlegenden Messwert erhält man die Leistungsdichte und deren Verteilung. Ausgehend von diesem Wert ist es möglich, den äquivalenten Strahldurchmesser zu berechnen. Es gibt zwei verschiedene Durchmesser, die bestimmt werden können. Zum einen den Amplituden bezogenen Strahldurchmesser  $d$  und zum anderen den Leistungsdichte bezogenen Durchmesser  $d_p$ , **Abbildung 2**.

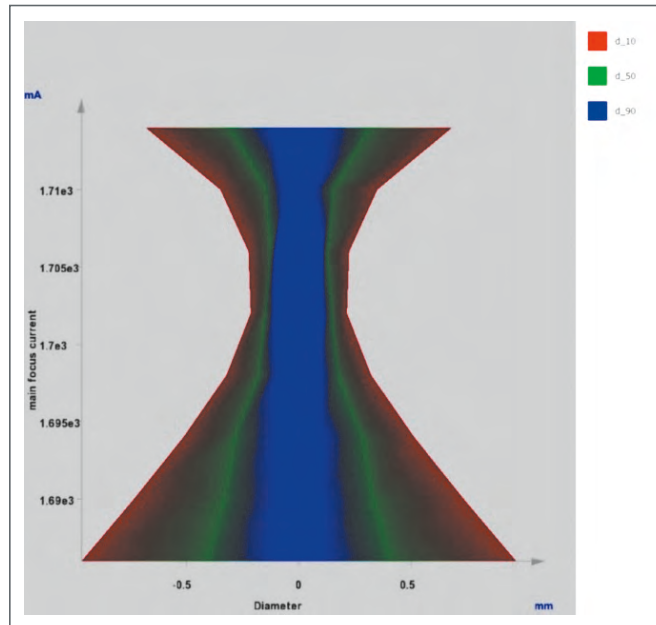


Abbildung 4:  
Darstellung der Kautik eines Elektronenstrahls

Der Leistungsdichte bezogene Durchmesser  $d_p$  ist eine der wichtigsten Werte für die Qualität einer Schweißnaht [7]. Durch die Darstellung der Leistungsdichte und ihrer Verteilung kann der Justagezustand und ein möglicher Astigmatismus ermittelt werden. Mit wiederholten Messungen in verschiedenen Arbeitsabständen kann die Strahlkaustik und der Aperturwinkel ermittelt werden. Aus diesen Werten errechnet sich die Emittanz, welche auch als das geometrische Strahlparameterprodukt bezeichnet wird [1, 8].

## 4. ENTWICKLUNG DES STRAHLVERMESSUNGSSYSTEMS DIABEAM

### 4.1 PRIMÄRENTWICKLUNG

Basierend auf ISF eigenen Entwicklungsgenerationen verschiedener Strahlvermessungsgeräte für den Laboreinsatz in den vergangenen 30 Jahren wurde 2011–2013 in Zusammenarbeit mit der Firma aixACCT ein Strahlvermes-

sungsgerät für den industriellen Einsatz entwickelt.

Das Messprinzip kombiniert Schlitz- und Lochblenden Sensor. Die kreisförmige Schlitzblende ermöglicht es durch Messen der Signalverschiebung den Sensor automatisch zu kalibrieren und zu justieren, ohne umfangreiche Setup-Operationen durch den Benutzer, **Abbildung 3** [9].

Die zentrische Lochblende dient der inkrementellen Messung der Leistungsdichte. Als grundlegenden Messwert erhält man die Leistungsdichteverteilung des Elektronenstrahls. Ausgehend von diesen Werten werden die Strahldurchmesser berechnet.

Mit wiederholten Messungen in verschiedenen Arbeitsabständen durch Verfahren der Z-Achse kann die Strahlkaustik und die Aufweitung des Strahls, der so genannte Aperturwinkel, ermittelt werden, **Abbildung 4**. Strahlkaustikmessungen ermöglichen Bestimmung des realen Fokus-

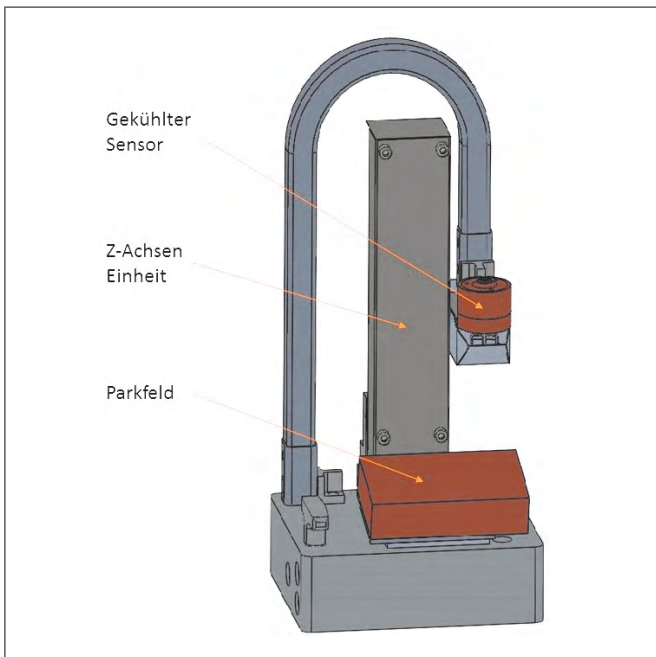
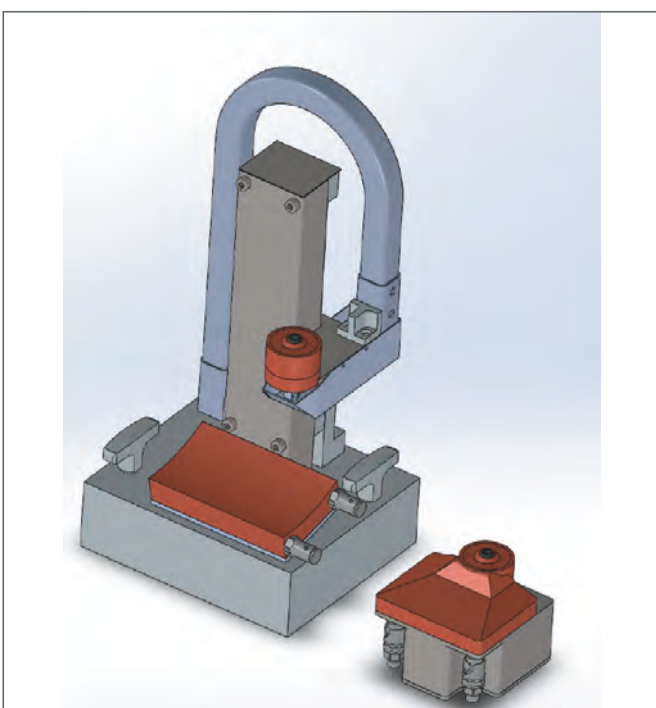


Abbildung 5:  
Aufbau der DiaBeam-Sensoreinheit

punktes, d.h. den Punkt in dem der Strahl seinen geringsten Durchmesser besitzt. Damit können Elektronenstrahlmaschinen oder unterschiedliche Betriebszustände verglichen werden.

Abbildung 6:  
Größenvergleich von Kaustik- und Miniatursensor



Durch die Onlinedarstellung des Elektronenstrahldurch-

messers ist die Bestimmung der Abweichung des Elektronenstrahls von seiner idealen Geometrie möglich.

Aufgrund des robusten Messaufbaus und der Trennung von Signalaufzeichnung, Übertragung, und Verstärkung, sind Messungen bei hohen Strahlleistungen bis 15 kW (Manueller Modus), bzw. 30 kW (Automatik Modus) möglich. Zwischen den einzelnen Messungen wird der Strahl auf ein Parkfeld abgelenkt, **Abbildung 5**.

Die kompakte Bauweise des Messkopfes ermöglicht Messungen in kleinen Kammern und mit geringem Ablenkwinkeln. Das System kann sowohl vorübergehend als auch dauerhaft in bestehenden Elektronenstrahlschweißmaschinen installiert werden. Damit ist eine automatisierte Strahlkontrolle in regelmäßigen Abständen möglich. Die Bediensoftware sieht verschiedene Benutzerebenen vor, um das System entweder als automatisierte Entscheidungshilfe für industrielle Anwendungen oder als wissenschaftliches Instrument mit umfangreichen Parametrierungsoptionen zu nutzen.

## 4.2 KONTINUIERLICH WEITERENTWICKLUNG

### Messautomatisierung

Aufgrund der hohen Komplexität aller verfügbaren Systemparameter ist das Messgerät nur von erfahrenen Bedienern in allen Funktionen nutz- und einstellbar. Für den industriellen Einsatz bedarf es daher eines hohen Automatisierungsgrades. Die Messgeschwindigkeit und Ergebnis-

reproduzierbarkeit wird durch die Ausführung von vollautomatischen Messsequenzen gesteigert. Während der Messsequenzen kontrolliert das Messsystem die Parameter Strahlstrom, Fokusstrom und Position. Die Randbedingungen der Messungen werden vordefiniert und das System berechnet nach Sequenzdurchlauf die Abweichungen von Soll- zu Istzustand. Diese weniger detaillierte Operator Bedienebene vermeidet Bedienfehler. Im Rahmen der bedienergeführten, halbautomatischen Strahljustage, wird der Justagezustand des Strahls und die notwendigen Korrekturwerte berechnet, sowie die Strahlform (Stigmatisierung) optimiert.

### Hardwarevarianten

Der Einsatz in industriellen Serienanlagen birgt in der Regel geometrische Restriktionen, die die Entwicklung einer miniaturisierten Version der Sensorhardware erfordern. Oft kann auf eine sensoreigene Achse verzichtet werden, wenn die Messgerätsteuerung auf die anlageninternen Achsen zugreift. Der Miniatursensor benötigt gegenüber dem Kaustiksensoren nur ca. 1/10 an Bauraum (**Abbildung 6**) und kann damit leicht dauerhaft in EB-Schweißanlagen verbaut werden. Dabei entspricht die maximale messbare Strahlleistung mit 15 kW, bzw. 30 kW der des Kaustiksensors.

### Einsatz im industriellen Umfeld

Die auf exklusiven Anforderungen der industrieller Partner basierenden zahlrei-

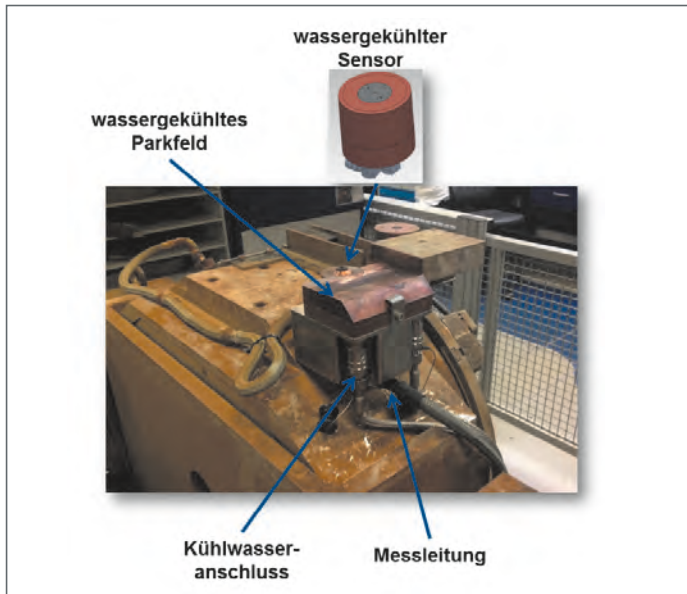


Abbildung 7:  
Miniatursensor bei Rolls-Royce



Abbildung 8:  
DiaBeam mit Spulenhaltung für NAMRC

chen Weiterentwicklungen des Systems wurden unter anderem bei der Firma Rolls-Royce im industriellen Umfeld getestet, **Abbildung 7**. Kautiken über den Arbeitsabstand können hier durch Ansprechen der anlageninternen Achsen realisiert werden.

Für NAMRC in Sheffield wurde eine Abwandlung des Kautiksensorsystems entwickelt. Das Messsystem soll in mehreren Anlagen, mit teilweise mobilem, kammer-internen Strahlerzeuger genutzt werden, weswegen die messsystemeigene Ablenkspule mittels eines Stativs mit der Sensorhardware verbunden ist, **Abbildung 8**.

#### Literatur

- [1] Ahmadian, M.-A.: Konzeption und Realisierung eines wissensbasierten Maschinendiagnosesystems beim Elektronenstrahlschweißen; Dissertation, RWTH Aachen, 1992
- [2] Arata, Y.: Evaluation of beam characteristics by the AB test method, IIW-Doc.IV-340-83 1983
- [3] Kanaya, K.: Measure of focus properties of an electron probe by means of a shadow image; Bulletin of the electrotechnical laboratory 31 (1967), Nr. 2
- [4] Löwer T.: Verfahren zum Vermessen des Intensitätsprofils eines Elektronenstrahls, insbesondere eines Strahls eines Elektronenstrahlbearbeitungsgeräts, und/oder zum Vermessen einer Optik für einen Elektronenstrahl und/oder zum Justieren einer Optik für einen Elektronenstrahl, Meßstruktur für ein solches Verfahren und Elektronenstrahlbearbeitungsgerät, Deutsches Patentamt, Patentschrift, Aktenzeichen: DE000010232230A1, Inhaber: pro-beam AG & Co. KGaA., 05.02.2004
- [5] B. Spies: Beitrag zur Vermessung und Beeinflussung des Elektronenstrahls für eine gezielte Verbesserung der Technologie des Elektronenstrahlschweißens, Dissertation, RWTH Aachen, 1980
- [6] M. Panten: Beitrag zur Realisierung eines Maschinendiagnosesystems und eines adaptiven Fugennachführsystems für das Elektronenstrahlschweißen, Dissertation, RWTH Aachen, 1988
- [7] Weiser J.: Untersuchungen zu Strahlcharakteristika und deren Auswirkungen auf die Schweißergebnisse beim Elektronenstrahlschweißen, Dissertation, RWTH Aachen, Shaker Verlag, 1994, ISBN: 3-8265-0420-8
- [8] C.G. Menhard, T. Löwer: Die Elektronenstrahlgeometrie – Definition, Vermessung und Bedeutung für den Schweißprozess. Mitteilung aus der pro-beam AG, Planegg, Schweißen und Schneiden 61, (2009), Heft 2
- [9] A. Backhaus, H.P. Bauer, B. Reichenberg, U. Reisinger, T. Schmitz-Kempen, S. Ufer, J. de Vries: Verfahren zur Ermittlung von Strahlparametern eines Ladungsträgerstrahls, Messeinrichtung sowie Ladungsträgerstrahlvorrichtung, Deutsches Patentamt, Patentschrift, Aktenzeichen: DE102012102608A1, Inhaber: RWTH Aachen – Körperschaft des öffentlichen Rechts; aixACCT Systems GmbH, 27.03.2012

#### Kontakte:

Dr.-Ing. Stefan Jakobs  
Tel.: 0241 80-96270  
E-Mail: jakobs@isf.rwth-aachen.de

Dr.-Ing. Simon Olschok  
Tel.: 0241 80-96253  
E-Mail: olschok@isf.rwth-aachen.de

Cool gefügt:

# FÜGEN FÜR ELEKTROTECHNISCHE ANWENDUNGEN

Marc Essers, Isabel Balz, Gregor Gintrowski,  
Alexander Schiebahn

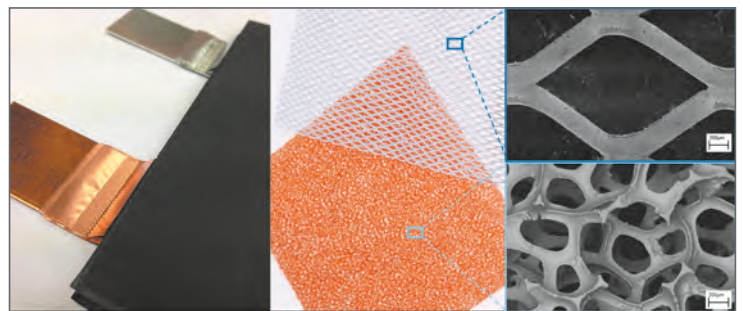


Abbildung 1: Verbindung der Zellelektroden an konventionellen Elektrodenfolien (links), innovative dreidimensionale Stromableiter (mittig), REM-Detailansicht

Von der dezentralen Energiespeicherung aus erneuerbaren Energien bis hin zur Elektromobilität steht die kontinuierliche Weiterentwicklung von elektrischen Systemen im Vordergrund. Damit einhergehend werden besondere Anforderungen an die Auslegung und Fertigung von elektrischen Verbindungsstellen bzw. Kontaktierungen gestellt. Neben den fügetechnischen Aufgaben in elektrischen Systemen, die sich häufig auf stoffschlüssige Verbindungen der Leiterwerkstoffe Al und Cu sowie deren Legierungen beziehen, konfrontiert auch der zunehmende Materialmix im Fahrzeugbau durch die konsequente Umsetzung von Leichtbaukonzepten die Füge-technik mit immer neuen Herausforderungen. Wärmearme, stoffschlüssige Verbindungstechnologien, wie beispielsweise diverse Reib-, Press- und Widerstands-Schweißverfahren sowie klebtechnische Anwendungen können hierfür oftmals adäquate Lösungen bieten. Die Abteilung „Cold Technologies“ (Kalte Füge-techniken) des ISF befasst sich aus diesem Grund in zahlreichen Forschungsprojekten mit der Untersuchung und Weiterentwicklung moderner Schweiß- und Füge-technologien für diverse elektrotechnische Anwendungen.

Mit Hilfe wärmearmer Fügeverfahren können Bauteile unter relativ geringer thermischer Belastung gefügt werden. Thermisch bedingte Veränderungen des Werkstoffgefüges,

die häufig nachteilige Auswirkungen hinsichtlich mechanischer Eigenschaften mit sich bringen, werden stark reduziert. Die Schmelztemperatur der Werkstoffe wird vielfach

nicht erreicht, so dass bei Mischverbindungen in der Fügezone die Bildung spröder intermetallischer Phasen, wie sie üblicherweise verstärkt bei Schmelzschweißverfahren auf-

treten, stark reduziert bzw. nahezu gänzlich verhindert wird. Zu diesen Verfahren zählen zum Beispiel Ultraschallschweißen, Widerstandsschweißen, Rührreißschweißen und klebtechnische Verbindungen. Auch Verfahrenskombinationen, sogenannte hybridtechnische Anwendungen, sind möglich. Diesbezüglich lässt sich gerade das Kleben mit diversen Fügeverfahren kombinieren. Beispiele aus dem Bereich der wärmearmen Fügeverfahren sind das Punktschweißkleben und das klebstofffixierte Rührreißschweißen, das am ISF unter dem Namen „BondWELD“ entwickelt worden ist. Ein wesentlicher Vorteil des Klebens liegt neben der Reduzierung von Spannmitteln beim Rüstvorgang auch in der Generierung von Dichtfunktionen, so dass die Schweißstelle nach dem Fügeprozess vor äußeren Einflüssen dauerhaft geschützt werden kann. Die Elektrotechnik und im Speziellen das Feld der Elektromobilität bieten zahlreiche potentielle Anwendungen für wärmearme Fügeverfahren. Die entsprechenden Forschungsfelder konzentrieren sich dabei im Wesentlichen auf elektrische Kontaktierungen/Stromführungen in Batteriesystemen und Bordnetzen sowie auf diverse Fügestellen im Karosseriebau zur Umsetzung von Leichtbaulösungen.

#### FORSCHUNGSFELD „BATTERIETECHNIK“

Besonders im Bereich der mobilen Hochvoltanwendungen hat sich die Lithium-Ionen-Batterie zu einer der wichtigsten Speichertechnologien entwickelt. Die zentrale Forschungsfrage liegt dabei insbesondere in der Effizienz der Speicherung von Energie: Einerseits

müssen Kosten gesenkt und andererseits die Lebensdauer und Performance von Batterien verbessert werden.

Im Zuge dieser Bestrebungen befasst sich das ISF im Rahmen verschiedenster Forschungsvorhaben mit der zielgerichteten Weiterentwicklung der Prozesstechnik und des zugehörigen Produkts, der Batteriezelle. Hierbei steht die kontinuierliche Verbesserung von funktionalen Eigenschaften wie beispielsweise die Energiedichte, Lebensdauer, Sicherheit aber auch ökonomischen Kriterien im Fokus der Untersuchungen.

Einen innovativen Beitrag hierzu liefert das aus den Mitteln des Europäischen Fonds für regionale Entwicklung (EFRE) geförderte Projekt „InTreS“ (EFRE-0800612), das die Performancesteigerung von stationären Speichern auf Basis der Lithium-Ionen-Technologie durch einen ressourcenschonenden Einsatz von innovativen Trägermaterialien zum Ziel hat. Im Vorhaben werden die aktuell eingesetzten Stromableiter (Al- und Cu-Folien) der Batteriezelle durch dreidimensionale Trägermaterialien (Streckmetalle, Metallschäume, Metallgewebe, etc.) substituiert (**Abbildung 1**). Durch eine verbesserte Anbindung zwischen Substrat und Aktivmaterial soll die Lebensdauer der Batterie verbessert werden. Gleichzeitig erlaubt die Vergrößerung des Oberfläche-Volumen-Verhältnisses der eingesetzten Trägermaterialien eine Steigerung der Energiedichten.

Hierzu sind die Stromableiter zunächst geometrisch auszulagern und die Produktionsschritte der Wertschöpfungskette sukzessive mit Hilfe der unterschiedlichen Forschungs-

partner (PEM der RWTH Aachen, Coatema Coating Machinery GmbH, Aurubis Stolberg GmbH, production.net AC GmbH, Futavis GmbH) anzupassen. Das ISF untersucht unter anderem im Forschungsvorhaben das Fügen der dreidimensionalen Stromableiter (Al/Cu-Streckmetall, -Metallschaum, etc.) an die Zellpole einer Lithium-Ionen-Pouchzelle (**Abbildung 1, rechts**). Neben den Anforderungen hinsichtlich der Anbindungsqualität spielt bei der Zellmontage die Unversehrtheit der Kontaktstellen beziehungsweise der Batteriezellenbestandteile eine entscheidende Rolle. Das zerstörungsfreie Fügen der filigranen Stromableiter stellt eine besondere Herausforderung an den Schweißprozess dar. Zur Realisierung dieser Verbindungen kommt in diesem Vorhaben das Ultraschallschweißen zum Einsatz. Abschließend wird ein stationärer Batteriespeicher auf Basis der neu entwickelten Stromableiter aufgebaut, um deren Potential gegenüber dem konventionellen Folienmaterial zu validieren.

Weiterhin befasst sich das ISF mit der elektrischen Kontaktierung von prismatischen Zellen sowie Pouch-Zellen auf Lithium-Ionen-Basis. Im Zuge dessen werden sowohl das Ultraschallschweißen als auch das Widerstandsbuckelschweißen als Kontaktierungsverfahren von Batteriezellen untersucht. Neben den schweißtechnischen Forschungsaufgaben an den relevanten Aluminium- und Kupferwerkstoffen spielt auch die konstruktive Gestaltung der Zelleiter/Zellterminals eine Rolle. Die Optimierung der entsprechenden Fügetechnologien im Bereich der Zellkontaktierung erfolgt

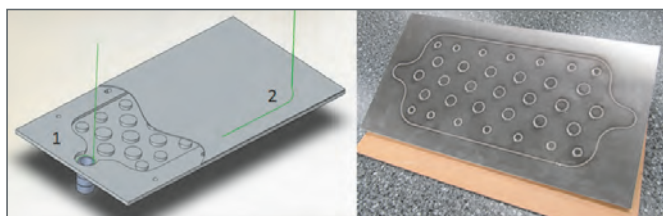


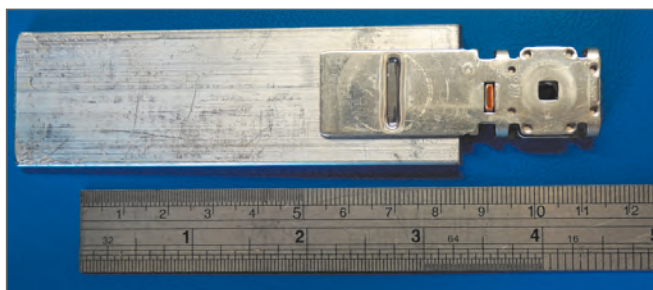
Abbildung 2:  
EB-geschweißte Kühlplatte

nach diversen Bewertungskriterien; diese erstrecken sich nicht nur auf die Verbindungsqualität hinsichtlich elektrischer, mechanischer, und thermischer Eigenschaften, sondern berücksichtigen auch die allgemeine Wirtschaftlichkeit des jeweiligen Verfahrens im Hinblick auf die Serientauglichkeit. Darüber hinaus erprobt das ISF geeignete schweißtechnische Anwendungen zur Generierung von Dichtnähten an zweischaligen Kühlelementen für ein strukturintegriertes Batteriekühlsystem. Als potentielle Fügeverfahren werden das „Klebstofffixierte Rührreibschweißen“ und das „Elektronenstrahlschweißen (EBW)“ eingesetzt, wobei das EBW aufgrund der hohen Flexibilität bzw. der freien Manipulierbarkeit des Elektronenstrahls insbesondere bei der Herstellung geometrisch komplexer Kühlplattenstrukturen Potenziale aufweist (**Abbildung 2**).

### FORSCHUNGSFELD „BORDNETZ“

Abbildung 3:  
Widerstandsbuckelschweißung eines  
Kupfersteckers auf einen PKW Backbone-  
Aluminiumflachleiter

Viele mechanische Anwendungen im Fahrzeug sind über die Jahre mehr und mehr durch



elektrotechnische und elektronische Komponenten und Prozesse ersetzt worden. Oftmals sind wir uns dessen gar nicht bewusst, so zum Beispiel beim Setzen des Blinkers, dessen akustisches Signal heutzutage nicht mehr durch ein Relais sondern durch eine Elektronik erzeugt wird. Oder welcher Laie kennt schon die Komplexität eines Kabelbaums im Fahrzeug? Die gesamte Fahrzeugelektronik leitet ihre Impulse zur Fahrzeugbedienung über Schnittstellen zwischen den einzelnen Komponenten. Und alle diese Komponenten sind über Fügeverbindungen miteinander verbunden. Es handelt sich beispielsweise um Batteriekontakte, Kabelanschlüsse, Sicherungen oder Bonddrähte aus unterschiedlichen Werkstoffen. Zuverlässige Schweißverbindungen sollen hier dafür sorgen, dass auch bei Erschütterung, Vibration oder Feuchtigkeitseinflüssen alles reibungslos und sicher funktioniert. Daher erfordert die zunehmende Elektrifizierung im Fahrzeugbau neue fügetechnische Lösungen. Herkömmliche kraft- und formschlüssige Verbindungen etwaiger Schnittstellen wie zum Beispiel konventionelle Schraub- und Steckverbindungen stoßen hinsichtlich ihrer Stromtragfähigkeit und Dauerbeständigkeit an ihre Grenzen. Dabei können durch wärmearme, stoffschlüssige Fügeverfahren robuste, niederohmige Kontaktierungen generiert werden.

Das ISF entwickelte im Rahmen eines öffentlichen IGF Forschungsprojekts in den letzten Jahren eine Variation des Widerstandsbuckelschweißens welche es ermöglicht äußerst schnell und kostengünstig Aluminium mit Kupfer

zu stoffschlüssig zu verbinden. Die nutzbaren Materialdicken bewegen sich hier zwischen jeweils 1 mm bis 3 mm. Auch mit Zinn beschichtete Kupferstecker konnten Anwendungstauglich so verschweißt werden ohne die umgebende Beschichtung nachhaltig zu beschädigen, s. **Abbildung 3**. Um die Verbindung herzustellen wird ein speziell geometrisch optimierter Buckel in das harte Kupfer eingeprägt. Während der Schweißung konzentriert der Buckel den Schweißstrom und verflüssigt das daran angepresste Aluminium. Durch die Benetzung des Kupferbuckels mit dem flüssigen Aluminium entsteht eine Verbindung aus intermetallischen Phasen. Obwohl diese Phasen allgemein als spröde und schlecht leitfähig gelten, konnte nachgewiesen werden, dass die Schweißverbindung bessere mechanische und elektrische Eigenschaften aufweist als das umgebende Aluminium. In **Abbildung 4** ist eine mit dem Buckelschweißen hergestellte Al-Cu Verbindung unter Stromlast zu sehen. Die Blechprobe wurde mit 4000 A (DC) für 3 Sekunden belastet. Der Temperaturspitzenwert lag an der heißesten Stelle bei ca. 40 °C und befindet sich recht neben der Schweißverbindung.

Bei mechanischen Tests zeigte es sich, dass bei geeigneter Wahl der Schweißparameter sogar ein Grundwerkstoffversagen erzielt werden kann. Bei dynamisch belastete Proben konnten eine Dauerfestigkeit mit  $10^6$  Zyklen ( $R=0,1$ ) bei 400 N festgestellt werden. Im Rahmen des Projektes wird genau analysiert welchen Einfluss die intermetallischen Phasen zeigen, wo die Prozessgrenzen liegen und in wie

weit der Prozess für eine industrietaugliche Anwendung hin optimiert werden kann.

Das IGF-Vorhaben 18.581 N der Forschungsvereinigung (Deutscher Verband für Schweißen und verwandte Verfahren e.V.) wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der Industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert.



## FORSCHUNGSFELD „LEICHTBAU“

Um die Attraktivität eines Elektrofahrzeuges für den Endverbraucher zu erhöhen, müssen in erster Linie die bisher noch hohen Anschaffungskosten für ein Elektrofahrzeug reduziert werden. Da die Batterie einen wesentlichen Anteil dieser Kosten trägt, ist es notwendig, zum einen die allgemeinen Batterieproduktionskosten zu senken und zum anderen das Gewicht der Karosserie durch Leichtbauweise zu optimieren, um die Effektivität des mobilen Fortkommens zu steigern. Dies führt

bei der Konstruktion der Karosserie zur Wahl von Stählen mit höheren Festigkeiten und somit zu Materialersparnis oder zum Einsatz von Werkstoffen mit geringerer Dichte, wie Aluminium oder Kunststoff. Die konsequente Umsetzung von Leichtbaulösungen spiegelt sich demnach in einem zunehmenden Materialmix im Fahrzeugbau wider. Eine bedeutende Schlüsselrolle spielt hierbei die Fügetechnik, die letztendlich auch über die Machbarkeit einer Leichtbaukonstruktion entscheidet.

Im Karosseriebau konventioneller Automobile hat sich die so genannte Schalenbauweise etabliert. Dabei werden Bleche in entsprechenden Pressen zu Blechschalen mit definierter Geometrie geformt und anschließend Stück für Stück bis zur fertigen Rohkarosserie aneinander gefügt. Dies geschieht hauptsächlich mittels Widerstandspunktschweißen. Aufgrund der kostenintensiven Presswerkzeuge ist die Schalenbauweise jedoch erst ab hohen Stückzahlen wirtschaftlich. Für die aktuell zu erwartenden Stückzahlen eines Elektrofahrzeuges kommt diese Bauweise dementsprechend weniger in Frage. Vielmehr ist der Einsatz von kostengünstigen Standardprofilen aus Stahl oder Aluminium zweckmäßig.



Abbildung 5: Rührreißschweißen einer Al-Cu-Mischverbindung (links) und Schliffbild einer rührreißgeschweißten Al-Stahl-Mischverbindung (rechts)

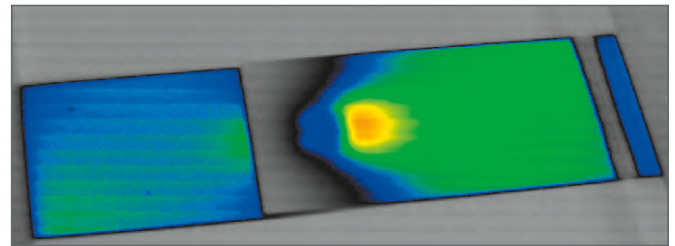
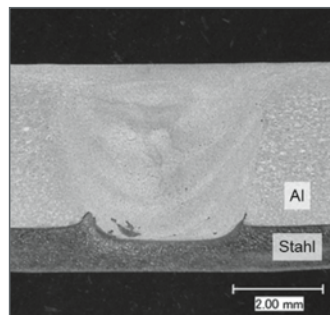


Abbildung 4: Thermografieaufnahme einer bestromten Al-Cu Blech-Blech-Schweißverbindung

Die Kombination dieser beiden Anforderungen, dem Leichtbau auf der einen und der Profilbauweise auf der anderen Seite, stellt eine große Herausforderung an die Fügetechnik dar. Die etablierten und preisgünstigen Fügeverfahren des Punktschweißens und auch die Verfahrenskombination Punktschweißkleben können bei einer profilintensiven Bauweise nur sehr eingeschränkt eingesetzt werden. Prozesse mit hoher Wärmeeinbringung, wie die konventionellen Lichtbogenschweißverfahren, sind ebenso nur begrenzt einsetzbar, da mit ihnen das Fügen von Leichtbauwerkstoffen schwer zu realisieren ist. Höherfeste Stähle besitzen ein herstellungsseitig speziell eingestelltes Gefüge und dadurch gute mechanische Eigenschaften, die durch hohe Wärmeeinbringung zerstört würden. Aus diesem Grund ist es erforderlich, Verfahren mit relativ geringem Wärmeeintrag, wie beispielsweise Laserstrahlschweißen, Kleben oder das Friction Stir Welding (Rührreißschweißen, **Abbildung 5**) auf ihre Eignung hin zu überprüfen oder prinzipiell geeignete Verfahren so anzupassen, dass sie den vorliegenden Anforderungen genügen.

Mit den Herausforderungen aus Batterietechnik und Karosserieentwicklung beschäftigt sich das Institut für Schweiß-

technik und Fügetechnik im Rahmen diverser Industrieprojekte und öffentlich geförderter Projekte. Durch die gute Vernetzung mit anderen Instituten, auch im Rahmen des eLab (Elektromobilitätslabor) und des AZL (Aachener Zentrum für integrativen Leichtbau) auf dem neuen RWTH-Campus, sind die Voraussetzung für eine kompetente Problemlösung aller fügetechnischen Fragen gegeben.



### Kontakt:

Dr.-Ing. Alexander Schiebahn  
Tel.: 0241 8097233  
E-Mail: schiebahn@isf.rwth-aachen.de

# Nasses Unterswasserschweißen AN HOCHFESTEN FEINKORNBAUSTÄHLEN

Klaus Lenz, Konrad Willms

## Förderhinweis:

Das IGF-Vorhaben Nr. 18.158N / DVS-Nr.: V4.010 „Mechanisch technologische Eigenschaften unterwassergeschweißter hoch- und höherfester Stähle“ der Forschungsvereinigung Schweißen und verwandte Verfahren e.V. des DVS, Aachener Str. 172, 40223 Düsseldorf, wurde über die AiF im Rahmen des Programms zur Förderung der industriellen Gemeinschaftsforschung (IGF) vom Bundesministerium für Wirtschaft und Energie aufgrund eines Beschlusses des Deutschen Bundestages gefördert. Ein besonderer Dank gilt neben dem Fördermittelgeber allen Mitgliedern im projektbegleitenden Ausschuss für die gute Zusammenarbeit sowie die fachliche und technische Unterstützung.



Abbildung 1: Nasses Unterswasserschweißen mit umhüllter Elektrode

Das Schweißen in nasser Umgebung erfolgt unter direktem Einfluss des Wassers auf den Lichtbogen, wobei das unmittelbar umgebende Wasser in Wasserstoff und Sauerstoff dissoziiert wird. Der Wasserstoff dringt während des Schweißprozesses in das Schweißgut und die Wärmeeinflusszone ein und der freiwerdende Sauerstoff führt zu einem stärkeren Abbrand einzelner Legierungselemente. Dies wirkt sich in mehrerer Hinsicht negativ auf die Schweißnahtqualität aus. Problematisch wird dies vor allem beim nassen Schweißen höherfester Feinkornbaustähle aufgrund von auftretenden wasserstoffinduzierten Kaltrissen, die zum Bauteilversagen führen können. Im Zuge eines IGF-Vorhabens mit dem Thema „Mechanisch technologische Eigenschaften unterwassergeschweißter hoch- und höherfester Stähle“ wurden dazu vom ISF systematische Untersuchungen mit Schweißtauchern in realer Umgebung zur Bestimmung des Werkstoffverhaltens hochfester Feinkornbaustähle beim nassen Unterswasserschweißen mit umhüllten Stabelektroden durchgeführt. Ferner wurde mit einer Laboranlage im ISF der Einsatz der induktiven Wärmebehandlung der Fügezone im Hinblick auf die Möglichkeit der Verbesserung der mechanisch-technologischen Eigenschaften untersucht.

## PROBLEMSTELLUNG

Anwendung findet das nasse Unterswasserschweißen mit umhüllten Elektroden, ausge-

führt von Schweißtauchern, zum Beispiel bei Reparatur- oder Montageschweißungen von Spundwänden.

Spundwände werden zeitlich begrenzt aber auch dauerhaft im Wasserbau für Kaimauern, Schleusenwände, Kanäle, Molen und Hafenbecken einge-



setzt, sind aber besonders für den Hochwasserschutz geeignet. Für höhere Beanspruchungen bei gleichzeitiger Beibehaltung des Handlinggewichtes oder Verringerung des Selbsten stehen heute auch Spundwände aus hochfesten Feinkornbaustählen (S430 GP, S460 GP) zur Verfügung. Für die verlässliche Ausführung von nassen Unterschwweißungen an hochfesten Feinkornbaustählen existieren zurzeit jedoch wenig Erfahrungen und Kenntnisse. Deshalb müssen grundlegende Prozessrandbedingungen für die praktische Ausführung von Schweißungen an diesen Werkstoffen, besonders in diesen extremen Umgebungsbedingungen, erarbeitet und entsprechende Verarbeitungsempfehlungen bereitgestellt werden.

### FORSCHUNGSERGEBNISSE

Für eine rechnerische Auslegung und bessere Planung von Montage- und Reparaturschweißungen, wurden im Rahmen der Untersuchungen mit den Schweißtauchern für die hochfesten Feinkornbaustähle die mechanisch-technologische Kennwerte für nass geschweißte Verbindungen ermittelt. Außerdem wurden die

Vorgänge des Wasserstofftransports beim nassen Unterschwweißen hochfester Stähle und seine Wirkungsweise bei der Kaltrissbildung näher untersucht. Die Ergebnisse zeigen dass insbesondere Wurzelrisse und Wurzelunternahtisse unter 45° und Anhäufungen von Unter-nahtissen an Stellen, an denen sich die Grobkornzonen der WEZ der einzelnen Schweißnähte überlagern, auftreten können (**Abbildung 2**). Die Rissausbreitung wird zum Teil durch duktilere Bereiche der teilweise angelassenen Gefügebereiche gehemmt.

Hervorgerufen werden diese Risse durch die erhöhte Wasserstoffversprödung in der Schweißstelle, die durch eindiffundierenden Wasserstoff erfolgt und begünstigt wird durch die beschleunigte Abkühlung unter Wasser, was eine Aufhärtung und Reduktion der Zähigkeit des Gefüges zur Folge hat. Eine starke Bauteilverspannung führt dann zu wasserstoffinduzierter Rissbildung.

Neben der Temper-Bead-Technik bietet die am ISF untersuchte Wärmebehandlung durch Induktion eine vielversprechende Methode zur Reduzierung

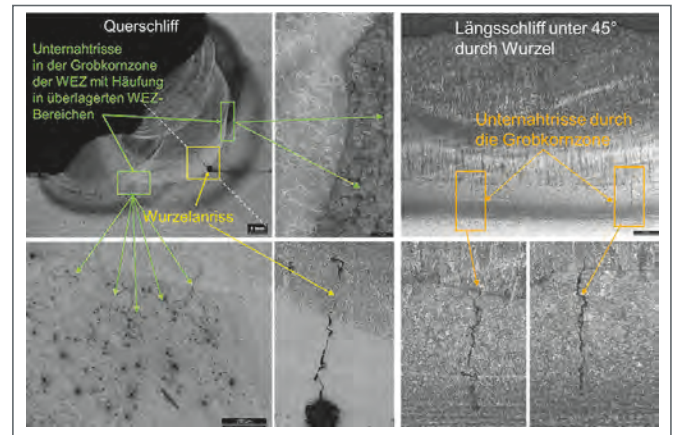


Abbildung 2: Wurzelrisse und Unter-nahtisse im Bereich der Schweißnaht

der wasserstoffinduzierten Rissbildung (**Abbildung 3**). So kann durch den Einsatz dieser Methode durch Nachwärmung ein Anlasseffekt sowie eine Wasserstoffeffusion erzielt werden. Theoretisch lässt sich durch Vorwärmung auch die t8/5-Zeit der Schweißnahtabkühlung verlängern. Die Untersuchungsergebnisse zeigen, dass mit Hilfe der induktiven Schweißnahtnachwärmung positive Gefügebeeinflussungen erzielt werden konnten. So führten Anlasseffekte zu einer Reduktion der Härtepeaks im Bereich der Grobkornzone der WEZ. Ferner konnte nachgewiesen werden, dass durch Effusion eine Reduktion des diffusiblen Wasserstoffgehalts erzielt werden konnte.

Zur Wärmebehandlung wurde ein Induktor in Twist-Return-Bauform mit Magnetfeldkonzentrator eingesetzt, der an die Nahtgeometrie angepasst wurde. Die Ausführung der Untersuchungen erfolgte an Auftragnähten auf ebenen Platten.

In zukünftigen Untersuchungen soll die induktive Wärmebehandlung für den Einsatz an praxisorientierten Schweißverbindungen (Kehl- und Über-

lappnähte) für Montage- und Reparaturarbeiten unter Wasser qualifiziert werden. Eine gezielte Wärmeeinbringung im Bereich der Wurzellage und eine gleichmäßige Erwärmung der kompletten Schweißnahtlänge soll eine angestrebte Reduktion des Gehalts an diffusiblem Wasserstoff im Nahtbereich sicherstellen. Ein geometrisch an die Nahtform angepasster Induktor soll eine Erwärmung der kompletten Nahtlänge ermöglichen und in Kombination mit einer geeigneten Induktionsquellenregelung eine gesteuerte, Abkühlung nach der Wärmebehandlung ermöglichen. Dadurch soll eine gezielte Gefügewandlung und darüber hinaus eine Verbesserung bezüglich der Rissbildung erfolgen.

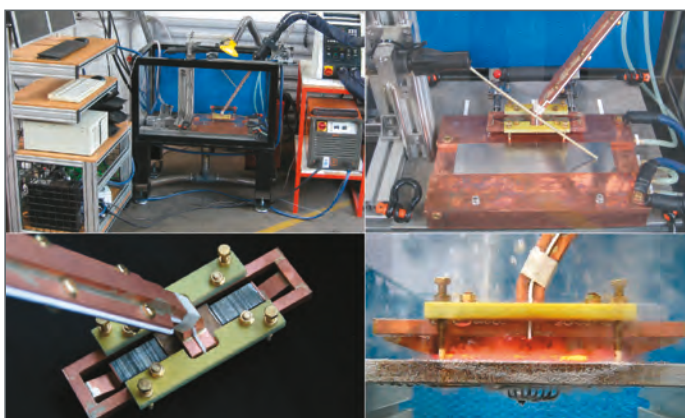


Abbildung 3: Laboranlage zum mechanisierten nassen Unterschwweißen mit umhüllten Elektroden und zur induktiven Unterwasserwärmebehandlung

**Kontakt:**  
 Rahul Sharma, M.Sc.  
 Tel.: 0241 80-96267  
 E-Mail: sharma@isf.rwth-aachen.de

# FÜGEN VON TITANALUMINIDEN MIT DEM ELEKTRONENSTRAHL

Simon Olschok

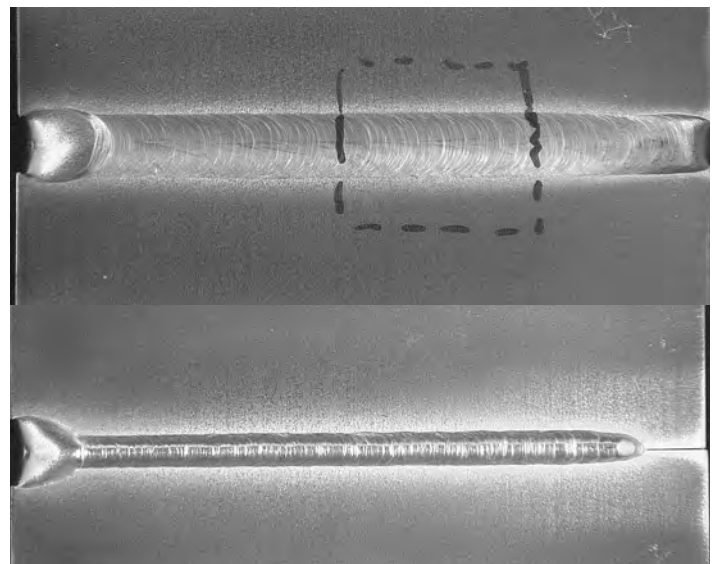


Abbildung 1: Elektronenstrahlschweißung der Legierung „TNB-V5“, 5 mm Blechdicke, 700°C Vorwärmung,  $v = 2 \text{ mm/s}$ ,  $P = 550 \text{ W}$

Die herausragenden Eigenschaften des Elektronenstrahls sind seine hohe Energiedichte bei hoher Präzision und seine hohe Reproduzierbarkeit. Durch das verfahrenstypische Arbeiten im Vakuum lassen sich Werkstoffe mit hoher Affinität zu Sauerstoff wie Titan oder Titanaluminid bearbeiten. Dieser Artikel zeigt Ergebnisse zum Schweißen und Löten des intermetallischen Werkstoffs Titanaluminid, welcher insbesondere bei hochtemperaturbelasteten, hochdynamisch beanspruchten Bauteilen wie Turboladern oder Turbinenschaufeln zum Einsatz kommen wird.

## EINLEITUNG

Intermetallische Titanaluminid-Legierungen sind auf dem Weg, in einigen Anwendungen die etwa doppelt so schweren Nickelbasislegierungen zu verdrängen. Die vielversprechendsten Einsatzgebiete sind Turbinenschaufeln in Flugzeugtriebwerken und Abgasturboladern für den Fahr-

zeugbau. Dies liegt vor allem an den attraktiven mechanischen Eigenschaften des Werkstoffs. Besonders vorteilhaft sind der hohe Schmelzpunkt, die geringe Dichte, der hohe spezifische Elastizitätsmodul sowie gutes Kriech- und Oxidationsverhalten im Temperaturbereich von 600 bis 750 °C.

Demgegenüber fordert der Werkstoff durch sein sprödes Verhalten bei Raumtemperatur sehr hohe Anforderungen an die Fertigungstechnik. Neben dem Gießen, dem Schmieden und der spanenden Bearbeitung ist insbesondere die Fügetechnik des Werkstoffs unzureichend erforscht. Schweißungen sind häufig rissbehaftet und besitzen eine inhom-

gene Mikrostruktur. Das Fügen mit anderen Metallen erfolgt mittels Ofenlötens, was bisher nicht zu zufriedenstellender Festigkeit führt.

### VERSUCHSAUFBAU

Zum Schweißen und Lötens werden am ISF vier Hochvakuum-Elektronenstrahlschweißmaschinen mit einer Beschleunigungsspannung von 60 bis 170 kV genutzt.

Untersuchungen an Elektronenstrahl geschweißten und gelöteten Titanaluminid werden mit der Legierung „TNB V5“ (Ti-45.5Al-5.5Nb-0.2C-0.2B) durchgeführt. Der hohe Niobgehalt dieser Legierung von 5–8% wirkt sich positiv auf die Festigkeit und Kriechbeständigkeit sowie die Oxidationsbeständigkeit aus.

Die Schweißungen erfolgen in 3 und 5 mm dicken Blechen oder Hohlwellen stumpf im I-Stoß. Zusatzmaterial wird nicht verwendet. Als Probengeometrie werden gleichermaßen Bleche als auch Rundproben genutzt.

Die Vorwärmung des Materials erfolgt mit dem defokussierten Elektronenstrahl. Dazu erwärmt der sehr schnell über das Werkstück bewegte Elektronenstrahl die Probe homogen auf 500–700°C, bevor die Schweißung beginnt.

Lötungen im Stumpfstoß und im Überlappstoß werden auch mit dem Elektronenstrahl gefügt. Aufgrund der Einsatztemperaturen des Werkstoffs werden Hartlote eingesetzt, die einen Schmelzpunkt von ca. 1000°C besitzen. Bei diesen Löttemperaturen bietet sich der Elektronenstrahl an,

da er sehr gezielt den Fügebereich erwärmt und die restlichen Werkstückbereiche frei von hohem Temperatureinfluss bleiben. Außerdem arbeitet das Verfahren im Vakuum, wodurch Oxidation von Werkstück und Lot während des Lötens vermieden wird. Im Vergleich zum Ofenlötens ist die Prozesszeit des Lötens mit ca. einer Minute deutlich kürzer.

Als Lotwerkstoff wird Ni102 (Ni-7Cr-4,5Si-3,1B-3Fe) verwendet. In diesem Fall erwärmt der Elektronenstrahl defokussiert das Werkstück und das Lot bis zur Schmelztemperatur nur indirekt erwärmt.

### ELEKTRONENSTRAHL-SCHWEISSEN VON TITANALUMINID

Sämtliche Schweißnähte sind frei von Randkerben, Poren und anderen Fehlern. 5 mm dicke Schweißnähte besitzen eine feine und gleichmäßige Schuppung, **Abbildung 1**.

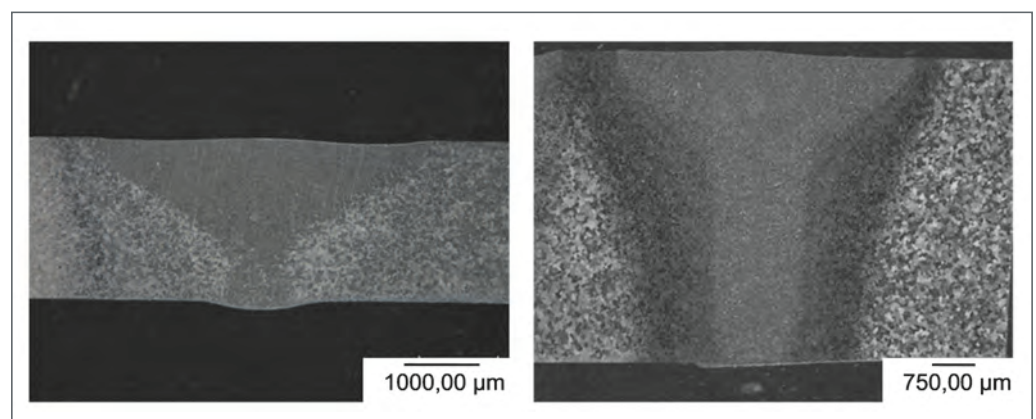
Die Schweißnaht ist schlank und hat eine schmale Wärmeinflusszone, **Abbildung 2**. Höhere Schweißgeschwindigkeiten verstärken diesen Effekt. Hohe Schweißgeschwindig-

keiten mit geringer Streckenergie unterstützen allerdings die Gefahr der Rissbildung des spröden Materials. Aus diesem Grund hat die Wahl der Schweißgeschwindigkeit eine erhebliche Bedeutung und besteht aus einem geeigneten Kompromiss zwischen einer schlanken Schweißnaht und der Gefahr der Rissbildung.

Zur Vermeidung von Endkraterissen und zur Endkraterglättung haben sich Auslaufbleche oder die Wahl eines langen Slopebereichs (Intensität durch Strahlstrom und Fokus reduzieren) als praktikable Lösungen erwiesen.

Das beim Elektronenstrahlschweißen verbreitete Strahlpendeln wurde zum Schweißen von Titanaluminiden erprobt. Verschiedene Kombinationen von kreisförmigen und elliptischen Pendelfiguren (von 0 bis 1 mm Durchmesser) und -frequenzen (500–1000 Hz) wurden untersucht. Diese Versuche zeichnen sich im Vergleich zu Proben ohne Strahlpendelung durch sehr unregelmäßige Nähte mit teilweise erheblichen Randkerben, Schweißspritzern, Quer- und Endkraterissen aus. Röntgenaufnahmen und Schlitze dieser Proben offenba-

Abbildung 2: Querschliff einer Elektronenstrahlschweißung der Legierung „TNB-V5“, 5 mm Blechdicke, 500°C Vorwärmung,  $v = 7 \text{ mm/s}$ ,  $P = 696 \text{ W}$



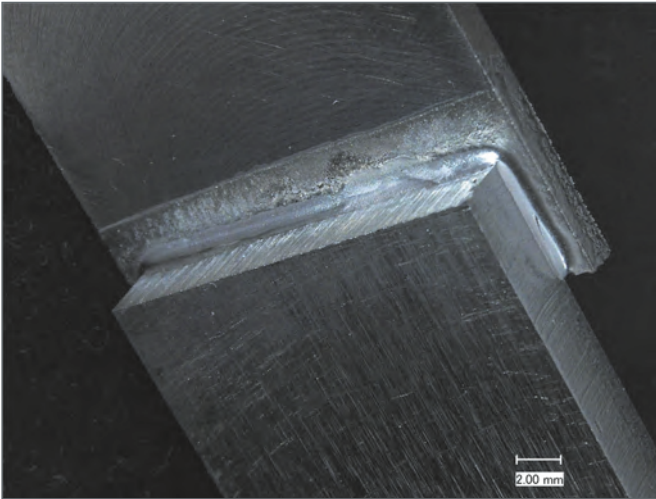


Abbildung 3:  
Hartlötung im Überlapstoß von Titanaluminid mit dem Elektronenstrahl unter Einsatz des Lots Ni102

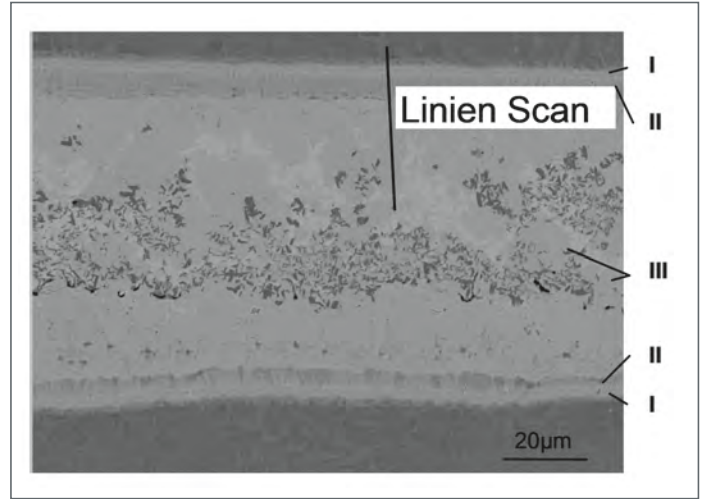


Abbildung 4:  
Querschnitt einer Lötung des Titanaluminid „TNB-V5“ (oberer und unterer dunkler Bildbereich) mit dem Lot Ni102 aufgenommen mit einem Rasterelektronenmikroskop; rechts sind drei Lotwerkstoffbereiche markiert

ren Porenbildung besonders an der Nahtunterseite durchgeschweißter Proben. Ursache für dieses Phänomen könnte in der Ausgasung von Aluminium liegen.

### ELEKTRONENSTRAHLLÖTEN VON TITANALUMINID

Das Elektronenstrahllöten ermöglicht das prozesssichere Fügen von Titanaluminiden, **Abbildung 3**.

In der Analyse der Lötungen von Titanaluminid an Titanaluminid mit dem Lot Ni102 sind typische löttechnische Werkstoffbereiche zu beobachten. Dies sind die Übergangszone bzw. Diffusionszone des Grundwerkstoffes (Zone I), Übergangszone vom Lötgut (Zone II) und Lötgutzone (Zone III), **Abbildung 4**.

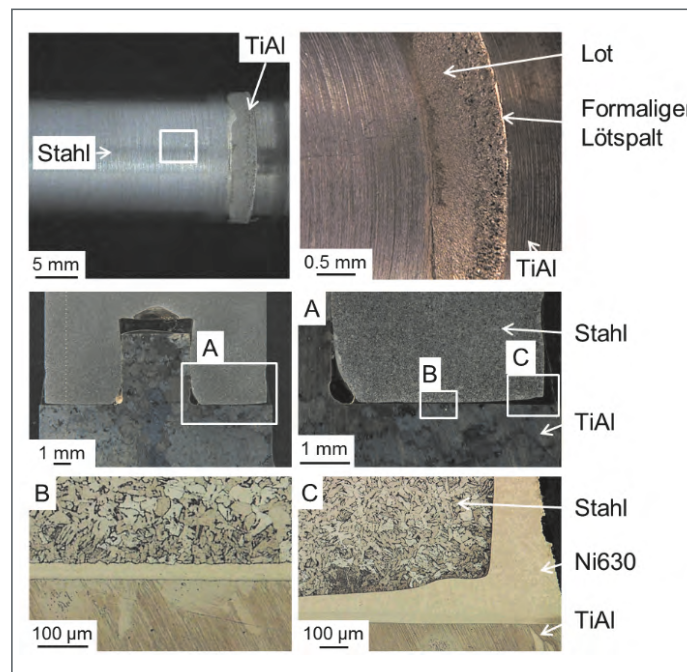


Abbildung 6:  
Löten von Titanaluminid an Stahl an einer Wellenverbindung (TiAl – Ni630 – 42CrMo4)

In der Lötgutzone (Zone II) existieren drei charakteristische Phasen. Dies sind zwei Nickel basierte Mischkristalle mit hohem Aluminiumanteil beziehungsweise hohem Titananteil und ein Nickelbasis Mischkristall mit erhöhtem Chromgehalt.

Eine EDX-Linien-Aufnahme des in **Abbildung 5** markierten Linien Scans zeigt die Diffusionszone des Grundwerkstoffes und die Übergangszone des Lötguts, **Abbildung 5**. Diffusion von Titan und Aluminium vom Grundwerkstoff in die Lötnaht ist vorhanden. Entgegengesetzt diffundiert Nickel aus dem Lot

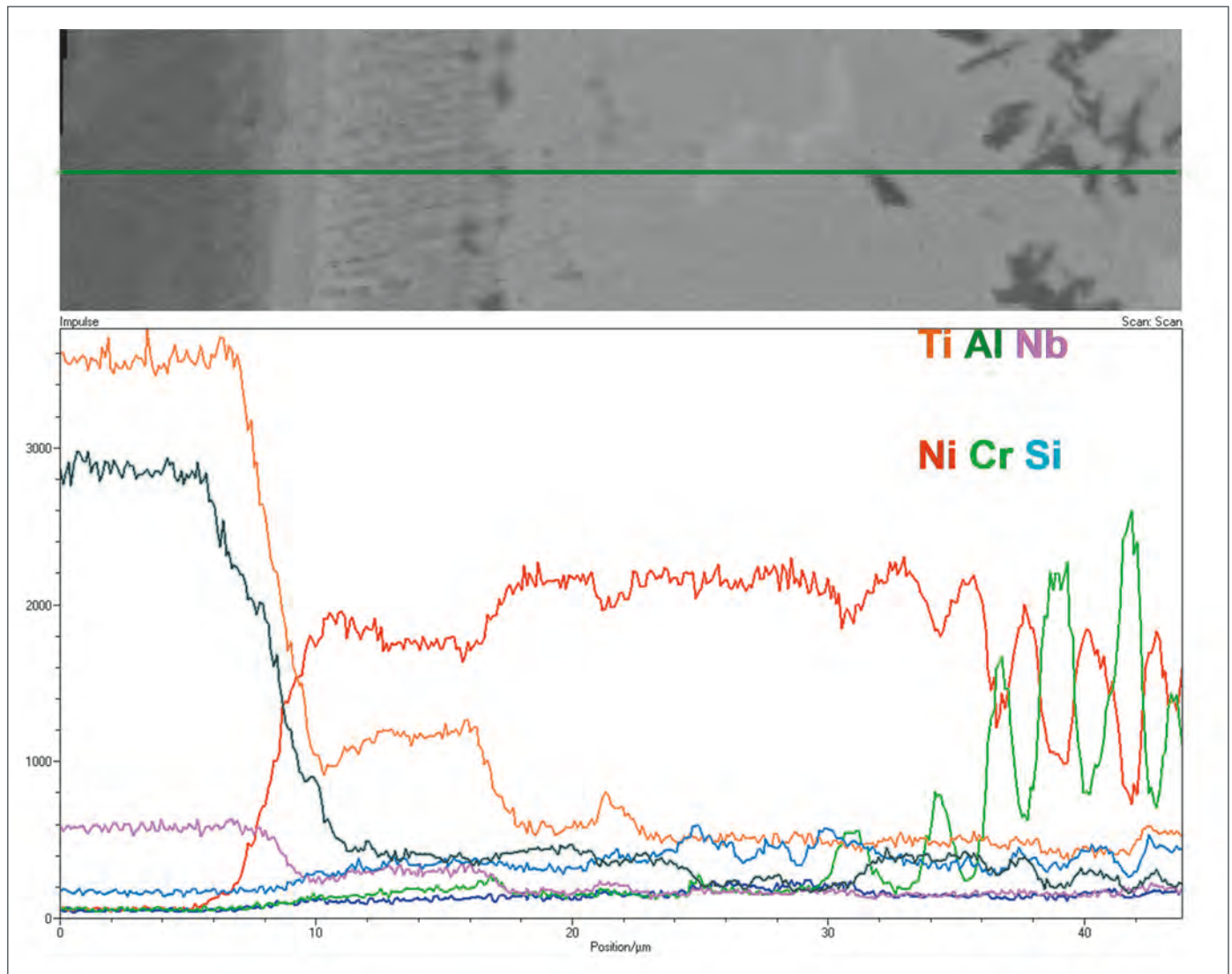


Abbildung 5:  
EDX-Linien-Analyse einer Lötung von Titanaluminid (im Bild links) und dem Lot Ni102 im Übergangsbereich von Grundwerkstoff zum Lot

in den Grundwerkstoff. Durch diese Diffusion in zwei Richtungen entsteht eine feste Fügeverbindung.

Des Weiteren wurde untersucht, ob sich Titanaluminid an Stahl lötend lässt. Insbesondere für den Turboladerbau ist diese Fügeverbindung von großem Interesse. Mithilfe des Elektronenstrahls und einem geeigneten Temperaturregime lässt sich diese Materialkombination mit sehr guten Festigkeiten herstellen, **Abbildung 6**.

### AUSBLICK

Der Werkstoff Titanaluminid besitzt sehr großes Potenzial, um insbesondere bei hochtemperaturbeanspruchten und bewegten Bauteilen aufgrund seiner geringen Dichte im Vergleich zu Nickelbasislegierungen den Wirkungsgrade von dynamischen Verbrennungsaggregaten zu erhöhen. Jedoch werden sehr hohe Anforderungen an die Fügetechnik gestellt. Aufgrund der hohen Affinität von Titan zu

Sauerstoff bietet sich eine Materialbearbeitung im Hochvakuum, wie sie mit dem Elektronenstrahlschweißen bzw. -löten durchgeführt werden muss, an.

Die hier dargestellten Untersuchungen zeigen, dass bei angepasster Prozessführung ein fehlerfreies Schweißen und Löten dieses High-Tec-Werkstoffes möglich ist.

#### Kontakt:

Dr.-Ing. Simon Olschok  
Tel.: 0241 8096253  
E-Mail: olschok@  
isf.rwth-aachen.de

# Die Aachener Arbeitsplatzsimulationsanlage – STUDIEN ZUR WIRKUNG VON GEFAHRSTOFFEN AM ARBEITSPLATZ

Dr. Peter Brand



Abbildung 1: Kontrollraum und Expositionsraum der Aachener Arbeitsplatzsimulationsanlage während einer Expositionsstudie.

Die interdisziplinäre Forschung an der RWTH in Aachen hat mit der Aachener Arbeitsplatz-Simulationsanlage ein neues Feld gefunden. In Kooperation des Instituts für Schweiß- und Füge-technik der Fakultät Maschinenbau und des Instituts für Arbeitsmedizin und Sozialmedizin der medizinischen Fakultät wurde diese Anlage entwickelt und wird nun gemeinsam für Studien genutzt, bei denen die Wirkung von Arbeitsplatz-Gefahrstoffen untersucht werden soll.

Von einer ganzen Reihe von Arbeitsplatz-Gefahrstoffen, darunter auch Schweißrauch, wird angenommen, dass sie langfristig Schädigungen der Lunge verursachen, die darauf zurückzuführen sind, dass die Exposition gegenüber dem Schadstoff über einen langen Zeitraum einen chronischen Entzündungsprozess in der Lunge verursacht. Derartige

Prozesse lassen sich im realen Arbeitsumfeld nur sehr schwer studieren, da hier zumeist eine Mischung verschiedener Gefahrstoffe vorliegt und deshalb die exakten Expositionsbedingungen (individuelle Dauer und Intensität) nur schwer zu ermitteln sind.

Mit der „Aachener Arbeitsplatzsimulationsanlage“ (Abb. 1)

soll es ermöglicht werden, verschiedene Arbeitsplatznoxen isoliert und unter standardisierten Bedingungen im Hinblick auf ihre Wirkung auf den Menschen zu untersuchen. Damit werden arbeitsmedizinische Studien möglich, bei denen die Expositionsbedingungen exakt vorgegeben werden können. Prinzipiell kann diese Anlage zum Studium vie-

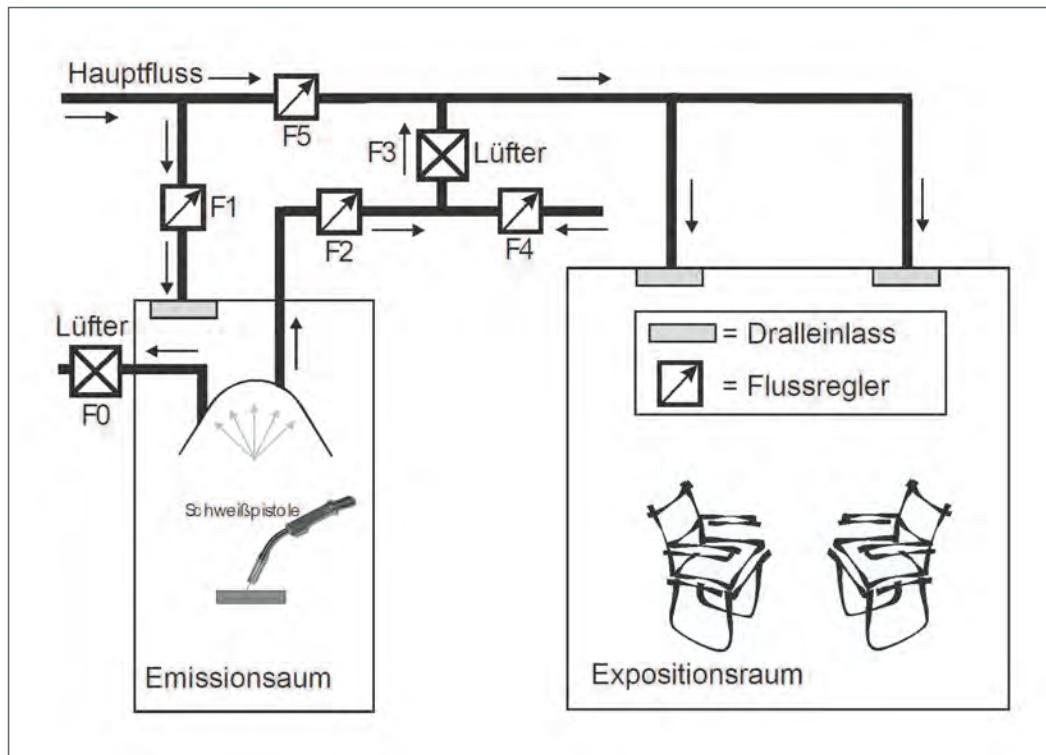


Abbildung 2:  
Schema der Lüftungsanlage des  
Expositionslabors.

ler verschiedener gas- oder partikelförmiger Gefahrstoffe herangezogen werden, zunächst soll jedoch der Schwerpunkt der Studien bei Schweiß- und Lötgeräuschen liegen.

Die „Aachener Arbeitsplatzsimulationsanlage“ besteht aus zwei getrennten Bereichen (Abb. 2). Erstens dem Emissionsbereich, in dem Arbeitsplatznoxe kontrolliert erzeugt werden. Dazu dienen automatisierte und kontrollierte Arbeitsprozesse. Der zweite Bereich ist der Expositionsraum, in dem sich die Probanden aufhalten. Dieser Bereich ist ca. 16 m<sup>2</sup> und bietet Platz für bis zu 6 Personen.

Beide Bereiche sind über eine regelbare Lüftungsanlage miteinander verbunden, so dass die Konzentration des interessierenden Schadstoffs schnell und flexibel eingestellt und geregelt werden kann (Abb. 3).

Umfangreiche Messtechnik dient dazu, den untersuchten Schadstoff möglichst vollständig zu charakterisieren und zu überwachen. Dabei werden sowohl aerosolförmige als auch gasförmige Komponenten berücksichtigt. Besonderes Augenmerk wird dabei auf die Charakterisierung ultrafeiner Aerosolpartikel gelenkt, da diese nicht nur im Verdacht stehen chronische Lungenerkrankungen hervorzurufen, sondern auch eine negative Wirkung auf das Herz Kreislauf-System zu haben. Unter anderem kann die Massenkonzentration, die Anzahlkonzentration und die Oberflächenkonzentration des Aerosols mit hoher Zeitaufösung gemessen werden und es können die Konzentrationen vieler Schadgase wie Ozon, NO und CO online überwacht werden.

Bei den Studien wird die Wirkung von Schweiß- und Lötgeräuschen auf exponierte Personen untersucht (Abb. 4). Dabei werden Fragen beantwortet, die im normalen Arbeitsumfeld nicht geklärt werden können. So wird die Beziehung zwischen der im Expositionslabor standardisiert vorgegebenen äußeren Ex-

position und die Oberflächenkonzentration des Aerosols mit hoher Zeitaufösung gemessen werden und es können die Konzentrationen vieler Schadgase wie Ozon, NO und CO online überwacht werden.

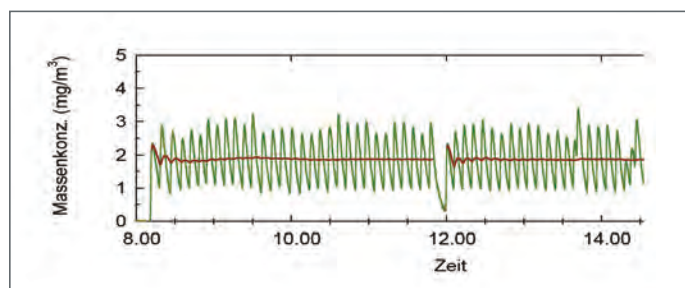


Abbildung 3:  
Durch Regelung der Lüftungs- und  
Schweißparameter kann über die Länge  
einer ganzen Schicht eine kontrollierte  
Schweißrauchexposition erzielt werden.

position und der inneren Exposition des Menschen untersucht. Dazu werden Methoden des Biomonitoring eingesetzt, die es später einmal erlauben sollen, den umgekehrten Schritt zu gehen: Von einer inneren Exposition (Chrom, Nickel etc. in Blut und Urin) auf die äußere Exposition und die Einhaltung von Arbeitsplatzgrenzwerten zu schließen.

Außerdem wird die biologische Wirkung der Expositionen untersucht, um auf frühe Entzündungsreaktionen in der Lunge zu schließen. Dazu werden Entzündungsmarker im Blut, im Nasensekret und im Sputum nachgewiesen. So wird das Potential des Rauches quantifiziert, langfristig einen Schaden in der Lunge anzurichten.

Schließlich wird untersucht, ob die relativ kurzzeitige Exposition mit Arbeitsplatz-Gefahrstoffen bereits zu einer vorübergehenden Beeinträchtigung der Lungenfunktion, wie einer Verengung von Atemwegen,

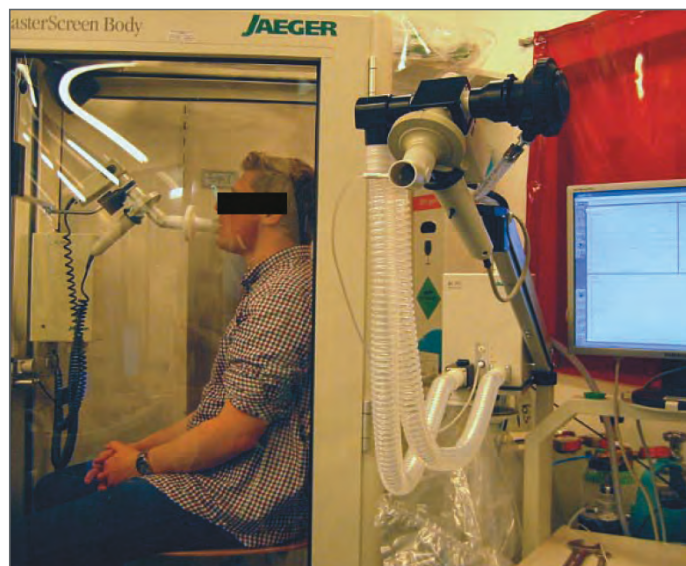


Abbildung 4:  
Umfangreiche medizinische Untersuchungen sollen die biologische Wirkung der Schweißrauche dokumentieren.

führt. Dazu steht umfangreiches Instrumentarium moderner Verfahren der Lungenfunktionsanalytik zur Verfügung.

Diese Studien haben letztlich das Ziel, die Entstehung von Erkrankungen durch Exposition gegenüber Arbeitsplatz-

Gefahrstoffen besser zu verstehen und damit ihre Entstehung zu verhindern. Die gewonnenen Daten liefern aber auch neue Erkenntnisse, die für die Aufstellung von Grenzwerten in der Luft und im biologischen Material verwendet werden können.

**Kontakt:**

Dr. phil. nat. Peter Brand  
Tel.: 0241 8088059  
E-Mail: Pbrand@ukaachen.de



# LAGERUNGSBEDINGUNGEN VON ALUMINIUM-DRAHTELEKTRODEN FÜR DAS MSG-SCHWEISSEN

Rahul Sharma



Abbildung 1:  
Schweißvorrichtung zum mechanisierten Schweißen Überkopf-Position

Die Verarbeitbarkeit von Aluminiumdrahtelektroden für das MSG-Schweißen wird von Herstellern nur innerhalb eines kurzen Zeitraumes gewährleistet. Neben einer zeitabhängigen Änderung des Förderverhaltens wird von einer Zunahme der Porenbildung über die Lagerdauer berichtet. Im Rahmen eines Forschungsprojektes sollte der Einfluss der Lagerbedingungen von Aluminiumdrahtelektroden auf die Drahtoberfläche, das Schweißverhalten, sowie das Schweißergebnis untersucht werden.

## 1. EINLEITUNG

Die schweißtechnische Verarbeitung von Aluminium mit

Lichtbogenschweißprozessen ist grundsätzlich mit der Gefahr von Porenbildung verbunden [1]. Eine wesentliche Quelle

hierfür stellt Grundwerkstoff gelöster Wasserstoff dar, der durch den Herstellprozess im Material angereichert wird.

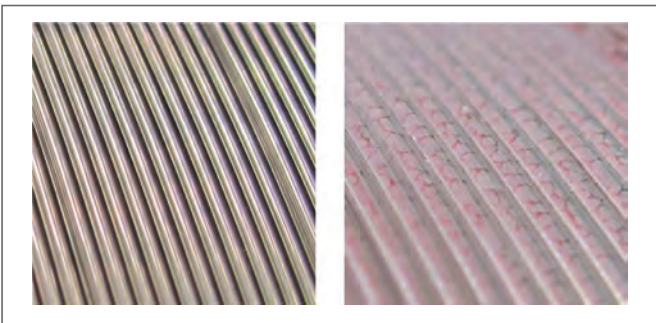


Abbildung 2:  
Oberfläche eines neuen Drahtes (links) und eines kondensierten Drahtes (rechts)

Auch die Aluminium-Drahtelektroden kommen als Wasserstoffquelle in Frage, [2]. Hier ist die Einlagerung von Wasserstoff in die Oxidschicht an der Drahtoberfläche mit zunehmender Lagerdauer als wesentlicher Faktor zu nennen [3, 4].

Für die Einbringung von Wasserstoff in das Schmelzbad beim MSG-Schweißen ist auf das Auftreten von Schweißprozessstörungen verantwortlich. Deshalb spielen die Gleiteigenschaften innerhalb des Drahtvorschubsystems eine wesentliche Rolle. Eine zeitabhängige Veränderung der Förderfähigkeit kann sich signifikant auf die Porenbildung auswirken.

## 2. VORGEHENSWEISE

Zur Untersuchung der Auswirkungen der Lagerbedingun-

gen wurden Schweißzusätze in Drahtform aus den Aluminiumlegierungen AlSi5 (S Al 4043A) und AlMg4,5Mn (S Al 5183A) unter kontrollierten Klimabedingungen über einen langen Zeitraum gelagert.

Anschließend erfolgte eine Entnahme von Proben aus den äußeren Wicklungen der auf unverpackten Korbspulen gelagerten Drähte. Diese wurden einer Rückstandsanalyse, Reibwertmessung und Sprungmaßbestimmung unterzogen. Desweiteren erfolgte eine Bestimmung des Gesamtwasserstoffgehaltes durch Schmelzextraktion sowie das Schweißen einer Auftragraupe zur Bewertung von Prozessverhalten und Schweißergebnis. Die Schweißungen erfolgten jeweils in Position PG, um gezielt entstehende Poren im Schweißgut einfangen zu können.

## 3. ERGEBNIS

Nach einem Jahr Lagerung in tropischem Konstant-Klima, sowie nach fast zwei Jahren Lagerung in Werkstattklima, lässt sich beim Verschweißen der Drähte keine makroskopisch sichtbare Porenmenge im Schweißgut erkennen. Bei gleichzeitiger Ausschaltung weiterer Wasserstoffquellen und einer einwandfreien Drahtförderung bei der Verarbeitung folgt demnach, dass die Menge des in der Deckschicht der Drähte eingelagerten Wasserstoffs nicht zur metallurgischen Porenbildung im Schweißgut ausreicht.

Der Wasserstoffgehalt auf den Drahtoberflächen scheint bei langer Lagerung ohne Kondensation einem Endwert entgegenzustreben, sofern die

Lagerungsbedingungen (Temperatur und Feuchte) keiner starken Schwankung unterliegen.

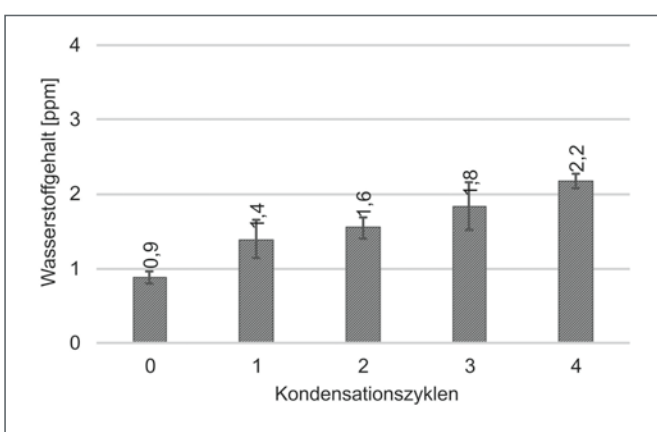
Liegen hingegen klimatische Bedingungen vor, bei denen Kondensation von Wasser auf der Drahtoberfläche stattfinden kann, so führt dies zu einem merklichen Anstieg des Wasserstoffgehaltes im Draht mit jedem Kondensationszyklus (**Abbildung 3**)

Das aus der Praxis berichtete Problem der Lagerung und Verarbeitung von Aluminium in tropischem Klima wird zu einem geringeren Anteil durch Temperatur und Luftfeuchte der Umgebung hervorgerufen, als durch einen konstanten Einfluss auf die Oberflächen der Aluminiumbauteile. Viel mehr ist zu berücksichtigen, dass bei hoher relativer Luftfeuchte viel leichter eine Kondensation von Wasser an der Oberfläche des Drahtes auftreten kann. Kondensation gilt es demnach während der gesamten Fertigungskette von Aluminiumbauteilen und Schweißzusätzen zu vermeiden.

Um Kondensation der Drahtoberflächen während des Transports vom Hersteller zum Verarbeiter mit noch höherer Sicherheit auszuschließen, sind bereits Verpackungen auf dem Markt verfügbar, die gegenüber herkömmlichen Verpackungen mit PE-Folien eine gesteigerte Resistenz gegenüber Wasserstoffdiffusion aufweisen.

Drähte, die nicht mehr von ihrer herstellerseitig verpackten Tasche umgeben sind, bzw. in geöffneter oder beschädigter Tasche gelagert werden, sind bei weiterem

Abbildung 3:  
Wasserstoffgehalt in Abhängigkeit von der Kondensationszyklenanzahl



Transport, z.B. auch innerhalb von Räumlichkeiten beim Verarbeiter, besonders anfällig gegenüber Kondensation. Sofern das Kondensat auf der (unbeobachteten) Drahtoberfläche trocknet, ist eine Kondensation zu einem späteren Zeitpunkt eventuell nicht mehr erkennbar. Jedoch kann es trotzdem zu Porenbildung im Schweißgut kommen.

Eine Haltbarkeitsaussage zu Drahtzusatzwerkstoffen aus Aluminium ist insofern möglich, als dass sich auf den Oberflächen nicht genug Wasserstoff anlagern kann, um Poren im Schweißgut zu bilden, sofern die Drähte keiner Kondensation ausgesetzt sind oder waren. In der Praxis ist

dies jedoch nicht immer zu gewährleisten oder lückenlos nachvollziehbar. Somit ist es verständlich, dass mit steigender Lagerdauer der Drähte auch die Wahrscheinlichkeit des Auftretens von Kondensation steigt.

#### Literatur

- [1] Baum, L. u. V. Fichter: MIG-, MAG-Schweißen. Die schweisstechnische Praxis, Bd. 12, 2. Auflage, S. 131. DVS-Verlag, Düsseldorf 1986
- [2] Reisgen, U. u. L. Stein: Grundlagen der Fügetechnik – Schweißen, Löten und Kleben. S. 275, Fachbuchreihe Schweißtechnik, DVS-Media GmbH, Düsseldorf 2016
- [3] Hunter, M.S. u. P. Fowle: Natural and Thermally Formed Oxide Films

on Aluminium. Journal of the electrochemical society, 103 (1956) S. 482–486

- [4] Domony, A. u. E. Lichtenberger-Bajza: Untersuchung des Bildungsmechanismus und der Eigenschaften der durch verschiedene äußere Energieverhältnisse auf Aluminiumoberflächen entstehenden Schutzschichten. Metalloberfläche 15 (1961) S. 134/139

#### Kontakt:

Rahul Sharma  
Tel.: 0241 80-96267  
E-Mail: sharma@  
isf.rwth-aachen.de



Durch **Werbung**  
immer einen Zug voraus!

**ALPHA**

Informationsgesellschaft mbH ■ Finkenstraße 10 ■ 68623 Lambertheim  
Tel.: 06206 939 220 ■ Fax: 06206 939 232 ■ E-Mail: info@alphapublic.de ■ www.alphapublic.de

# Erhöhung der Zähigkeit beim EB-Schweißen: EIN WICHTIGER SCHRITT FÜR DAS SCHWEISSEN VON GRÜNDUNGSSTRUKTUREN FÜR WINDENERGIEANLAGEN

Simon Olschok

Blechdicke 150 mm	EB	SA
Schweißlagen	1	80
Schweißzeit [min/ meter]	8,3	45
Zusatzwerkstoff [kg/ meter ]	0	35

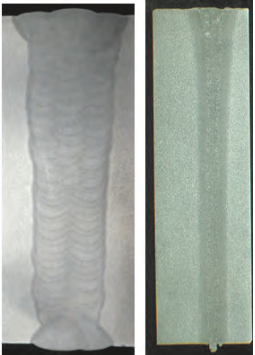


Abbildung 1: Verbindungsschweißung EB/UP

Zum Aufbau einer nachhaltigen Energieversorgung sollen nach dem Ziel der Bundesregierung bis zum Jahr 2030 Offshore-Windenergieanlagen (WEA) mit einer kumulierten Leistung von über 30.000 MW geschaffen werden. Die Gründungs- und Tragwerke der Offshore-WEA sind großen statischen und dynamischen Belastungen ausgesetzt und werden deshalb sehr dickwandig ausgeführt. Heute kommt beim Verschweißen der Rohre für die Gründungsstrukturen im Wesentlichen das UP-Mehrdrahtschweißen zum Einsatz. Dem Vorteil der Prozesssicherheit dieses Schweißverfahrens stehen die Nachteile des hohen Energieeintrages, thermischen Verzuges und die Erfordernis von aufwendigen Kantenvorbereitungen sowie Zusatzdraht gegenüber. Als wirtschaftliche Fertigungsalternative bietet sich das Elektronenstrahlschweißverfahren (EBW) an.

## EINLEITUNG UND ZIELE

In ersten Untersuchungen wurden EB-Schweißversuche an bis zu 100 mm dicken Blechen durchgeführt. Obwohl die benötigte äußere Beschaffenheit und die Fehlerfreiheit eingestellt werden konnten, zeigten die inneren Eigenschaften hinsichtlich der Zähigkeit, dass die Anforderungen der Klassifikationsgesellschaften nicht erfüllt wurden. Um das zweifellos vorhandene Potenzial der EB-Schweißtechnik nutzbar zu machen, ist es daher notwendig, ingenieurwissenschaftliche Anwendungsstudien durchzuführen, um

- das Elektronenstrahlverfahren in Hinblick auf die Erzielung verbesserter innerer und äußerer Eigenschaften zu ertüchtigen und
- ein Sicherheitskonzept auf Basis moderner werkstoffmechanischer Methoden zu entwickeln, welches die tatsächlichen Anforderungen bzgl. Bauteilsicherheit erfasst und in angepasste und praktische Anforderungen für die EB-Schweißtechnologie umsetzt.

## ELEKTRONENSTRAHL-SCHWEISSEN IM DICKBLECHBEREICH

Die Elektronenstrahltechnik nutzt die physikalischen Vorgänge bei der Umsetzung kinetischer Energie in Wärme beim Auftreffen eines gebündelten Strahles hochbeschleunigter Elektronen auf feste Materie im Vakuum. Beim Aufprall der gebündelten Elektronen auf die Werkstückoberfläche werden die Elektronen stark abgebremst, wobei ein großer Teil der kinetischen

Energie in Wärme umgesetzt wird und das Metall lokal verdampft. Die Vorteile liegen in der sehr hohen Leistungsdichte im fokussierten Elektronenstrahl und der damit verbundenen geringen Werkstückwärmung durch die insgesamt geringe Streckenenergie sowie den vergleichsweise hohen erreichbaren Schweißgeschwindigkeiten bei großen Einschweißstiefen. Beim Elektronenstrahlschweißen im Vakuum ermöglichen neue und schnelle Strahlsteuerungen sowie Ablenggeneratoren, mit Parallelkapillartechnik sowie mit nahezu beliebigen Ablenkfiguren zu arbeiten. Bei der Parallelkapillartechnik springt der Elektronenstrahl hochfrequent zwischen unterschiedlichen Positionen in einem frei programmierten Muster, sodass mehrere Kapillaren aufgrund der thermischen Trägheit des Werkstoffs an unterschiedlichen Stellen gleichzeitig geöffnet sind und so die Beeinflussung des Gefüges an mehreren Stellen gleichzeitig erfolgt. Die Schweißnähte weisen ein hohes Aspektverhältnis von Nahttiefe zu Nahtbreite auf, der thermische Verzug ist im Vergleich zur UP-Mehrlagenschweißung sehr gering, **Abbildung 1**.

## NACHWEIS DER BAUTEILSICHERHEIT

In der Vergangenheit bis etwa in die 70er Jahre des letzten Jahrhunderts existierten im Bereich der unlegierten Baustähle nur zwei wesentliche Stahlsorten, die der Festigkeitsstufen S235 und S355. Für diese Stähle existierten traditionell als zu erreichende Kerbschlagarbeit von 27 J bei einer Mindesttemperatur von

bspw.  $-20^{\circ}\text{C}$  für S355 J2 +N formuliert wurden [i]. In der Folgezeit gab es allerdings eine tiefgreifende Veränderung im Bereich der Werkstofftechnik für unlegierte Baustähle, die unter anderem auf sekundärmetallurgischen Maßnahmen, der gezielten Mikrolegierung und dem thermomechanischen Walzen beruht [ii, iii, iv, v]. Mit der Einführung neuer hochfester Stähle stellte sich jedoch die Frage, ob die Sicherheitsanforderungen durch ein 27 J-Kriterium für die vorgesehene Einsatztemperatur erfüllt werden können. Als Zähigkeitsnachweis wurde aus diesem Grund der ebenfalls ab den 70er Jahren für Anwendungen in der Kerntechnik weiterentwickelte bruchmechanische Sicherheitsnachweis geführt. Aufgrund der Komplexität und des hohen Aufwandes des bruchmechanischen Nachweisverfahrens wurden in den 90er Jahren Methoden entwickelt, den Nachweis zu vereinfachen und für die Werkstoffauswahl zur Vermeidung von Sprödbruch nutzbar zu machen. Alle diese Nachweise haben gemeinsam, dass kein formaler Zähigkeitsnachweis mehr geführt wird, sondern die Bauteilsicherheit über die Vorschriften zur Werkstoffauswahl gewährleistet wird. Die Vorschriften zur Stahlgüteauswahl basieren auf einer der Verknüpfung des Failure Assessment Diagramm (FAD), mit dessen Hilfe die risstreibende Kraft ohne Finite-Elemente Berechnungen händisch berechnet werden kann, und dem Master Curve Konzept. Es verknüpft die bruchmechanische Übergangstemperaturkurve mit der Kerbschlagarbeitsübergangstemperaturkurve und ermöglicht so die Ermittlung der bruchmechanischen Zähigkeit ohne aufwendige Versuche.

Hinsichtlich der Auswirkung von großen Blechdicken finden sich in der Literatur nur wenige Untersuchungen. Häufig wird angenommen, dass die Sprödbruchgefahr mit zunehmender Blechdicke steigt, allerdings wurde bereits durch numerische Simulationsrechnungen belegt, dass diese Annahme nur eingeschränkte Gültigkeit besitzt [vi, vii].

### VERSUCHSDURCHFÜHRUNG, RAHMENBEDINGUNGEN UND AUSWERTUNG

In der Projektphase eins „Verbesserung des Zähigkeitsangebots“ werden Untersuchungen mit dem Ziel durchgeführt, die mechanischen Eigenschaften der EB-Schweißverbindungen durch prozesstechnische Maßnahmen zu verbessern. Hier werden insgesamt 4 unterschiedliche Konzepte verfolgt.

- Variation der Streckenergie
- Mehrbad-/Mehrprozess-technik
- Einsatz von Zusatzmaterial
- Untersuchung des Einflusses verschiedener Legierungs- und Herstellungskonzepte des Grundwerkstoffes

Die Schweißuntersuchungen werden primär an 50 mm dicken Blechen der Festigkeitsklassen S355 und S460 durchgeführt. Die untersuchten Chargen unterscheiden sich durch ihren Kohlenstoffgehalt (0,03 m<sub>0</sub> C-0,2 m<sub>0</sub> C), das verwendete Mikrolegierungskonzept und das Herstellungsverfahren (normalisiert oder thermomechanisch gewalzt). Zusätzlich werden Stichversuche an vergleichbaren Materialqualitäten mit 100 mm Blechdicke durchgeführt. Die Einflussnahme

auf die erreichbare Zähigkeit mittels Zusatzwerkstoff schließt das experimentelle Materialspektrum ab.

Die Schweißuntersuchungen werden von Schweißwärmefeldmessungen begleitet. Diese werden während der Schweißversuche in allen drei Raumrichtungen im Bauteil durchgeführt, um im Nachgang, die mittels der BeamSim Software simulierte Wärmeführung zu verifizieren bzw. anzupassen. Um zum Projektabschluss industriell nutzbare Nahtgeometrien zu erzielen, werden mittels der Strahloszillation, die vergleichsweise einfach mit dem Elektronenstrahl durchgeführt werden kann, mindestens 3 mm Schmelzonenbreite eingestellt. So soll eine vollständige Anbindung ohne Flankenbindefehler auch bei Spaltmaßen bis 1,5 mm garantiert werden. Bei der Charakterisierung der Schweißnahtqualität wird neben den obligatorischen Härte- und Zugprüfungen ein besonderes Augenmerk auf die Quantifizierung der Zähigkeit gelegt. Um dem für strahlgeschweißte Stahlverbindungen typischen Rissauswandern im Kerbschlagversuch und weiteren statistische Untersuchungseinflüssen, wie Abweichungen der Kerblage, quantitativ habhaft zu werden, werden von jedem auszuwertenden Schweißversuch jeweils mindestens 24 Kerbschlagproben aus dem oberen, mittleren und unteren Schweißnahtbereich entnommen. Zusätzlich wird, anhand von OES-Untersuchungen an Nahtlängsschliffen die Veränderung der Legierungszusammensetzung in der Schmelzzone determiniert und nach Möglichkeit mit den Ergebnissen der übrigen Prüfverfahren korreliert.

Gleichzeitig wird durch das IEHK in der Projektphase 2 „Definition der Zähigkeitsanforderungen“ ein bruchmechanisches Nachweiskonzept entwickelt. Mit Hilfe von Parameterstudien zum Einfluss von Rissgröße und Belastungszustand sowie Beanspruchungsanalysen in Kooperation mit den Mitgliedern des PBA wird ein bruchmechanisches Ersatzmodell erstellt. Mit diesem Ersatzmodell wird nachgewiesen, welche Zähigkeitsanforderungen an Windenergieanlagen zu stellen sind. Ein wesentlicher und innovativer Bestandteil dieser Untersuchungen ist die numerische Beanspruchungsanalyse von bauteilähnlichen Proben, weil hier grundlegende Randbedingungen zur Anwendung des FAD auf EB-Schweißverbindungen untersucht werden. Abschließend werden die neuen Erkenntnisse zusammengeführt, indem der Nachweis geführt wird, dass die hinsichtlich ihrer mechanischen Beanspruchbarkeit optimierten EB-Schweißverbindungen dicker Bleche sicher in Windenergieanlagen eingesetzt werden können. Für diese Untersuchungen werden EB-geschweißte Bleche mit verbessertem Zähigkeitsangebot verwendet.

### ERGEBNISSE

Die Ergebnisse weisen eine grundsätzlich einheitliche Tendenz auf. Die Untersuchungen zum Einfluss der Streckenergie weisen jeweils einen klaren Abfall der Zähigkeitswerte mit steigender Streckenergie auf. Dieser Effekt lässt sich sowohl durch diverse Vorwärmtemperaturen als auch Mehrbadschweißen sowie der Variation der Streckenergie

mit verschiedenen Schweißgeschwindigkeiten (3 mm/s, 5 mm/s, 10 mm/s) hervorrufen. Auch über der Schweißnahthöhe lässt sich dieser Zusammenhang feststellen. Der Bereich nahe der Oberraupe, in dem das Metall die längste Zeit schmelzflüssig ist, weist in Summe signifikant schlechtere Zähigkeitswerte auf als der entsprechende wurzelnahe Bereich. Abhängig vom Kohlenstoffgehalt wird bei einigen Versuchen mit hoher Schweißgeschwindigkeit und niedriger Streckenenergie zwar die als kritisch gesetzte 350 HV Marke überschritten, dies hat aber nicht zwingend einen negativen Einfluss auf die Zähigkeit der Verbindung. Sinkende Härte- und Zähigkeitswerte bei hohen Streckenenergien weisen auf einen Versprödungsvorgang durch ansetzende Kornvergrößerung und Korngrenzausscheidungen nach dem Erstarren hin. Dies wird gestützt durch REM-Untersuchungen an Querschliffen. In der Unterraupen- bzw. bei Vergleichsweise niedrigen Streckenenergien stellt sich ein feines Gefüge ein. Die ehemaligen Austenitkörner sind deutlich kleiner. Der in allen Untersuchungen überwiegende obere Bainit kann im feinkörnigen Zustand die vorhandenen Martensitinseln einlagern, ohne dass die

Zähigkeit bedeutsam beeinträchtigt wird. Weiterhin lassen sich erwartungsgemäß höhere Schweißnahtzähigkeitswerte an den Stählen erreichen, die seitens des Grundwerkstoffes bereits eine hohe Zähigkeit mitbringen. Auf diese Werkstoffe wird im Weiteren der Fokus der Untersuchungen gelegt.

Die Kerbschlagarbeit wird für alle Nähte zunächst bei  $-40^{\circ}\text{C}$  bestimmt. Hierbei zeigt sich eine große Streuung der Kerbschlagarbeiten von Tieflage bis Hochlage. Bemerkenswert dabei ist die Tatsache, dass es sich in ca. 95 % der Untersuchungen um Werte der Hochlage oder der Tieflage handelt. Werte im Übergangsbereich werden selten erreicht. Dies legt die Vermutung nahe, dass der betrachtete Werkstoff (S460) einen sehr schmalen Temperaturübergangsbereich bei etwa  $-40^{\circ}\text{C}$  aufweist, **Abbildung 2**.

Dies wiederum bedeutet, dass eine leichte Steigerung der Prüftemperatur die Ergebnisse sicher in den Bereich der Hochlage verschiebt. Bis auf den oberraupennahen Bereich lässt sich diese Vermutung im Experiment bestätigen. Bereits bei einer Steigerung der Prüftemperatur auf  $-30^{\circ}\text{C}$  werden in der Schweißnahtmitte

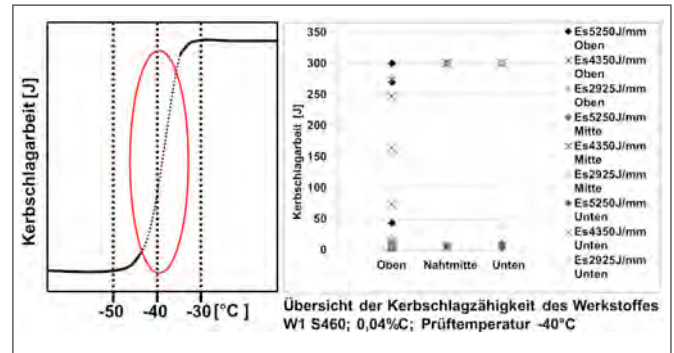


Abbildung 2: Exemplarische Kerbschlagergebnisse, Übergangskurve

und im Bereich der Unterraupen ausschließlich Werte der Hochlage ( $>300\text{J}$ ) erreicht. Der Effekt des Rissauswanderns kann bei der statistischen Gesamtbetrachtung nur für maximal 40 % der Hochlagenwerte verantwortlich gemacht werden.

Mangan ist als ein wesentliches Legierungselement in allen untersuchten Stählen in Konzentrationen zwischen 1,3 % und 1,7 % vorhanden. Mit einem Siedepunkt von  $2061^{\circ}\text{C}$  bei Atmosphärendruck geht dieses Element deutlich früher in die Dampfphase über als Eisen. Die OES-Untersuchungen an Längsschliffen der Schweißnähte zeigen eine signifikante Abnahme der Mangankonzentration in der Schmelzzone, mit einem Maximalabbrand im Bereich der Oberraupe. Der Manganabbrand steigt mit der Streckenenergie durch eine länger ge-

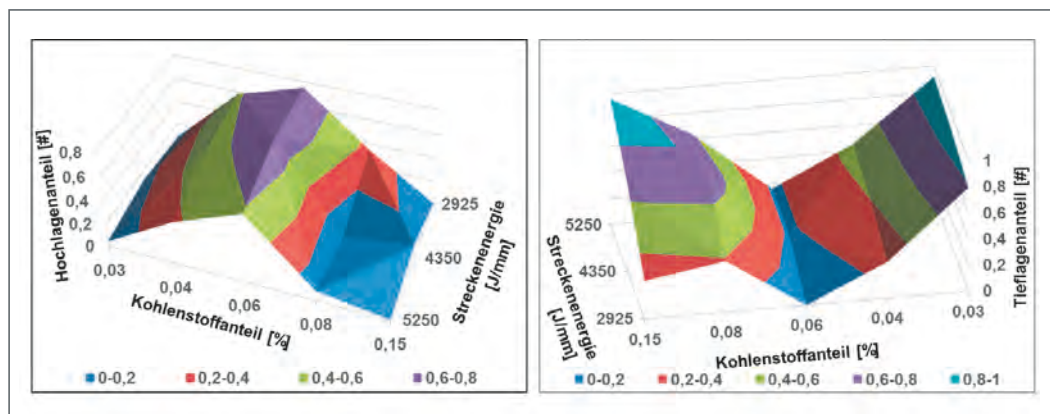


Abbildung 3: Hoch- bzw. Tieflagenversagen in Abhängigkeit vom Grundwerkstoff und der Streckenenergie

T <sub>27J</sub> Übergangstemperaturen Schweißgut	Ohne Zusatzwerkstoff	Mit Al in der Zwischenlage
Oberraupe	-48°C	-103°C
Blechmitte	-75°C	-106°C
Unterraupe	bimodales Verhalten	-94°C

Tabella 1:  
Übergangstemperaturen ohne und mit Zusatzwerkstoff

öffnete Kapillare und größeres siedendes Schmelzevolumen. Der Einfluss des Manganabbrandes auf die Zähigkeit der Schweißverbindung ist noch nicht abschließend geklärt. Allerdings führt Mangan zur Absenkung der kritischen Abkühlgeschwindigkeit, bei der Martensit entsteht. Damit ist bei geringerem Mangangehalt weniger Martensit zu erwarten. Die Festigkeitssteigerung durch Martensit ist erwartungsgemäß in Ober- und Unterraupe unterschiedlich stark ausgeprägt. Die Kerbschlagarbeitswerte, die im Zuge der Basischarakterisierung für alle Nähte bei -40°C bestimmt werden, streuen

teilweise stark zwischen Tief- und Hochlage.

Werden alle Kerbschlagwerte nach anteiligem Hoch- oder Tieflagenversagen in Abhängigkeit vom Grundwerkstoff und der Streckenenergie dargestellt, ergeben sich die Diagramme in **Abbildung 3**. Bei der Erstellung der Diagramme über anteiliges Hochlagen- bzw. Tieflagenversagen werden folgende Bedingungen zur Kategorisierung angesetzt. Als Hochlagenwerte werden alle Werte interpretiert, die im Bereich der Standardabweichung um den Mittelwert der Grundwerkstoffes liegen. Als Tieflagenwerte werden pauschal alle Werte < 20 J interpretiert. Der Übergangsbereich bleibt zunächst unbeachtet.

Der Grundwerkstoff ist hier durch seinen nominalen Kohlenstoffgehalt repräsentiert. Es zeigt sich ein deutlicher Trend der Zähigkeitssteigerung zu den höherfesten, thermomechanisch gewalzten Stählen mit niedrigem Kohlenstoffanteil im Bereich zwischen 0,04 und 0,06 m<sub>0</sub> C und einem Streckenenergiebereich Es theor. < 4310 J/mm.

Bemerkenswert dabei ist die Tatsache, dass es sich nahezu ausschließlich um Werte der Hochlage oder der Tieflage handelte. Werte im Übergangsbereich werden selten erreicht. Dies führt zu der Vermutung, dass die Schweißverbindungen der ausgewähl-

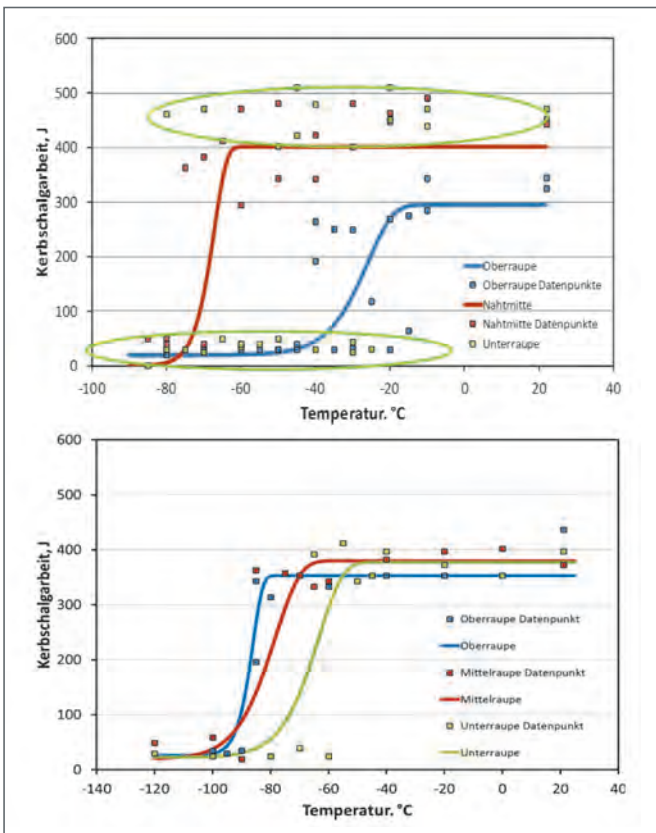
ten Werkstoffe (S460, 0,04%C, mikrolegiert mit Nb und Ti, thermomechanisch gewalzt und S355, 0,03%C) einen sehr schmalen Temperaturübergangsbereich bei etwa -40°C aufweisen.

Dies wiederum lässt vermuten, dass eine geringe Steigerung der Prüftemperatur die Ergebnisse in den Bereich der Hochlage verschiebt. Bis auf den oberraupennahen Bereich lässt sich diese Vermutung im Experiment bestätigen. Bereits bei einer Steigerung der Prüftemperatur auf -30°C werden in der Schweißnahtmitte und im Bereich der Unterraupe ausschließlich Werte der Hochlage (>300 J) erreicht. Der Effekt des Rissauswanderns kann bei der statistischen Gesamtbetrachtung nur für maximal 40 % der Hochlagenwerte verantwortlich gemacht werden.

Der Bereich des wurzelnahen Nahtdrittels erweist sich hinsichtlich der Zähigkeit als besonders kritisch aufgrund des bimodalen Versagensverhaltens. Auch im Unterraupenbereich werden Zähigkeitswerte der Hochlage erreicht, allerdings zeigen sich bis zu Temperaturen von -20°C auch jeweils der Tieflage zuzuordnende Messergebnisse. Übergangswerte hingegen werden selten erreicht.

Durch den Einsatz von Zusatzwerkstoff kann das Zähigkeitsangebot über der gesamten Nahthöhe homogenisiert und das bimodale Verhalten im Bereich der Unterraupe unterdrückt werden. Die beste Homogenisierung des Zähigkeitsangebotes wird durch den Einsatz von Nickel als bandförmigem Zusatzmaterial erreicht. Allerdings ist eine ähnlich

Abbildung 4:  
Temperaturübergangskurven ohne und mit Zusatzwerkstoff (Al)





positive Zähigkeitsentwicklung auch mit Aluminium in der Zwischenlage erreichbar. Alle experimentellen Ergebnisse zeigen, dass für alle Nahtbereiche Zähigkeitswerte der Hochlage >300 J bis zu einer Temperatur von -90°C zu erreichen sind, **Abbildung 4** und **Tabelle 1**.

Die Gründe für die Zähigkeitssteigerung mit Aluminium Zusatzwerkstoff sind nicht abschließend geklärt, allerdings können folgende Hypothesen ins Feld geführt werden, die auf drei korrespondierende Einflussgrößen zurückgehen:

#### i) Zusammensetzung

- Durch das Aluminium verändert sich die Metaldampfzusammensetzung in der Ka-pillare, wodurch der Manganabbrand verringert wird (Manganpartialdruck sinkt).
- Mangan, Aluminium und Sauerstoff bilden Mangan-spinelle (Aluminiummanganat).

#### ii) Abkühlgradient

- Das stets vorhandene Aluminiumoxid führt zu einer Steigerung der Schmelztemperatur (ca. 40°C gemessen 5 mm neben Schmelzbadmitte), die seinerseits über die Verringerung des Abkühlgradienten zu einem größeren Austenitkorn führt

#### iii) Kornfeinung

- Die Austenitkorngröße hat entscheidenden Einfluss auf die allotriomorphe Ferritbildung. Bei Anwesenheit von ferritkornbildenden oxydischen Einschlüssen (Bspw.: Aluminiummanganat) wird die allotriomorphe Ferritbildung zugunsten der Nadel-ferritbildung gehemmt.

## ZUSAMMENFASSUNG UND AUSBLICK

Bezüglich der schweißtechnischen Untersuchungen ist zusammenzufassen, dass:

- das lokale Wärmeregime entscheidend für die Zähigkeitseigenschaften ist,
- ein kleiner Bereich tauglicher Streckenenergien existiert,
- Vorwärmen und Mehrprozessertechnik sich als nicht zielführend hinsichtlich einer Verbesserung der Zähigkeitseigenschaften erweisen,
- die im Projekt optimierten Werkstoff-Prozessparameter-Kombinationen außer im Bereich der Unterraupen bereits zu den derzeit geforderten Zähigkeitswerten führen,
- der Abbrand niedrigsiedender Legierungselemente mitbestimmend für die Temperaturverteilung in der Schmelze ist,
- die Bildung von kaltzähem Nadelferrit durch gezielte Wärmeleitung und lokalem Auflegieren über der Nahthöhe gesteuert werden kann,
- eine erhöhte Festigkeit des Schweißguts gegenüber dem Grundwerkstoff nur in geringem Maß zur Verschärfung der Zähigkeitsanforderungen an die Schweißnähte führt.

Somit ist der Einsatz der EB-Technologie für das Schweißen von Gründungsstrukturen durchaus denkbar!

Im Rahmen eines Folgeprojektes soll nun untersucht werden, inwieweit durch Eintrag von Zusatzwerkstoff gezielt Partikel erzeugt werden können, durch deren Menge

und Größe das Gefüge eingestellt und über der Schweißnaht homogenisiert werden kann.

#### Literatur

- [i] DIN EN 10025-3:2004: Warmgewalzte Erzeugnisse aus Baustählen; Teil 3: Technische Lieferbedingungen für normalgeglühte / normalisierend gewalzte schweißgeeignete Feinkornbaustähle; Deutsches Institut für Normung e.V.; Beuth Verlag GmbH; Berlin; 2004
- [ii] J. Calvo, A. Elwazri, S. Yue, D. Bai: Effect of cool deformation on the mechanical properties of HSLA pipeline steels; 3rd International Conference on Thermomechanical Processing of Steels; Padova; Italy; 2008:1–9
- [iii] J. Jordan, R. Bodnar, J. Dorricott: Use of the Holloman-Jaffe tempering parameter in the development of high strength steel plate; Can Metall Q; 2009; 48 (3): 285–292
- [iv] M.S. Rashid.: GM 980X – a unique high strength sheet steel with superior formability; Society of Automotive Engineers Congress; Detroit; USA; 1976: 938–949
- [v] M.S. Rashid, E.R. Cprek: Relationship between microstructure and formability in two high-strength, low-alloy steels; ASTM Special Technical Publication 647; 1978; 174–190
- [vi] C. Beltrami: Numerische Analyse der lokalen und globalen Beanspruchung in Bauteilen mit Rissen und Quantifizierung der Zähigkeitsanforderungen; Dissertation; RWTH Aachen (D81); Berichte aus dem Institut für Eisenhüttenkunde; Band 5/95; Shaker Verlag; 1995
- [vii] F. Grimpe, C. Beltrami: Einsatz der Finite-Elemente-Methode auf Probleme der Werkstofftechnik; Berichtsband zum 11. Aachener Stahlkolloquium; 1996; 93–100

**Kontakt:**  
 Dr.-Ing. Simon Olschok  
 Tel.: 0241-8096253  
 E-Mail: [olschok@isf.rwth-aachen.de](mailto:olschok@isf.rwth-aachen.de)

# NOTIZEN





## The Simple Choice for a Perfect Surface

Why should you choose Oerlikon Metco as your single source supplier for your laser cladding solutions? So you can

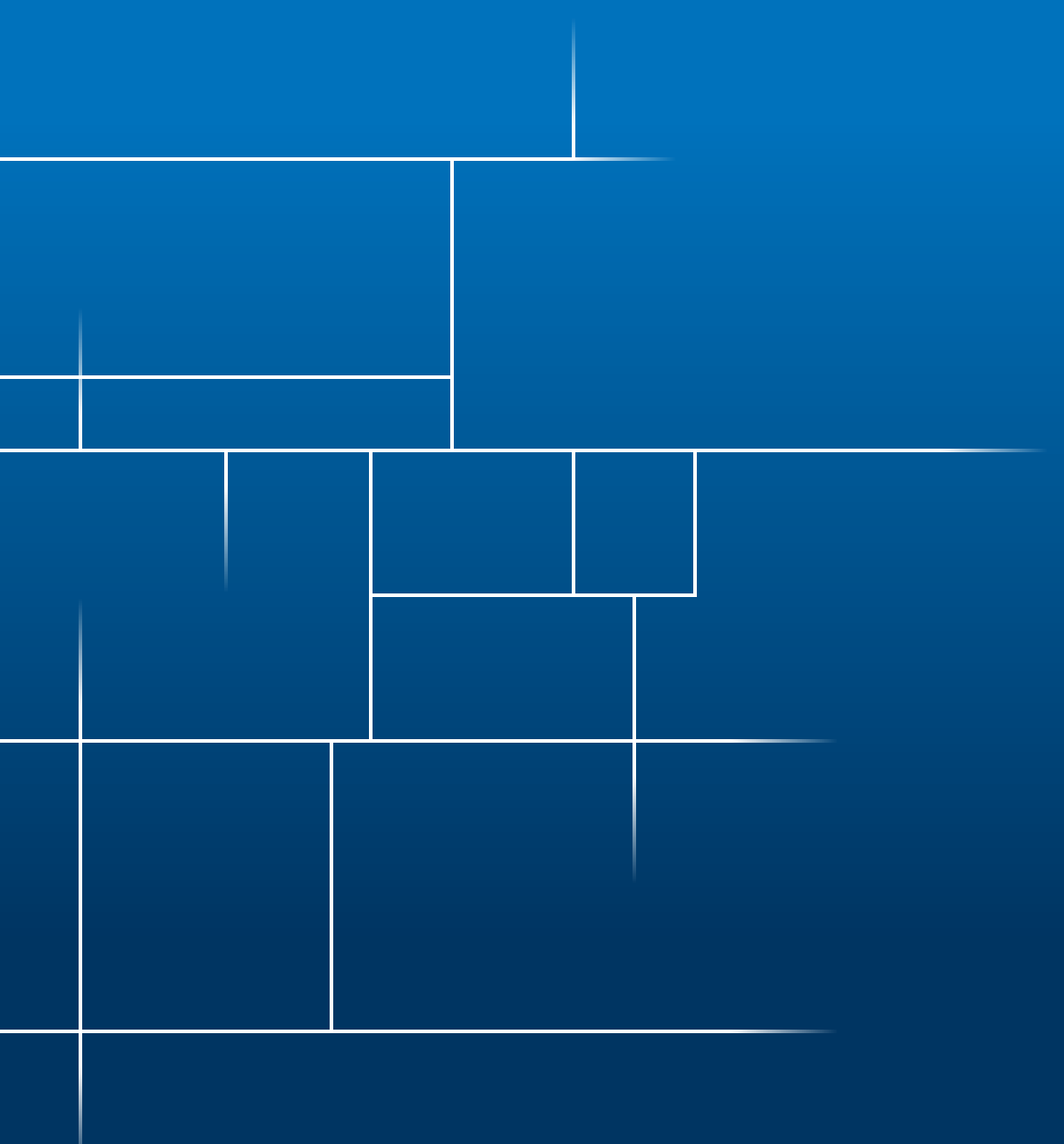
- Benefit from our 20+ years of laser cladding expertise
- Produce deposits of excellent quality with customized MetcoClad™ systems, materials and services
- Have our experts help establish a robust cladding strategy for your parts
- Process even the most complex workpiece geometry in a single cladding run

**With Oerlikon Metco, your choice is simple!**



[www.oerlikon.com/metco](http://www.oerlikon.com/metco)

**oerlikon**  
metco



**ISF**  
WELDING AND JOINING INSTITUTE

**RWTHAACHEN**  
**UNIVERSITY**